

INŽENJERSKA KOMORA CRNE GORE
STRUKOVNA KOMORA ELEKTRO INŽENJERA

OSMI DANI
ELEKTRO INŽENJERA IKCG

ZBORNİK RADOVA

Podgorica, novembar 2024.

CIP - Каталогизација у публикацији
Национална библиотека Црне Горе, Цетиње

ISSN 2704-520X = Dani elektro inženjera IKCG
COBISS.CG-ID 14752772

IZDAVAČ

Inženjerska komora Crne Gore
Strukovna komora elektro inženjera
Bulevar Džordža Vašingtona br. 31, Podgorica

ZA IZDAVAČA

Dušan Kokić, dipl.inž.građ.

ODGOVORNI UREDNICI

Željko Maraš, dipl.inž.el.
Prof. dr Milovan Radulović, dipl.inž.el.

ORGANIZACIONI ODBOR

Sandra Šipčić, dipl.inž.el, predsjednica Strukovne komore elektro inženjera
(do 24.10.2024.)
Rajko Radusinović, dipl.inž.el, predsjednik Strukovne komore elektro inženjera
(od 24.10.2024.)
Željko Maraš, dipl.inž.el, predsjednik Organizacionog odbora
Prof. dr Milovan Radulović, dipl.inž.el, predsjednik Programskog odbora
Mićun Nikitović, dipl.inž.el.
Hajdana Božović, dipl.inž.el.
Zoran Kaluđerović, dipl.inž.el.
Blagota Novosel, dipl.inž.el.
Milanko Džuver, dipl.inž.el.
Mladen Terzić, dipl.inž.el.
Petar Krgušić, dipl.inž.el.

LEKTURA

Jelena Pavićević Tatar

TEHNIČKI UREDNIK

Blažo Veljović

ŠTAMPA I POVEZ

Grafo Group d.o.o.
Podgorica

TIRAŽ

300

POKROVITELJI

Ministarstvo energetike
Ministarstvo prostornog planiranja, urbanizma i državne imovine
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore
Glavni grad Podgorica

GENERALNI SPONZORI

Elektroprivreda Crne Gore A.D.
Crnogorski elektroprenosni sistem A.D.

SREBRNI SPONZORI

Čikom d.o.o. Podgorica
Schneider Electric d.o.o. Beograd
Egal d.o.o. Ljubljana
Vertiv d.o.o. Zagreb
BS-Projekt 2009. d.o.o. Valjevo i Zarja elektronika d.o.o. Kamnik

BRONZANI SPONZORI

Legrand d.o.o. Beograd
ETI d.o.o. Ljubljana
Zetogradnja d.o.o. Podgorica
Telemont d.o.o. Podgorica

OSTALI SPONZORI

MPMA - Crnogorsko udruženje za upravljanje projektima

Zbornik radova

OSMI DANI ELEKTRO INŽENJERA IKCG

ZBORNİK RADOVA

Podgorica, novembar 2024.

SADRŽAJ

UVODNA RIJEČ PREDSEDNIKA STRUKOVNE KOMORE ELEKTRO INŽENJERA IKCG	8
UVODNA RIJEČ PREDSEDNIKA ORGANIZACIONOG ODBORA.....	11
INTEGRACIJA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U DISTRIBUTIVNI SISTEM - PROBLEMI I POTENCIJALNA RJEŠENJA.....	13
Martin Čalasan, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore	
REALIZACIJA SOLARNE ELEKTRANE INSTALISANE SNAGE 5 MW U CRNOJ GORI	25
Natalija Radonjić, Permonte d.o.o. Podgorica	
ENERGETSKA REKONSTRUKCIJA VISOKOTEMPERATURNOG SUSTAVA CENTRALNOG GRIJANJA OBITELJSKE KUĆE ILI VIŠESTAMBENE ZGRADE	37
Emil Prpić, Ured ovlaštenog inženjera elektrotehnike Viškovo, Republika Hrvatska	
KOMPLEKSNO KORIŠĆENJE HIDRO POTENCIJALA VRELA I POVREMENIH TOKOVA CRNE GORE.....	51
Miodrag Kaluđerović, ENOP DOO Podgorica	
FUNKCIONISANJE DAN-UNAPRIJED TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE U CRNOJ GORI I ZEMLJAMA U REGIONU SA OSVRTOM NA TRŽIŠNO POSLOVANJE EPCG A.D.	63
Božana Miljanić-Marušić, Maja Rašković, EPCG A.D. Nikšić	
NOVI PRISTUPI U MODELOVANJU KOMPONENTI SISTEMA ZA REGULACIJU POBUDE, SINHRONE MAŠINE - PRIMJER SINERGIJE NAUKE I PRAKSE	75
Mihailo Micev, Martin Čalasan, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore	
REVITALIZACIJA POLOVA ROTORA GLAVNOG GENERATORA BR. 3 U HE ĐERDAP 1, NEOPHODNOST PROMENE MESTA IZVRŠENJA REVITALIZACIJE, DEFINISANJE OBIMA RADOVA, ISPITIVANJA I PLAN KONTROLE KVALITETA.....	93
Dragan Belonić, EPS AD, HE "Đerdap 1" Kladovo, Republika Srbija	
PRIMJENA MEEC SOFTVERA U CILJU POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI OBJEKATA	105
Vidosava Babić, MTEL DOO Podgorica Sandra Ivanović, S.A.R.D. DOO Budva Đorđe Nedeljkov, Pomorski fakultet Kotor	

IMPLEMENTACIJA SISTEMA ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM (MES) U MLJEKARI NIKA - NIKŠIĆ.....	119
Kosta Strunjaš, Deltahes d.o.o. Nikšić	
VIŠEKANALNO OČITAVANJE SENZORSKIH 0-20 MA I ±10 V SIGNALA ZASNOVANO NA AD4111 ČIPU I ESP8266 MIKROKONTROLERU	131
Nebojša Škerović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore Amar Kapić, Fakultet za informacione tehnologije, Univerzitet Mediteran Milovan Radulović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore	
DANFOSS DRIVES VLT FREKVENTNI REGULATORI I SOFTVERSKI ALAT ZA PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE ELEKTRO MOTORA TZV. CBM „CONDITION BASED MONITORING“	145
Jovan Milović, TANGENTA DOO Nikšić Žarko Guranović, Danfoss Drives Beograd	
UNAPREĐENJE PROGRAMA ZA PRORAČUN JAČINE ELEKTRIČNOG POLJA U MOBILNOJ TELEFONIJI SA OSVRTOM NA NJEGOVU PRIMENU KOD 5G SISTEMA	153
Aleksandar Lebl, IRITEL a.d. Beograd, Republika Srbija	
UTICAJ VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE NA MEDICINSKU PRAKSU: STANJE, IZAZOVI I PERSPEKTIVE.....	165
Ivan Martinović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore	
ENERGETSKO-KOMUNIKACIONA REDUNDANSA DATA CENTARA NOVE GENERACIJE	175
Ivan Vujović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu Vladan Durković, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu	
DETEKCIJA KVAROVA U JEDNOFAZNIM ENERGETSKIM TRANSFORMATORIMA ZASNOVANA NA RAVNOTEŽI MAGNETOPOBUDNIH SILA.....	187
Veselin Ilić, Mojkovac	
NESTANDARDNA ZAŠTITA OD POŽARA U INDUSTRIJI UPRAVLJANJA OTPADOM.....	197
Siniša Teodosić, BS-PROJEKT 2009. d.o.o. Valjevo, Republika Srbija Zarja elektronika d.o.o. Kamnik, Republika Slovenija	
TEHNIČKO OBRAZOVANJE I INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE	211
Ranko Vojinović, Podgorica	
BIOGRAFIJE AUTORA	231
SEDMI DANI ELEKTRO INŽENJERA IKCG - RETROSPEKTIVA.....	242
SPONZORI	250

УВОДНА РИЈЕЧ ПРЕДСЈЕДНИКА СТРУКОВНЕ КОМОРЕ ЕЛЕКТРО ИНЖЕЊЕРА ИКЦГ



Поштоване колегинице и колеге,

Имам част и привилегију да вас као предсједник Струковне коморе електро инжењера ИКЦГ поздравим и пожелим да и ове „Осме дане електро инжењера“ сви заједно успјешно завршимо и након дводневног дружења и слушања предавања и панел дискусија одемо обогатени новим сазнањима из наше електротехничке струке и наравно богатији за нова другарства и обновљена стара пријатељства, што нам је и био један од мотива, када смо, прије десетак година, почели да планирамо организацију ових наших, већ сада можемо рећи, традиционалних сусрета.

Прелиставајући претходних седам зборника у којима смо сабрали радове аутора како из земље тако и из сусједних држава, не могу да не изразим задовољство што ће будуће генерације наших колега имати из чега да проучавају развој електротехничке струке и идеја, којима смо обогатили како праксу тако и теорију електротехнике, која је била и остала замајац технолошког и развојног напретка и прогреса како наше државе тако и свијета.

И ове године имате у вашим рукама Зборник у којем су објављени радови 17 аутора, којима се овом приликом захваљујем на уложеном труду, а којима су обухваћене различите теме и проблеми са којима се сусрећемо у нашем раду, а које ће вам аутори радова приближити својим презентацијама.

Компетентни стручњаци, представници различитих електро инжењерских области ће вас кроз организоване панел дискусије упознати са планирањем, развојем и имплементацијама најновијих достигнућа у нашој струци.

Не могу да не кажем да су се од оснивања ИКЦГ прије двадесетак година више пута мијењала законска рјешења којима се регулисала организациона структура и овлашћења Инжењерске коморе, која су нам неријетко отежавала рад и захтијевала прилагођавања тим рјешењима. И сада се налазимо пред усвајањем нових, посебних Закона везаних за планирање простора и за изградњу објеката, којима се враћају нека рјешења из ранијег закона, а која

су везана за издавање грађевинске дозволе, техничког пријема и издавања употребне дозволе, али се и предвиђа издавање Струковне коморе архитеката из наше досадашње Инжењерске коморе, која на тај начин постаје засебна Комора архитеката и планера.

Увјерен сам да ћемо се и овом законском рјешењу успјешно прилагодити и наставити да дајемо пуни допринос како развоју наше државе тако и заштити интереса и усавршавању наших чланова, чему ће послужити како ови Осми тако и наредни Девети сусрети које планирамо за идућу годину.

Захваљујем се Министарству просторног планирања, урбанизма и државне имовине, Министарству енергетике, Главном граду Подгорица и Електротехничком факултету, који су препознајући значај овог скупа и ове године прихватили да буду покровитељи нашег скупа.

Посебну захвалност дугујемо нашим Генералним спонзорима: Електропривреди Црне Горе А.Д. и Црногорском електропреносном систему А.Д; Сребрним спонзорима: ЋИКОМ d.o.o. из Подгорице, LEGRAND d.o.o. из Београда, SCHNEIDER ELECTRIC d.o.o. из Београда, EGAL d.o.o. из Љубљане, BS-ПРОЈЕКТ 2009 d.o.o. из Ваљева и ZARJA ELEKTRONIKA из Камника; као и Бронзаним спонзорима: ЕТИ d.o.o. из Љубљане, ZETAGRADNJA d.o.o. из Подгорице и TELEMONT d.o.o. из Подгорице; јер без ваших спонзорстава не би било могуће организовати овај скуп у формату у којем га организујемо.

Не могу да се на крају посебно не захвалим Жељку Марашу, предсједнику Организационог одбора, професору Миловану Радуловићу предсједнику Програмског одбора и доскорашњој предсједници Струковне коморе електро инжењера Сандри Шипчић, који су уложили огромни труд и знање у организацију и ових Осмих дана електро инжењера.

Хвала и свим члановима Извршног одбора СКЕИ као и нашим драгим сарадницама из Секретаријата Коморе, као и свима који су учествовали у припреми и штампању Зборника и у организацији Осмих дана електро инжењера.

Рајко Радусиновић, дипл.инж.ел.

Предсједник Струковне коморе електро инжењера

UVODNA RIJEČ PREDSJEDNIKA ORGANIZACIONOG ODBORA



Poštovane kolegice i kolege,

Osam godina našeg druženja pokazuju postojanost i opravdanost ambicija da se profesionalnost i poštovanje njeguju i donose uvijek sadržajnije i bogatija okupljanja u okviru Dana elektro inženjera.

I ovoga puta, u okviru Osmih dana elektro inženjera, ispunjeni smo istim entuzijazmom i energijom i uvjereni smo u uspješnost našeg novog druženja. Broj najavljenih učesnika skupa, u kojoj god da se uloži pojavljuju, dao nam je dodatnu snagu i volju da u organizacionom dijelu ne zaostanemo ni za pedalj u odnosu na sve prethodne godine, kao i da ponešto pokušamo i da unaprijedimo. Drago nam je da ćete tome svjedočiti i nadamo se da ćete biti ispunjeni ponosom što ste u skupu sudjelovali, jednako kao i mi koji smo ga pripremili i organizovali.

Nastavljamo sa tradicijom da se na našem najznačajnijem stručnom skupu razgovara o svim važnim temama i trendovima razvoja elektro struke i o društveno značajnim pitanjima iz oblasti u kojima je važno da se čuje glas elektro inženjera.

Uz ove godine maksimalan broj prijavljenih stručnih radova i sponzorskih prezentacija, organizovani su paneli iz oblasti zelene tranzicije, regulatornog okvira za gigabitnu povezanost, te projektovanja i energetske održivosti „zelenih“ DATA centara.

Sve radove, a i mnogo dodatnih podataka i fotografija, moći ćete da pročitate i pogledate u ovom Zborniku radova. U ime Organizacionog odbora, zahvaljujem se svim autorima radova na uloženom trudu u pripremi i prezentaciji radova.

Dužan sam da uvijek iznova ponovim da su Dani elektro inženjera, osim stručnog usavršavanja, jedinstvena prilika za susrete, druženje, stvaranje i učvršćivanje međusobnih ličnih i profesionalnih kontakata, kao i za razmjenu iskustava.

Zahvalnost dugujemo našim tradicionalnim partnerima, pokroviteljima i sponzorima, koji iz godine u godinu organizaciono i finansijski podržavaju organizaciju skupa, kao i novim partnerima i sponzorima koji su nam ove godine poklonili svoje povjerenje i podršku, a nadamo se da će tako biti i narednih godina.

Koristim priliku da se i ovoga puta najiskrenije zahvalim predsjedniku Programskog odbora prof. dr Milovanu Raduloviću, sa kojim od Prvih dana do danas dijelim svo vrijeme uloženo u organizaciju stručnog skupa i bez čije pomoći skup ne bi bio ovako uspješan.

U ime Organizacionog odbora, svima želim ugodan boravak i druženje na Osmim danima elektro inženjera, uvjeren u nastavak tradicije i u narednim godinama.

Željko Maraš, dipl.inž.el.
Predsjednik Organizacionog odbora

INTEGRACIJA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U DISTRIBUTIVNI SISTEM - PROBLEMI I POTENCIJALNA RJEŠENJA

Martin Čalasan

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

KRATAK SADRŽAJ

Savremeni elektroenergetski sistemi (EES) odlikuju se izuzetno kompleksnom strukturom kod kojih, osim na prenosnom, postoje izvori energije i na distributivnom nivou. Upravo zbog toga je upravljanje i funkcionisanje takvih distributivnih sistema, poznatih kao aktivne distributivne mreže, izuzetno kompleksno i izazovno. Integracija obnovljivih izvora energije (OIE) u distributivnu mrežu može da doprinese poboljšanju ali i pogoršanju performansi mreže u pogledu smanjenja gubitaka i naponskih prilika. U ovom radu diskutovan je uticaj jednog i više distributivnih generatora (DG) na distributivnu mrežu upravo sa prethodno pomenutih aspekata. Takođe, ukazano je na potencijalne načine poboljšavanja integracije DG u distributivnu mrežu.

Ključne riječi: Obnovljivi izvori energije, Distributivni sistem, Invertor, Gubici, Pulsacije napona

1. UVOD

Povećanje emisije štetnih gasova, posebno CO₂, kao i ograničenost rezervi fosilnih goriva nametnuli su trend da se gotovo sve zemlje svijeta sve više orjentišu ka upotrebi obnovljivih izvora energije (OIE). U tom cilju, i politike brojnih svjetskih organizacija i udruženja su u potpunosti posvećene. Tako je na primjer Evropska unija postavila izuzetno ambiciozne ciljeve - da do 2050. godine Evropa bude zeleni kontinent sa nultom emisijom CO₂.

Obnovljivi izvori energije postaju sve više zastupljeni u proizvodnji električne energije [1]. Na taj način se zamjenjuju izvori koji su zaslužni za emisiju CO₂, ali se i utiče na dekarbonizaciju elektroenergetskih sistema (EES). Pored ekološkog faktora, koji je bio glavna motivacija za investiranje i sve veću upotrebu OIE, integracija OIE donosi i mnoge benefite za EES. Jedna od

prednosti jeste što se zahtjevima potrošnje može odgovoriti na lokalnom nivou, čime se smanjuje potreba prenosa i distribucije električne energije na velika rastojanja. Direktna posljedica decentralizovane proizvodnje iz OIE je i smanjenje opterećenja vodova i gubitaka aktivne i reaktivne energije u sistemu [2]. Na ovaj način se smanjuje vjerovatnoća preopterećenja vodova i povećava se sigurnost rada EES-a. Istovremeno, operator prenosnog i distributivnog sistema, koji je odgovoran za gubitke energije u mreži, smanjenjem gubitaka postiže i ekonomske benefite [3-8].

Od svih obnovljivih izvora energije, energija sunca (solarna energija) ima najveći potencijal za korištenje [9]. Naime, solarna energija je u većoj ili manjoj mjeri dostupna u svim zemljama svijeta. Osim toga, cijena solarnih panela, koji se koriste za pretvaranje solarne energije u električnu, konstantno opada [10]. Takođe, cijena invertera, koji se koriste za povezivanje solarnih elektrana (SE) i energetske mreže, je u stalnom padu. Sve su to veoma važne činjenice koje utiču na značajno povećanje interesa za korištenje solarne energije za proizvodnju električne energije [5]. U prilog navedenom govori i efikasnost solarnih ćelija, a istraživanja novih tehnologija utemeljenih na primjeni novih materijala ukazuju i na razvoj novih, izuzetno efikasnih, solarnih ćelija u bliskoj budućnosti (poznatih kao *Perovskite Solar Cells* – PSC) [11].

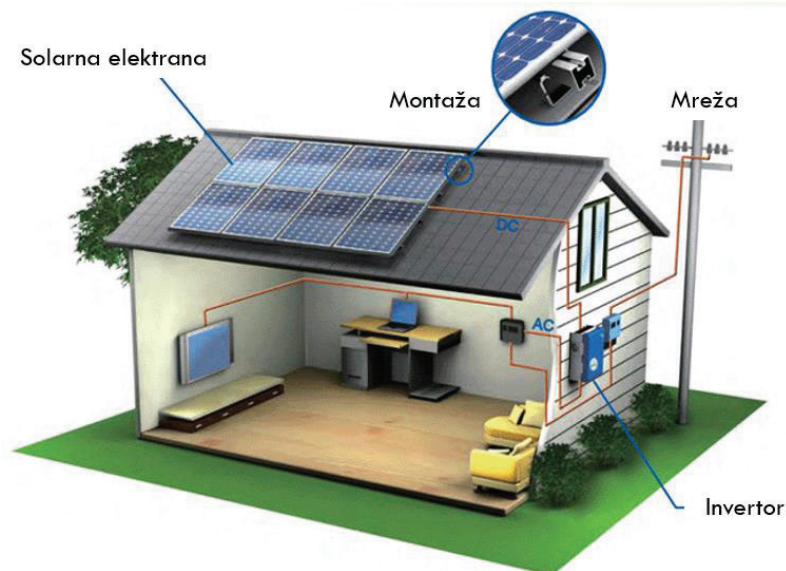
Konvencionalna distributivna mreža namijenjena je prenosu električne energije preuzete iz prenosne mreže na srednje i male potrošače. Međutim, povećanjem broja izvora distribuirane proizvodnje (*distributed generation* - DG), distributivna mreža postaje aktivna [3-8]. Štaviše, postoji i mogućnost promjene smjera toka snage iz mreže niskog napona u mrežu visokog napona. Osim navedenog, pod štetnim utjecajem integracije DG jedinica u distributivnu mrežu smatraju se uticaji na naponske prilike i na kvalitet električne energije [8].

Istraživanje ovog rada orjentisano je ka opisu efekata lokacije i snage DG na gubitke, naponske prilike i tokove snage u distributivnoj mreži. Cilj je i da se ukaže i na problem povećanog napona u mreži i na potencijalne načine njegove regulacije.

Rad je organizovan na sljedeći način: u drugom poglavlju date su neke od najvažnijih karakteristika rada SE. U trećem poglavlju diskutovan je uticaj optimalne lokacije DG na gubitke i naponske prilike u distributivnoj mreži. U četvrtom poglavlju dat je osvrt na probleme integracije DG u mreži. Na kraju, u zaključku, dat je osvrt na cjelokupan rad.

2. SOLARNE ELEKTRANE - KARAKTERISTIKE I UTICAJ VREMENSKIH PRILIKA NA PROIZVODNJU

Mrežne (*on-grid*) solarne elektrane (SE) predstavljaju važan element savremene energetike, omogućavajući efikasnu upotrebu solarne energije za proizvodnju električne energije. Mrežne solarne elektrane igraju ključnu ulogu u razvoju čiste energetike, smanjenju emisija gasova staklene bašte i obezbeđivanju energetske sigurnosti. Ove elektrane pomažu u izgradnji održive i ekološki čiste energetske infrastrukture za buduće generacije. Ovi sistemi razlikuju se od autonomnih sistema po tome što su povezani sa distributivnom mrežom, što omogućava korišćenje proizvedene energije ne samo za sopstvene potrebe, već i za distribuciju u energetska mrežu. Izgled *on-grid SE* instalirane na krovu jednog stambenog objekta prikazan je na slici 1.



Slika 1. SE na krovu kuće

Glavne karakteristike mrežnih solarnih elektrana su sljedeće:

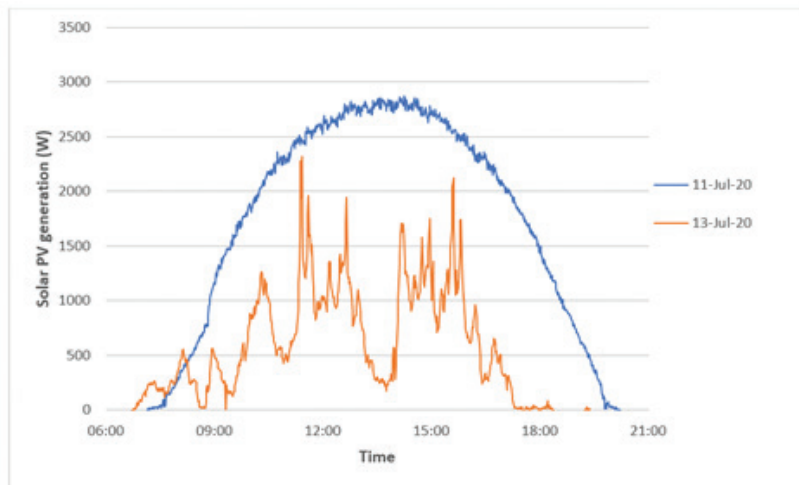
- Snaga: SE mogu imati različite snage, počevši od malih instalacija na krovovima objekata do velikih komercijalnih i industrijskih postrojenja. Prema tome, njihova snaga se kreće od nekoliko stotina W, pa sve do nekoliko stotina MW (npr. mrežna solarna elektrana u Kaliforniji ima instalisanu snage preko 550MW i jedna je od najvećih na svijetu).
- Paneli: Osnovni element solarne elektrane koji pretvara solarnu energiju u električnu je solarna ćelija. Zbog male vrijednosti izlaznog napona i struje, solarne ćelije se povezuju redno i paralelno formirajući solarne module, i u konačnom solarne panele. Solarni paneli su obično postavljeni na nosače ili krovove sa optimalnim pristupom sunčevoj svjetlosti.
- Invertori: Invertori su uređaji koji pretvaraju jednosmjernu struju/napon iz panela u naizmjeničnu struju/napon. Ovi uređaji omogućavaju sinhronizaciju rada SE sa distributivnom mrežom.
- Monitoring i upravljanje: Moderne SE obično su opremljene sistemima za monitoring i upravljanje koji omogućavaju operaterima praćenje proizvodnje energije, optimizaciju rada elektrane, ali i otkrivanje kvarova.

Solarni paneli su podložni različitim vremenskim uslovima, što može značajno uticati na njihovu efikasnost i proizvodnju. Jedan primjer uticaja vremenskih prilika na proizvodnju solarnih panela prikazan je na slici 2. Uticaj vremenskih prilika na proizvodnju solarnih panela je sljedeći:

- Sunčano vrijeme je idealno za proizvodnju solarne energije. Međutim, ekstremna toplota može smanjiti efikasnost panela zbog pregrijavanja. Da bi se ovo spriječilo, postavljanje solarnih panela pod uglom osigurava bolju cirkulaciju vazduha, smanjujući gubitke povezane sa temperaturom.
- Iako solarni paneli mogu da rade u oblačnim uslovima, njihov učinak je tada značajno manji u odnosu na rad pri sunčanom vremenu. Paneli dizajnirani za uslove slabog osvetljenja mogu da ublaže ovaj efekat efikasnijim „hvatanjem“ difuzne komponente sunčevog zračenja.
- Kiša može biti korisna, jer pomaže u čišćenju panela, poboljšavajući njihovu efikasnost. Međutim, jaka kiša i dugotrajno oblačno vrijeme mogu smanjiti vrijednost proizvodnje.
- Sniježne padavine mogu blokirati sunčevu svjetlost. Zbog toga je neophodno postojanje automatskih sistema za čišćenja ili ručno uklanjanje u sniježnim područjima. Osim toga, paneli postavljeni pod strmijim uglovima pomažu da snijeg lakše klizi, minimizirajući njegovo nakupljanje na panelima.
- Umjereni vjetrovi mogu ohladiti panele, poboljšavajući efikasnost. Međutim, jak vjetar ih

može oštetiti. Instaliranje izdržljivih sistema za montažu i odabir panela koji su predviđeni za uslove jakog vjetera su od suštinskog značaja u vjetrovitim područjima.

Solarni paneli imaju optimalan temperaturni raspon za rad. Ekstremna hladnoća može smanjiti električnu snagu, dok ekstremna vrućina može smanjiti efikasnost. Odabir panela sa niskotemperaturnim koeficijentom može pomoći u održavanju performansi na različitim temperaturama.



Slika 2. Proizvodnja SE

3. UTICAJ LOKACIJE I SNAGE DG NA GUBITKE I NAPONSKE PRILIKE U MREŽI

U literaturi koja se bavi obnovljivim izvorima energije i distribuiranom proizvodnjom mogu se naći sljedeći nedostaci i prednosti integracije DG u EES.

Nedostaci integracije DG, posebno solarnih elektrana u EES, su sljedeći:

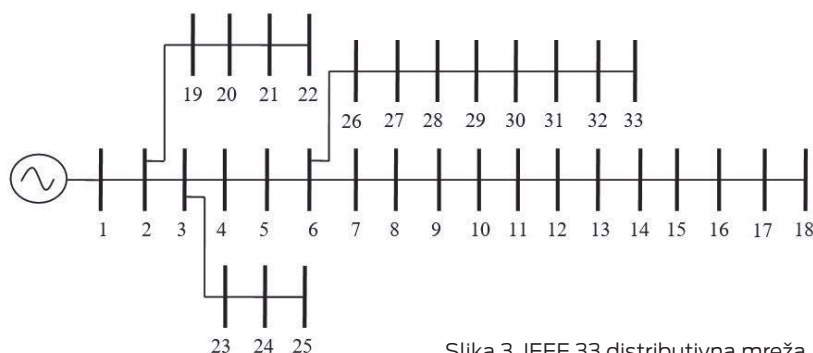
- Njihove performanse rada zavise od vremenskih uslova,
- Imaju intermitentan karakter proizvodnje,
- Isti injektiraju više harmonike u mrežu, itd.

Prednosti integracije su sljedeće:

- DG imaju niske operativne troškove,
- Primjena DG omogućava povećanje prenosnog kapaciteta dalekovoda,
- Primjena DG smanjuje gubitake u mreži i poboljšava naponski profil,
- Veća upotreba OIE smanjuje štetne uticaje na životnu sredinu, itd.

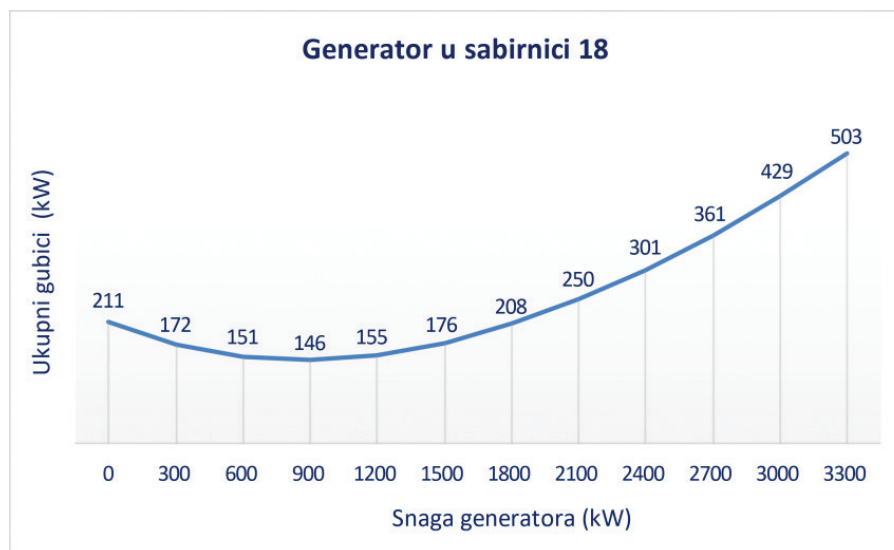
Međutim, ovako definisane prednosti i nedostaci integracije DG u mrežu ne važe uvijek i zbog toga je neophodno provjeriti njihove benefite i nedostatke za konkretnu mrežu.

U ovom radu, u cilju testiranja uticaja DG na gubitke i naponski profil mreže, posmatrana je standardna IEEE 33 čvorna distributivna mreža (slika 3) [12].



Slika 3. IEEE 33 distributivna mreža

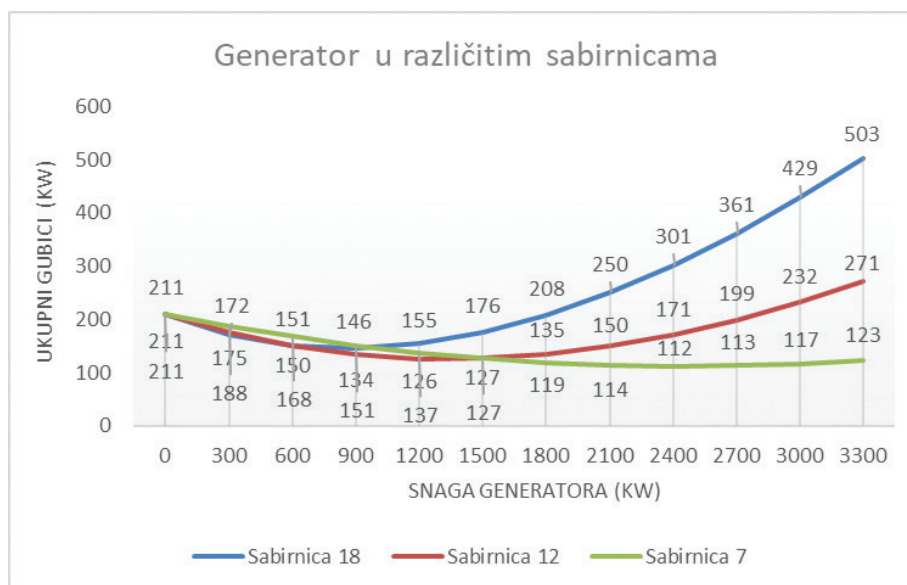
Istraživanje uticaja snage i lokacije DG na gubitke i naponske prilike je sprovedeno na sljedeći način. Kao inicijalni podatak proračunata je vrijednost gubitaka i naponi u svim čvorovima standardne mreže bez dodatih DG jedinica. Zatim je urađeno sljedeće - posmatrana je posljednja sabirnica u mreži (čvor 18), pri čemu je vršen proračun vrijednosti gubitaka u mreži za različite vrijednosti snage DG koji se priključuje u ovom priključnom mjestu. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 4.



Slika 4. Uticaj snage DG na gubitke u mreži

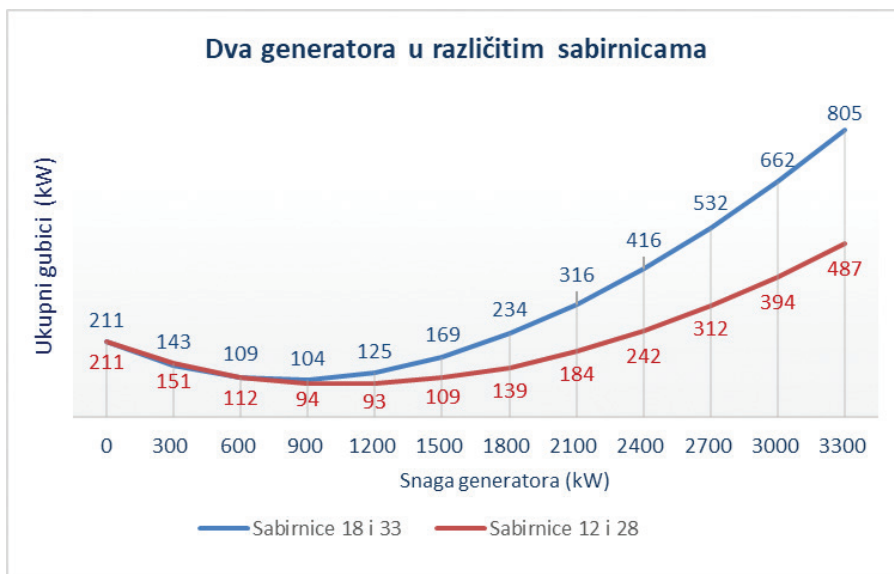
Sa slike 4. je jasno da se sa povećanjem snage DG, do nekih 900kW, smanjuju ukupni gubici u mreži. Međutim, nakon vrijednosti snage DG od oko 900kW dolazi do povećanja gubitaka. Štaviše, ako je snaga DG veća od 1800kW imamo situaciju da je vrijednost gubitaka u mreži veća nego u slučaju kada u mreži ne postoji priključen DG.

Slična analiza je sprovedena i za dva čvora bliža napojnom vodu, čvor 12 i čvor 7 (slika 5). I za ova dva čvora se može izvući apsolutno isti zaključak - povećanje snage DG može do određene granice da smanjuje gubitke u mreži. Međutim, sa slike 5 se može isvesti još jedan zaključak. Sa stanovišta gubitaka u mreži bolje je, ako je to tehnički moguće, priključiti DG bliže napojnom kraju (transformatorskoj stanici). Štaviše, u tom slučaju dijapazon snage priključenog DG može da bude izuzetno veliki.



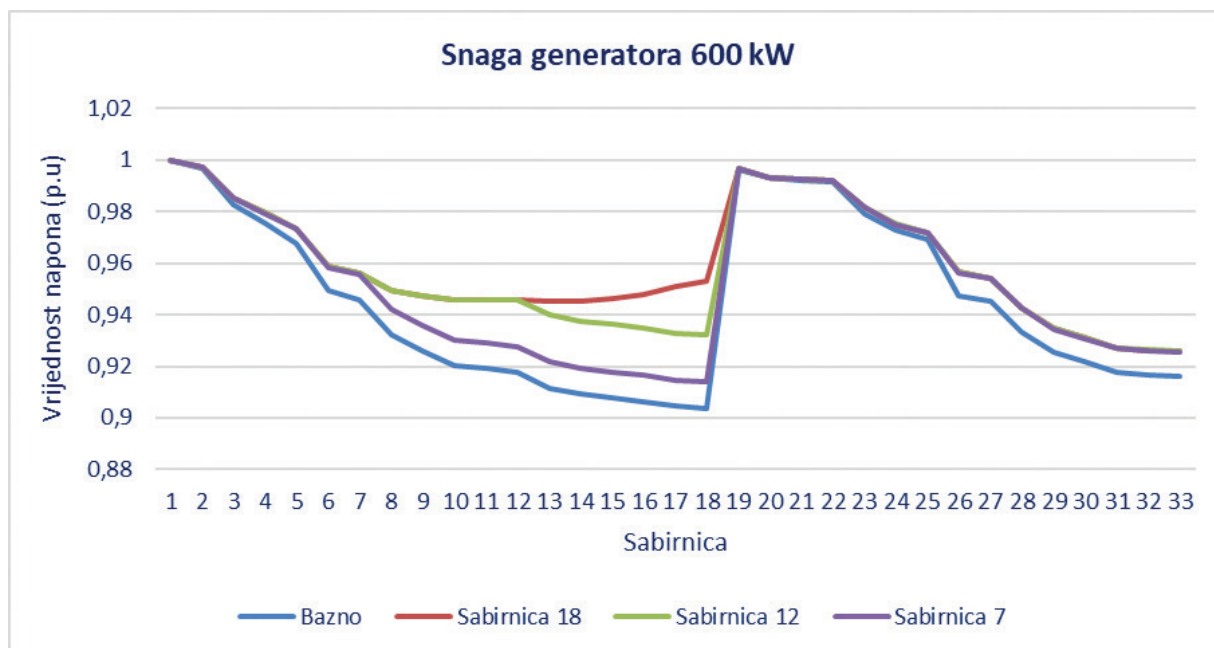
Slika 5. Uticaj snage i lokacije DG na gubitke u mreži

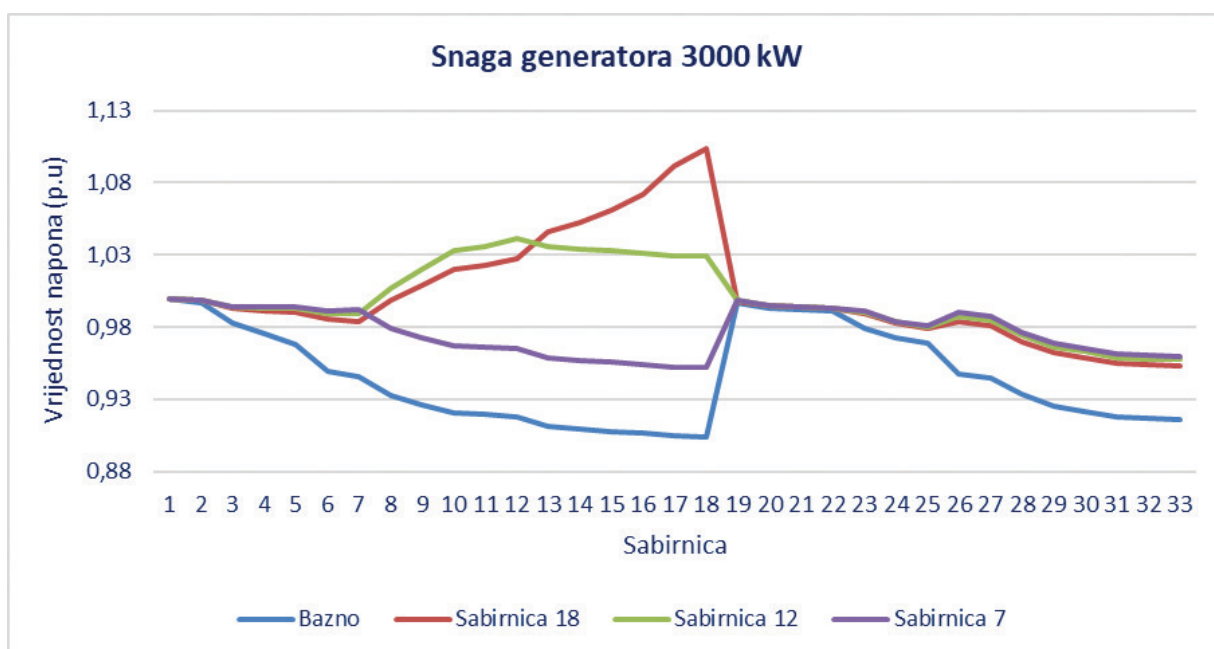
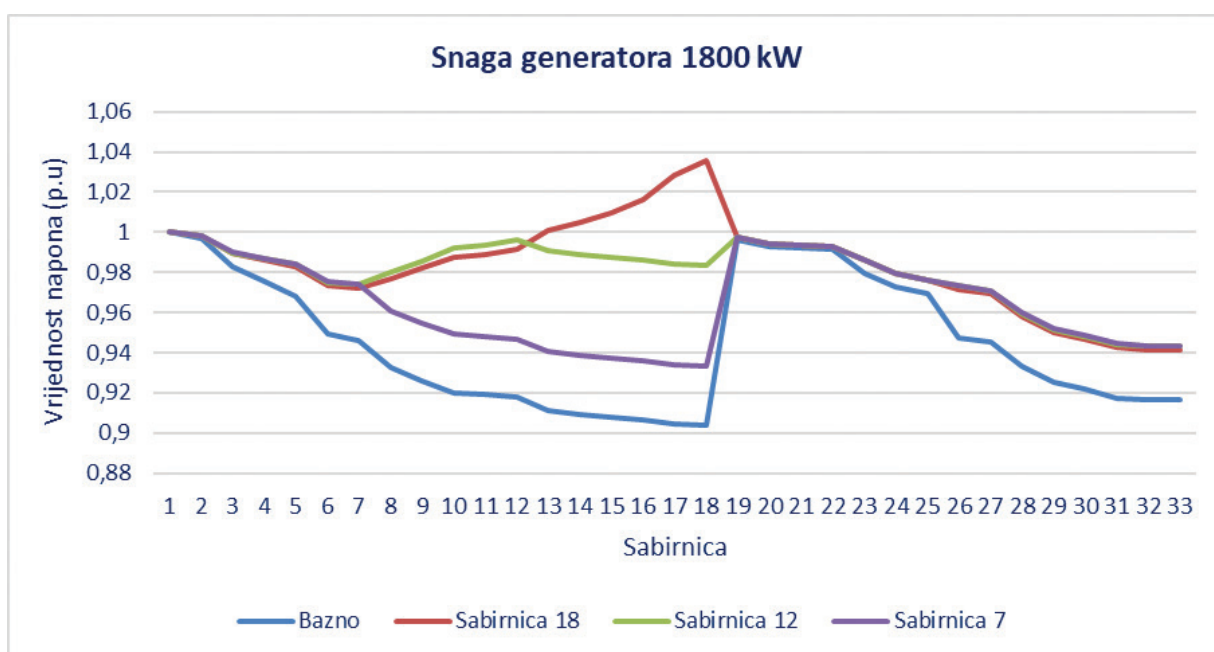
Na slici 6. prikazan je uticaj snage dva DG na gubitke u mreži. U konkretnom slučaju posmatrane su sabirnice 12 i 28, odnosno 18 i 33. I ovdje se jasno vidi da do određene vrijednosti snage DG jedinica dolazi do smanjenja gubitaka u mreži. Nakon te vrijednosti snage, gubici u mreži rastu.



Slika 6. Uticaj dva DG na vrijednost gubitaka u mreži

Prethodno istraživanje je analizirano i sa aspekta naponskih prilika u mreži. Naime, priključivanje jednog DG, u zavisnosti od njegove snage, može imati različite efekte na naponske prilike u mreži, posebno u priključnoj tački. Na slici 6. je prikazan uticaj tri različite snage DG, priključenog u različitim čvorovima, na naponske profile distributivne mreže. Sa slike je jasno da povećanje snage priključenog OIE može značajno da poveća vrijednost napona u priključnom čvoru što samim tim znači da se pogoršavaju naponske prilike u mreži. Prema tome, snaga DG igra veliku ulogu ne samo na vrijednost gubitaka nego i na vrijednost naponskih prilika u mreži.





Slika 6. Uticaj snage ili lokacije DG na naponski profil mreže

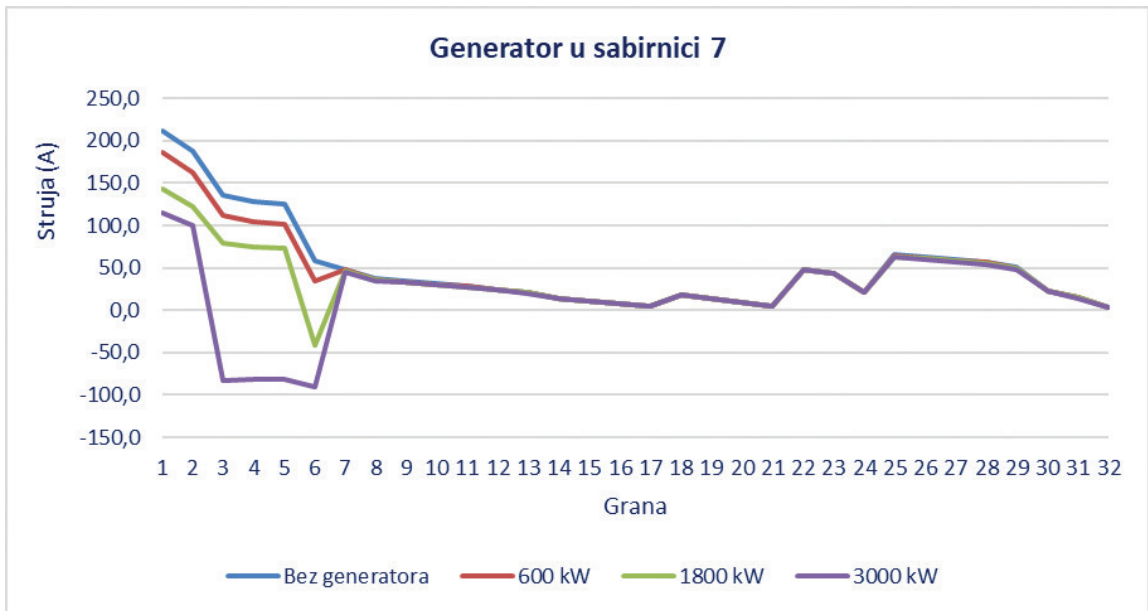
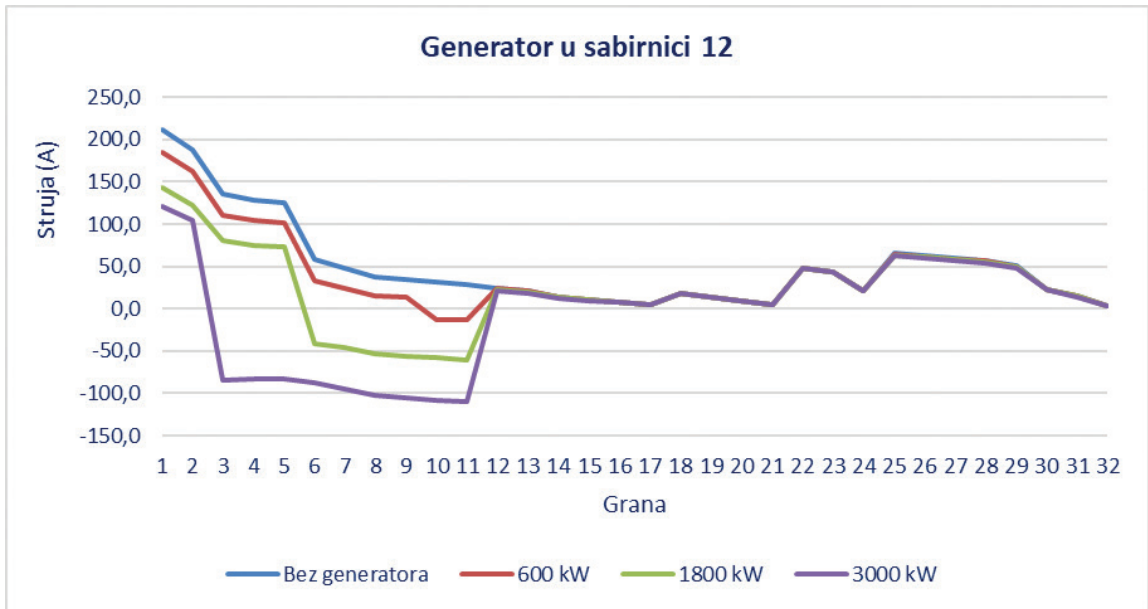
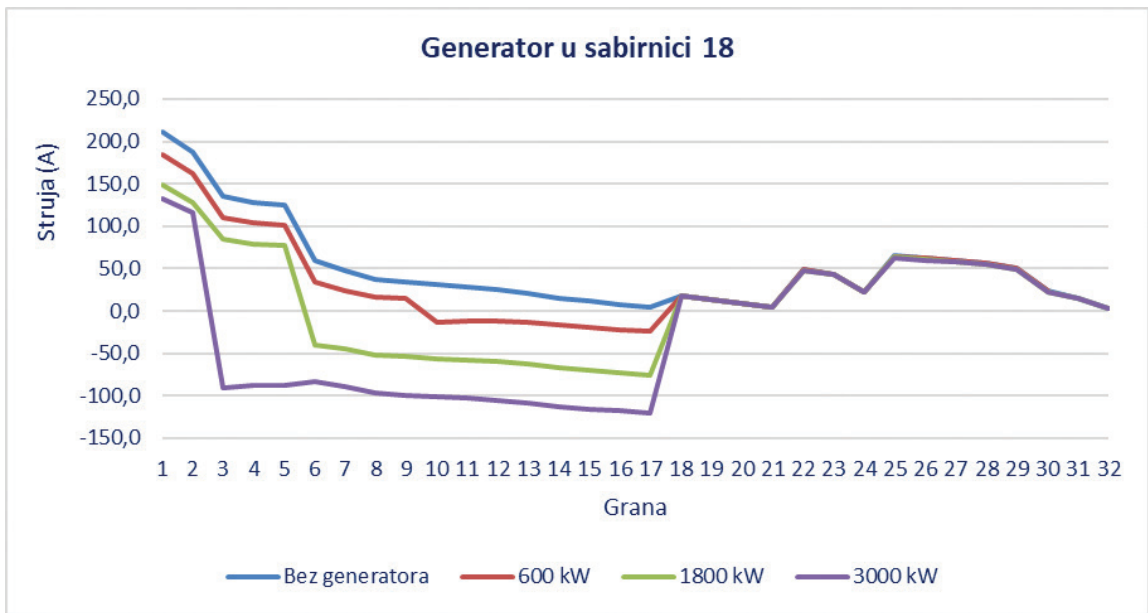
Na kraju, snaga DG igra i veliku ulogu na tokove energije u samoj mreži. Naime, ako je snaga DG veća od snage potrošnje u mjestu priključenja, onda dolazi do promjene smjera snage, od potrošača ka priključnoj trafostanici. Na slici 7 prikazan je uticaj snage DG na vrijednost struje u granama posmatrane mreže, za tri vrijednosti snage priključenog DG. Ako se posmatra čvor 18, u koji se priključi DG od 3MW, struja u granama od čvora 18 do čvora 2 ima suprotan smjer u odnosu na bazni slučaj (slučaj kada u mreži nema DG).

Na bazi prethodne analize mogu se izvući sljedeći zaključci:

Lokacija DG ima veliki uticaj na vrijednost gubitaka u mreži,

Sa stanovišta gubitaka i naponskih prilika u mreži - bolje je priključiti DG što je moguće bliže priključnoj trafostanici.

Priključenje DG čija je snaga veća od snage potrošača dovodi do promjene toka snage.



Slika 7. Uticaj lokacije i snage DG na tokove snage u mreži

Konfiguracija i parametri mreže igraju veliku ulogu u određivanju lokacije i dimenzionisanju snage DG. Takođe, na osnovu analize sa većim brojem DG jasno je da je bolje proizvodne jedinice rasporediti po mreži, i ako je moguće, bliže priključnoj trafostanici. Međutim, dimenzionisanje ukupne snage priključenih proizvodnih jedinica podrazumijeva analizu mreže i proračune za različite scenarije rada.

Treba posebno naglasiti da jednom sprovedena optimizacija lokacije DG ne znači trajno rješenje. Uključenje novih potrošača rezultira novim uslovima na nivou distributivne mreže, koji odstupaju od onih uslova koji su važili u trenutku sprovođenja optimizacije. Takođe, integracija dodatnih DG rezultira novim uslovima na nivou distributivne mreže, koji odstupaju od onih uslova koji su važili u trenutku sprovođenja optimizacije.

Brojne zemlje svijeta, suočene sa problemima integracije DG u mrežu, imaju pravilnike kojim se definiše ukupna vrijednost snage (snaga) DG na nekom trafo reonu. Tako npr. u Portugalu i Italiji ukupna instalisana snaga DG mora biti manja od 25%, odnosno 65%, respektivno, nazivne snage transformatora. Nasuprot njima, u Kanadi je pravilo da ukupna snaga DG bude manja od 50% vršnog opterećenja u tom trafo reonu. Poznavajući potrošnju energije u domaćinstvima u Crnoj Gori, sa aspekta distributivnog sistema, najpoželjniji scenario je da treba da dominiraju elektrane malih snaga (od 3kW do 5kW).

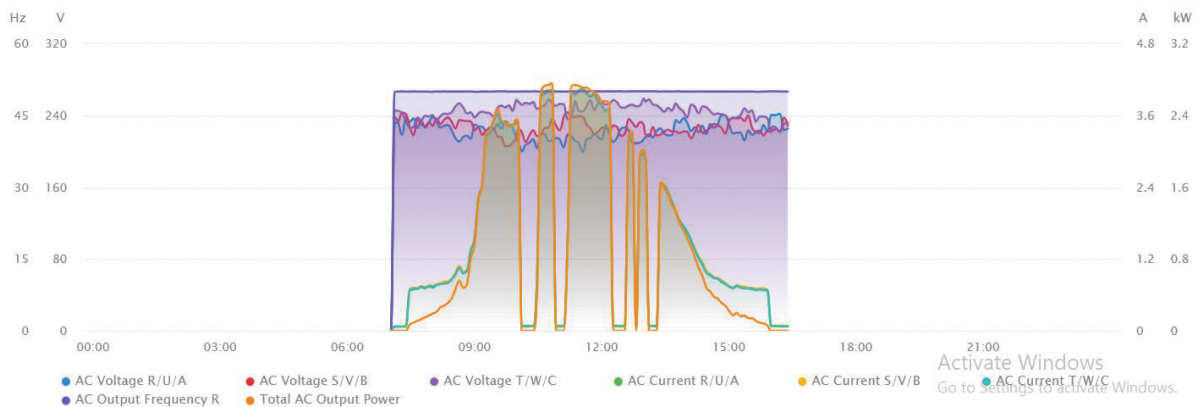
4. OSVRT NA PROBLEME KOD REZIDENCIJALNIH SE U CRNOJ GORI

Postojeće distributivne mreže su planirane nekoliko decenija unazad i nijesu bile predviđene za priključenje distribuiranih generatora. U većini evropskih zemalja, pa tako i kod nas, EES je obavezan preuzeti svu energiju proizvedenu iz solarnih elektrana. Shodno „*PRAVILIMA ZA FUNKCIONISANJE DISTRIBUTIVNOG SISTEMA ELEKTRIČNE ENERGIJE*“, operator distributivnog sistema uređuje:

„način priključenja objekata za proizvodnju energije na distributivni sistem koji uključuje nediskriminatorne procedure za priključenje na sistem za različite vrste proizvodnje“

„način davanja prioriteta u pristupu i preuzimanje električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora i visokoefikasne kogeneracije“.

Prije masovne ugradnje distribuiranih izvora električne energije, nizak napon je bio najčešći problem u distributivnoj mreži. Međutim, sa povećanom ugradnjom SE u distributivnoj mreži javlja se problem visokog napona. Dešava se da napon u kritičnim slučajevima doseže do 280V, što dovodi do isključenja pojedinih SE na tom trafo reonu. Na slici 8. prikazan je dnevni dijagram proizvodnje SE koja se, kao posljedica previsokog napona, povremeno isključuje sa mreže. Radi izbjegavanja učestalih isključenja usljed djelovanja podnaponske/prenaponske zaštite, poželjno je da invertori posjeduju automatski odziv na fluktuacije napona u tački priključenja. Međutim, ako su naponi u granicama dozvoljenih vrijednosti (a što se definiše na invertoru), SE bez prekida injektira energiju u energetske sistem (slika 9.)



Slika 8. Uticaj previsokog napona na rad SE

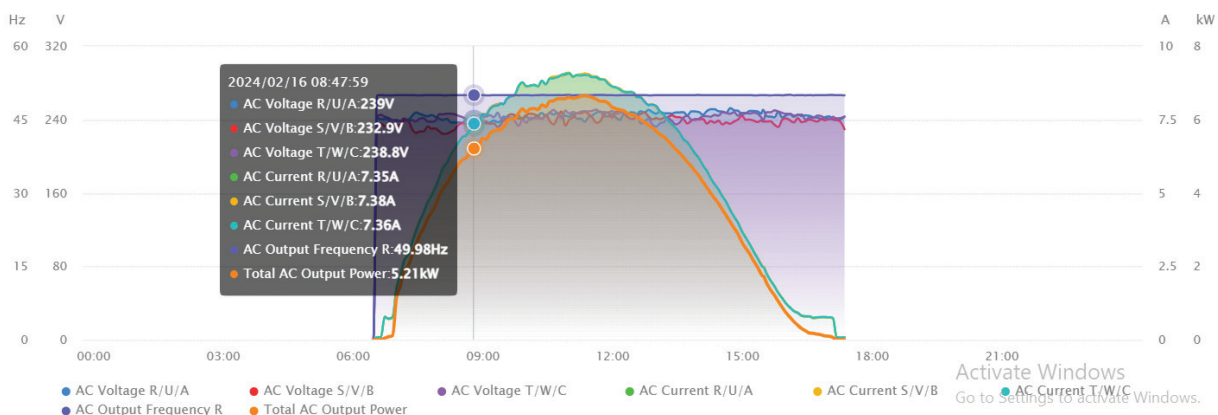
U literaturi se mogu naći dvije grupe metoda za suzbijanje visokih napona izazvanih priključenjem SE:

Metode koje se implementiraju na samoj SE

Primjena sistema za skladištenje energije (baterijski sistemi),
 Ograničavanje injektiranja aktivne snage, ili
 Kontrola reaktivne snage putem FN sistema tj. kontrolom invertora.

Metode koje se implementiraju na strani mreže

Poboljšanje mreže (rekonfiguracija),
 Promjena prenosnog odnosa regulacionog SN/NN transformatora,
 Upravljanje potrošačima (konzumom).



Slika 9. Rad SE bez isključenja sa mreže

Baterijski sistem skladištenja energije (BESS) je tehnološko rješenje koje omogućava skladištenje energije za kasniju upotrebu. S obzirom na mogućnost da snabdijevanje energijom može doživjeti fluktuacije zbog vremenskih prilika, nestanka struje ili iz drugih razloga, sistemi baterija su od vitalnog značaja za kontinuiran protok energije. Ovi sistemi imaju veliku ulogu u regulaciji vršnog opterećenja, "pomjeranja" opterećenja i fleksibilnosti sistema. Kako svi prethodno navedeni problem imaju povezanost sa regulacijom napona, više je nego jasan značaj ovih sistema u sprečavanju prevelikih napona u mreži.

Ograničavanje injektiranja aktivne snage i regulacija reaktivne snage su u direktnoj vezi sa kontrolom invertora. Invertori, uređaji koji povezuju DG sa mrežom, imaju mogućnost podešavanja faktora snage, pa samim tim imaju i mogućnost regulacije tj. ograničenja iznosa aktivne i reaktivne snage koja se injektira u mrežu. Regulacija iznosa reaktivne snage je u direktnoj vezi sa regulacijom napona, pa samim tim invertori mogu da igraju veliku ulogu u regulaciji naponskog profila nekog trafo reona. U Crnoj Gori je kod instaliranih solarnih sistema po defaultu podešena vrijednost

faktora snage na maksimum. Međutim, u Crnoj Gori se ne koriste u potpunosti sve mogućnosti kontrole invertora sa aspekta regulacije napona.

Regulacija napona promjenom položaja preklopke regulacionog transformatora (tzv. ručna regulacija) se najčešće koristi sezonski. Konzum u Crnoj Gori, na pojedinim djelovima teritorije, pokazuje zavisnost od godišnjeg doba, što znači da bi ovaj tip regulacije imao efekta. Najkritičnija situacija što se tiče porasta napona je u proljećnim mjesecima (april i maj) kada je najmanji konzum, a iradijansa Sunčevog zračenja visoka. Tada je potrebno da osoblje zaduženo za održavanje mreže izađe na teren i da na regulacionom transformatoru odradi određenu manipulaciju (u ovom slučaju to je spuštanje preklopke).

Rekonfiguracija mreže se može sprovesti na različite načine. U naučnim publikacijama se dominantno razmatra mogućnost „prespajanja“ prilikom napajanja pojedinih potrošača ili grupa potrošača u cilju poboljšavanja naponskog profila. Međutim, ovakve manipulacije podrazumijevaju da postoji izgrađena energetska infrastruktura (vodovi i prekidački elementi) što zahtijeva određena ulaganja u mrežu. Štaviše, prilikom manipulacija potrebno je određeni vremenski period imati vodove u beznaponskom stanju.

Na kraju, po pitanju regulacije napona u distributivnim mrežama u naučnim publikacijama se sve više istražuje i primjena fleksibilnih sistema naizmjenične struje (*Flexible alternating current transmission system* - FACTS), zvanih D-FACTS [13]. To su uređaji koji se ugrađuju ili zajedno sa DG u priključnom mjestu, ili nezavisno u nekom od čvorova (ako se radi o paralelnom D-FACTS) ili redno u nekom vodu (ako se radi o serijskom D-FACTS). Inače, njihov princip rada se bazira na apsorbovanju ili injektiranju reaktivne snage prateći talasni oblik napona, ili struje, u mreži.

5. ZAKLJUČAK

Integracija obnovljivih izvora energije u distributivni sistem predstavlja jedan izuzetno izazovan kako naučni tako i inženjerski problem. Integraciju DG treba sprovoditi planski i na bazi analiza, jer u suprotnom moguće je postići i negativne efekte, kako po pitanju povećanja gubitaka i pogoršanja naponskog profila, tako i po pitanju tokova snaga.

Ako se govori o kućnim solarnim sistemima, njihova snaga treba da bude tako definisana da se ovim proizvodnim objektima dominantno snabdijeva potrošnja u domaćinstvu. Na taj način se rasterećuju distributivni vodovi, smanjuju gubici u prenosu energije i povećava efikasnost sistema. Instalacija većih sistema mora da se sprovede na bazi analiza uz odabir optimalne lokacije i veličine. U slučaju, pogoršanja naponskog profila u mreži potrebno je razmotriti koje od potencijalnih rješenja je neophodno primijeniti sa aspekta brzine instalacije, cijene, ali i svih planova razvoja distributivnog sistema. Imajući u vidu da savremene distributivne mreže sadrže veliki broj invertora, potrebno je sagledati mogućnost upotrebe invertora u regulaciji distributivnih sistema.

LITERATURA

1. I. Yahyaoui, *Advances in renewable energies and power technologies*, Elsevier Science, 2018.
2. R. K. Chauhan, K. Chauhan, *Distributed energy resources in microgrids*, Academic Press, 2019.
3. H. S. Avchat, S. Mhetre, "Optimal placement of distributed generation in distribution networks using particle swarm optimization", *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 2020.
4. R. H. Siregar, Y. Away, Tarmizi, Akhyar, "Minimizing power losses for distributed generation (DG) placements by considering voltage profiles on distribution lines for different loads using genetic algorithms methods", *Energies*, vol. 16, no. 14, p. 5388, 2023.
5. A. S. Hassan, Y. Sun, Z. Wang, "Multiobjective for optimal placement and sizing DG units in

- reducing loss of power and enhancing voltage profile using BPSO-SLFA”, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1581-1589, 2020.
6. Z. Ullah, S. Wang, J. Radosavljević, “Novel method based on PPSO for optimal placement and sizing of distributed generation”, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 12, pp. 1754-1763, 2019.
 7. S. Angalaeswari, P. Sanjeevikumar, K. Jamuna, Z. Leonowicz, “Hybrid PIPSO-SQP algorithm for real power loss minimization in radial distribution systems with optimal placement of distributed generation”, *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5787, 2020.
 8. M. Q. Duong, T. D. Pham, T. T. Nguyen, A. T. Doan, H. V. Tran, “Determination of optimal location and sizing of solar photovoltaic distribution generation units in radial distribution systems”, *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 174, 2019.
 9. Y. Yang, K. A. Kim, F. Blaabjerg, A. Sangwongwanich, *Advance in grid-connected photovoltaic power conversion systems*, Woodhead Publishing, 2019.
 10. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy> - International Renewable Energy Agency
 11. F. Sahli, J. Werner, B.A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-Salomon, et al. “Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with 25.2% power conversion efficiency, “ *NatMater*, 2018; vol. 17, pp. 820–6, doi:<https://doi.org/10.1038/s41563-018-0115-4>.
 12. M. Čalasan, T. Konjić, K. Kecojević, L. Nikitović, “Optimal allocation of static var compensators in electric power systems”, *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3219, 2020.
 13. M. Zellagui, A. Lasmari, S. Settoul, R. A. El-Sehiemy, C. Z. El-Bayeh, R. Chenni, “Simultaneous allocation of photovoltaic DG and DSTATCOM for techno-economic and environmental benefits in electrical distribution systems at different loading conditions using novel hybrid optimization algorithms”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 8, 2021.

REALIZACIJA SOLARNE ELEKTRANE INSTALISANE SNAGE 5 MW U CRNOJ GORI

Natalija Radonjić

PermonTE d.o.o. Podgorica

KRATAK SADRŽAJ

Kapacitet solarnih elektrana koji je do sada pušten u rad u Crnoj Gori je manji od 10% ukupno realizovanih elektrana iz obnovljivih izvora energije (vjetroelektrane 118 MW i male hidroelektrane cca 45 MW). Stvaranje uslova za razvoj i funkcionalnost održivog tržišta solarnih elektrana je od velikog značaja za ekonomiju i očuvanje životne sredine u Crnoj Gori. Veoma je bitno da se prepozna potencijal a još važnije da se isti iskoristi. Bogatstvo države se ogleda upravo u iskorišćenju svojih prirodnih potencijala bilo koje vrste. A imajući u vidu ciljeve na koje se Crna Gora obavezala, budući razvoj energetskeg sektora Crne Gore treba da bude usmjeren na povećanje korišćenja obnovljivih izvora energije i prelazak na održivija rješenja koja doprinose smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Tema ovog rada biće pregled koraka da se pripreme i realizuju projekti solarnih elektrana na zemlji reda veličine od 5 MW kao i da se sunčeva energija dovede do elektro mreže u vidu električne energije. Rad će se bazirati na konkretnom primjeru solarne elektrane koja se gradi u okolini Podgorice, a čiji je kapacitet 6.17 MWp na DC strani odnosno 5 MW na AC strani.

Ključne riječi: Solarna elektrana, Izgradnja objekta

1. ZAKONSKI OKVIR – RELEVANTNI ZAKONSKI, PODZAKONSKI AKTI, OPŠTINSKE ODLUKE KOJIMA SE REGULIŠE REALIZACIJA SOLARNIH ELEKTRANA REDA VELIČINE 5 MW

Nakon usvajanja izmjena Zakona o planiranju prostora i izgradnji objekata („Službeni list CG“, broj 064/17, 044/18, 063/18, 011/19, 082/20) u avgustu 2020. godine članom 223 koji se odnosi na Primjenu propisa za lokalne objekte od opšteg interesa definisano, je između ostalog: Propisi jedinice lokalne samouprave, kojima se uređuju lokalni objekti od opšteg interesa primjenjivaće

se do donošenja plana generalne regulacije Crne Gore u dijelu koji se odnosi na solarne elektrane od 5 MW i manje.

Tadašnje Ministarstvo održivog razvoja i turizma koje je usvojilo Zakon o planiranju prostora i izgradnji objekata („Službeni list CG“, broj 064/17, 044/18, 063/18, 011/19, 082/20), prepustilo je lokalnim samoupravama da donesu Odluku o postavljanju, građenju i uklanjanju lokalnih objekata od opšteg interesa i to u roku od 90 dana od dana stupanja na snagu pomenutog Zakona.

Odluke se temelje i na osnovu člana 38 stav 1 tačka 2 Zakona o lokalnoj samoupravi („Službeni list CG“, br. 2/18, 34/19 i 38/20) i članova Statuta svake opštine.

Naime, ova vrsta solarnih elektrana u skladu sa navedenim Zakonom, članom 172 predstavljaju složene inženjerske objekte. U skladu sa tim, dio aktera koji učestvuju u realizaciji navedenih elektrana moraju ispunjavati uslove u skladu sa članovima 192 i 193 pomenutog Zakona i to: privredno društvo koje izrađuje tehničku dokumentaciju (u daljem tekstu: Projektant), privredno društvo koje vrši reviziju tehničke dokumentacije (u daljem tekstu: Revident), privredno društvo koje gradi objekat (u daljem tekstu: Izvođač radova), privredno društvo koje obavlja poslove stručnog nadzora nad građenjem objekta (u daljem tekstu: Stručni nadzor), privredno društvo koje obavlja poslove tehničkog prijema za izgrađeni objekat (u daljem tekstu: Tehnički prijem), moraju imati Rješenja od organa državne uprave nadležanog za djelatnost koja se obavlja u složenom inženjerskom objektu.

Akteri koji učestvuju u realizaciji navedenih elektrana su:

- Investitor (fizičko lice ili privredno društvo),
- privredno društvo koje izrađuje geodetske podloge,
- privredno društvo koje izrađuje tehničku dokumentaciju (Projektant),
- lokalna samouprava (opština) na čijem će se području nalaziti solarna elektrana (u daljem tekstu: Lokalna samouprava),
- Crnogorski elektrodistributivni sistem d.o.o. Podgorica (u daljem tekstu: CEDIS),
- privredno društvo koje vrši reviziju tehničke dokumentacije (Revident),
- privredno društvo koje gradi objekat (Izvođač radova),
- privredno društvo koje obavlja poslove stručnog nadzora nad građenjem objekta (Stručni nadzor),
- privredno društvo koje obavlja poslove tehničkog prijema za izgrađeni objekata (Tehnički prijem),
- Regulatorna agencija za energetiku,
- Tržište električne energije.

2. ODABIR LOKACIJE ZA IZGRADNJU SOLARNE ELEKTRANE REDA VELIČINE 5 MW

Na odabir lokacije utiče više parametara. Neki od značajnijih navedeni su u nastavku:

- Raspoloživost zemljišta – zemljište ne bi trebalo pripadati kategoriji od I do IV dok je neophodna površina za 1 MWp minimum 1.2 ha;
- Povoljna orijentacija lokacije – sjeverna orijentacija uglavnom nije iskoristiva jer bi okretanje solarnih panela ka južnoj strani svijeta dovelo investiciju do finansijske neisplativosti;
- Blizina distributivne mreže – udaljen priključak na distributivnu mrežu uglavnom dovodi investiciju do finansijske neisplativosti;
- Raspoloživost distributivne mreže – mogućnost distributivne mreže u blizini lokacije solarne elektrane da primi instalisanu snagu elektrane;
- Količina sunčeve iradijacije na lokaciji.

U Crnoj Gori je veoma malo lokacija koje ispunjavaju navedene uslove, dok snagu solarne elektrane reda veličine od 5 MW uglavnom može da primi elektrodistributivna mreža 35 kV naponskog nivoa i više.

3. RAZVOJ PROJEKTA - SOLARNA ELEKTRANA SNAGE 5 MW

Početak razvoja projekta solarne elektrane snage 5 MW je prije svega prepoznavanje lokacije gdje su primjenjuje minimum parametara koji su navedeni u prethodnom poglavlju. Sljedeći koraci su:

- Izrada analize o mogućnostima izgradnje na prepoznatoj lokaciji i podnošenje zahtjeva prema CEDIS-u za Izradu analize o mogućnostima priključenja na elektrodistributivnu mrežu;
- CEDIS izrađuje analizu u čijem zaključku definiše da li postoji raspoloživost elektrodistributivne mreže u okolini prepoznate lokacije;
- Ukoliko je zaključak analize koju je izradio CEDIS pozitivan (postoji raspoloživost mreže da se primi željena snaga), investitor rješava imovinsko-pravne odnose i podnosi zahtjev za Odluku o lokaciji građenja lokalnog objekta od opšteg interesa – solarne elektrane prema Lokalnoj samoupravi;
- Lokalna samouprava izdaje Odluku o određivanju lokacije sa elementima urbanističko-tehničkih uslova za izgradnju lokalnog objekta od opšteg interesa – solarne elektrane čiji su sastavni dio Uslovi za izradu tehničke dokumentacije koje izdaje CEDIS i tehnički uslovi ostalih relevantnih institucija (Ministartsva poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede, saobraćajni uslovi, itd.).

Na slici 1 prikazana je lokacija za izgradnju predmetne solarne elektrane od 5 MW (6.17 MWp) na teritoriji Glavnog grada Podgorice koju je prepoznao multidisciplinarni tim inženjera.



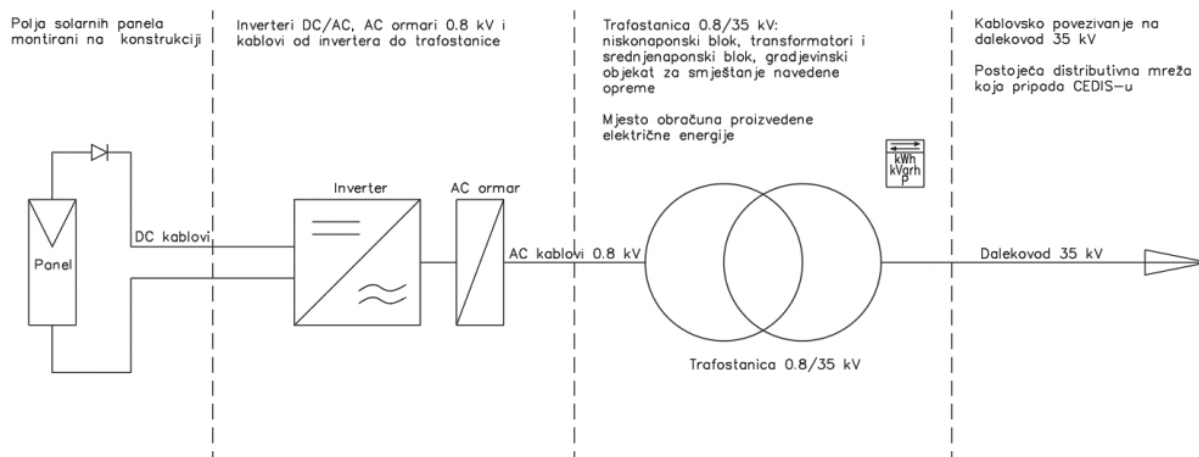
Slika 1: Zahvat koji je prepoznat za izgradnju solarne elektrane

Kao što je ranije navedeno, solarne elektrane reda veličine 5 MW spadaju u grupu složenih inženjerskih objekata. Ovakvi objekti se sastoje od sljedećih cjelina (prikazano na slici 2):

- Solarni dio koji se sastoji od konstrukcije za potrebe postavljanja solarnih panela, uzemljena i gromobranske zaštite, solarnih panela, DC kablova, invertera, AC ormara, AC kablova, internet komunikacije, video nadzora, unutrašnja saobraćajnica i priključak na lokalnu saobraćajnicu;
- Proizvodna trafostanica – ovaj dio sastoji se od građevinskog dijela objekta, niskonapon-

skog bloka, AC kablova niskog napona, energetskih transformatora i transformatora sopstvene potrošnje, AC kablova srednjeg napona, sredjenaponskog bloka, sopstvene potrošnje trafostanice, opšte potrošnje trafostanice, internet komunikacije, video nadzora;

- Priključak na elektrodistributivnu mrežu – kablovski ili vazdušni priključak po principu ulaza/izlaza na postojeću kablovsku ili vazdušnu mrežu ili po principu priključka u postojeću distributivnu trafostanicu.



Slika 2. Djelovi predmetne elektrane

Nakon pribavljanja Odluke o određivanju lokacije sa elementima urbanističko-tehničkih uslova za izgradnju lokalnog objekta od opšteg interesa – solarne elektrane, ulazi se u proceduru izrade tehničke dokumentacije.

Tehnička dokumentacija podrazumijeva:

- Izradu podloga kao što su geodetska podloga, geomehanička istraživanja, katastarski planovi parcela;
- Izradu Elaborata procjene uticaja na životnu sredinu;
- Izradu Glavnog projekta koji se sastoji od elektroenergetskog projekta solarnog dijela, trafostanice i priključka na distributivnu mrežu, građevinskog projekta konstrukcije solarnih panela i građevinskog dijela trafostance, arhitektonskog projekta trafostanice, mašinskog projekta trafostanice, hidrotehničkog projekta trafostanice, projekta unutrašnjih saobraćajnica, saobraćajne signalizacije i pristupne saobraćajnice, projekta zaštite od požara;
- Izradu elaborata funkcionalnih ispitivanja i probnog rada, elaborata zaštite na radu;
- Tehničku reviziju prethodno nabrojane dokumentacije;
- Pribavljanje saglasnosti na Glavni projekat odnosno rješenja nadležnih insitucija (saglasnost CEDIS-a, Ministarstva unutrašnjih poslova, Ministarstva kulture, šumska/poljoprivredna saglasnost, saobraćajna saglasnost, ekološka saglasnost, itd.).

Važno je napomenuti da projekti ovog reda veličine uglavnom podliježu Procjenama uticaja na životnu sredinu. Elaborat procjene uticaja na životnu sredinu, između ostalog, opisuje uticaj solarnih elektrana na kvalitet vazduha, kvalitet vode, zemljište, lokalno stanovništvo, vizuelni uticaj, uticaj na ekosistem i geologiju odabranog područja. Elaboratom se definiše Program praćenja uticaja na životnu sredinu prilikom izgradnje objekta i prilikom eksploatacije objekta.

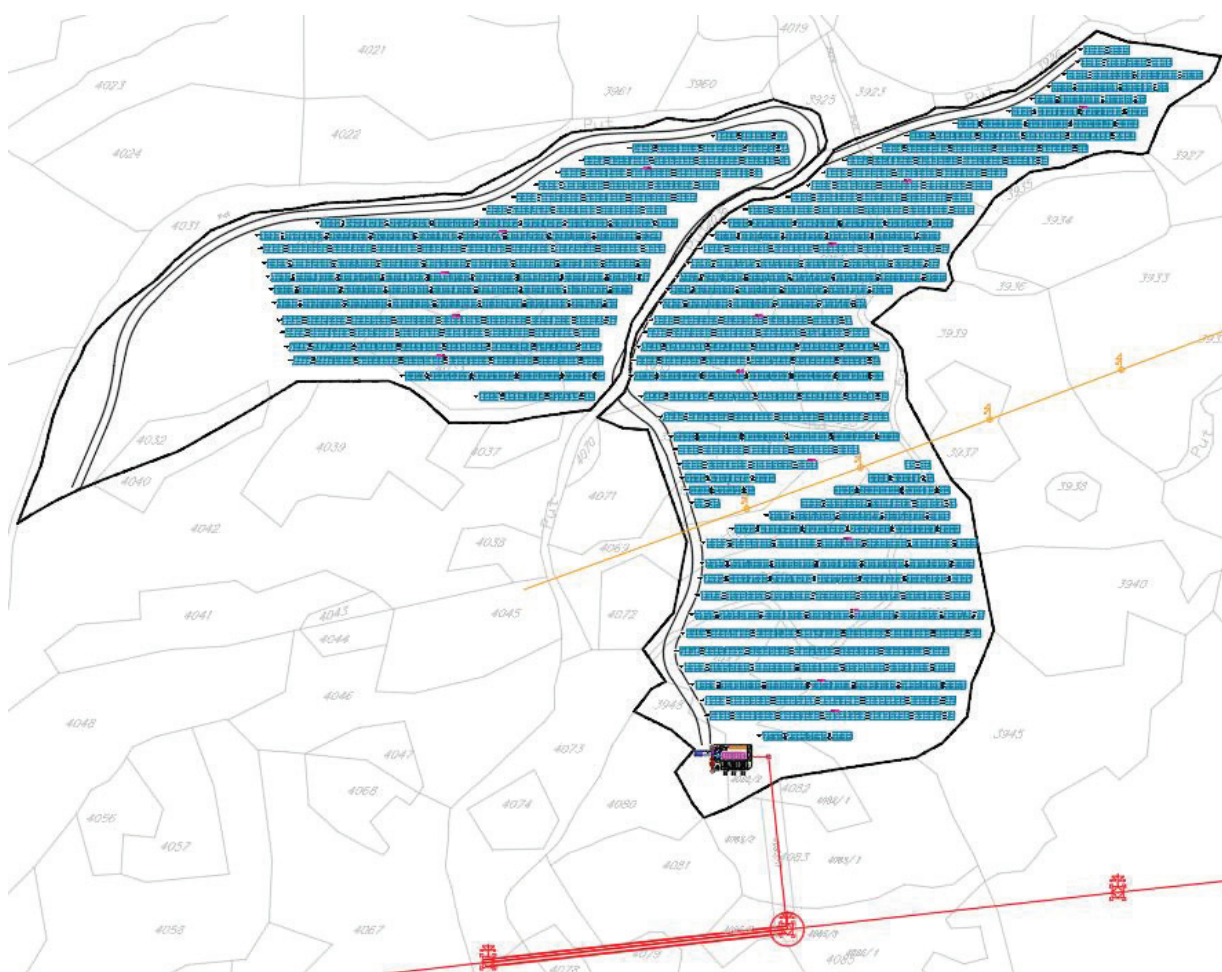
Sa Izvještajem revizije i Glavnim projektom, Investitor aplicira za Odobrenje za građenje lokalnog objekta od opšteg interesa – solarne elektrane kod Lokalne samouprave.

Iz dosadašnjih iskustava, period trajanja procedure od prepoznavanja lokacije do pribavljanja Odobrenja za građenje lokalnog objekta od opšteg interesa – solarne elektrane je oko godinu dana.

Najveći izazovi sa kojima sam se kao projektant susretala u ovom procesu bili su suočavanje Lokalne samouprave za objektima ovog tipa, rješavanje prava službenosti za postavljanje kablovskog ili vazdušnog priključka na državnoj ili opštinskoj zemlji, rješavanje prava službenosti za postavl-

janje kablovskog ili vazdušnog priključka preko rijeke ili potoka, pribavljanje ekološke saglasnosti, neusaglašenost katastarskih podataka sa javno dostupnim sajtovima (Uprava za nekretnine, geoportal), mnogo duži period izjašnjavanja institucija za izdavanje uslova ili saglasnosti od onog koji je predviđen zakonskom regulativom.

Na slici 3 prikazan je grafički prikaz solarne elektrane sa dispozicijom opreme, sa preklpom na katastarski plan za odabrano područje. Dispozicija opreme rađena je nakon snimljene geodetske podloge. Odabir ugla postavljanja solarnih panela je veoma kompleksna tema, za predmetnu elektranu odabran je ugao od 25° ka jugu, pri azimutu od 0° , sa odabirom dana u godini bez međuredne sjenke na 15. april i 15. oktobar. Dani u godini bez međuredne sjenke su usvojeni na osnovu tehno-ekonomske analize gdje su granični parametri bili raspoloživa površina parcela, gubici na zasjenčenju i godišnja proizvodnja električne energije iz solarne elektrane.



Slika 3. Grafički prikaz solarne elektrane – izvod iz Glavnog projekta

4. IZGRADNJA OBJEKTA - SOLARNA ELEKTRANA SNAGE 5 MW

Početak izgradnje objekta solarne elektrane nastaje nakon pribavljanja Odobrenja za građenje lokalnog objekta od opšteg interesa nakon čega je potrebno prijaviti građenje.

Prvi izazovi sa kojima se susreću Investitor i Izvođač radova je samo uređenje terena za potrebe postavljanja konstrukcija na kojima se monriraju solarni paneli. U konkretnom slučaju, kompletan zahvat je kategorije zemljišta veće od IV i predstavlja vezane, dobro okamenjene krute stijen-

ske mase i slabo okamenjene krute stijenske mase. Period pripreme terena trajao je više od četiri mjeseca, a u finansijskom dijelu iznosio je preko 8% od vrijednosti investicije.

Pripremni radovi su podrazumijevali: geodetsko obilježavanje lokacije, krčenje šiblja, drveća i ostalog rastinja i odvoz na gradsku deponiju, postavljanje gradilišne table, kancelarijskih prostorija i prostorije za stražare, nivelisanje terena za postavljanje konstrukcije i trafostanice, kao i rasčišćavanje terena za trasu kablovskog voda do tačke priključenja na postojeći vazdušni dalekovod.

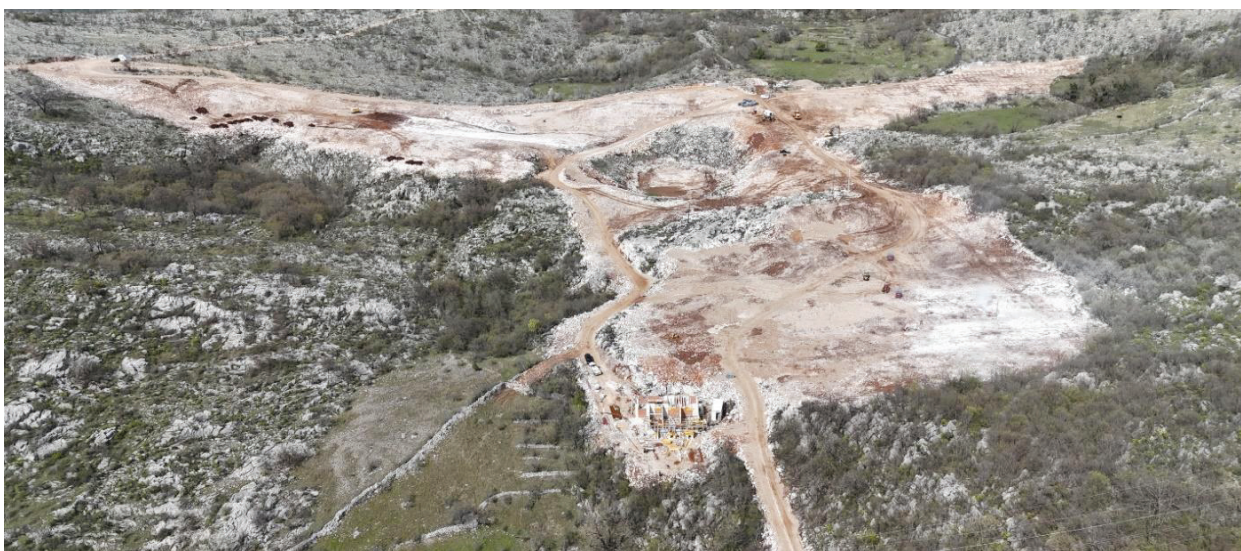
Izazovi sa institucijama se ogledaju u tome što se Investitoru rijetko kad dostavlja zapisnik nadležne inspeksijske službe nakon uredno predate Prijave građenja objekta.

Na slici 4 prikazan je zahvat solarne elektrane nakon završenih pripremnih radova.



Slika 4: Zahvat solarne elektrane nakon završenih pripremnih radova

Nakon završenih pripremnih radova otpočinje se sa bušenjem rupa za potrebe postavljanja čelične konstrukcije na kojoj se montiraju solarni paneli. Na ovom objektu odabrana je čelična konstrukcija, čije jedno polje nosi 24 solarna panela (2 panela vertikalno i 12 panela horizontalno). Ovakav tip konstrukcije jednog solarnog polja zahtijeva čak 14 vertikalnih konstruktivnih elemenata presjeka $\varnothing 60$ do $\varnothing 200$ koje treba ukopati u zemlju na dubinu od 1.6m do 2.0m i zaliti betonom do površine tla. Za potrebe čelične konstrukcije na lokaciji je izbušeno 5.460 rupa. Na slici 5 prikazan je zahvat solarne elektrane nakon izbušenih rupa za potrebe postavljanja čelične konstrukcije.



Slika 5: Zahvat solarne elektrane nakon izbušenih rupa za potrebe postavljanja čelične konstrukcije

Kako se radi o složenom inženjerskom objektu koji je u skladu sa zakonskom regulativom obavezno štiti objekat, oko cijelog objekta je postavljena ograda. Za potrebe postavljanja ograde izbušeno je još oko 1.000 rupa.

Izazovi sa kojima se u ovom koraku susreo Investitor i Izvođač radova je što u Crnoj Gori ima veoma malo građevinskih mašina – lafetnih bušilica koje imaju opremu i mogućnost bušenja navedenih rupa. Drugi izazov koji se pojavio u ovom periodu izvođenja radova je što lafetne bušilice kojima se buše rupe ne mogu raditi na terenu čiji je nagib preko 15% (dolazi do prevrtanja mašina). Na nagibima terena većim od 15% koji su južne orijentacije i koji su idealni za postavljanje solarnih panela morala su se raditi dodatna uređenja terena, u vidu staza kako bi se radovi mogli izvoditi. Ostali izazovi su se pojavili u dinamici izvođenja radova i to na djelovima gdje su se izbušile rupe - više nije bilo moguće izvoditi ostale građevinske radove mašinama ispod kote terena 0+. Radovi su se mogli izvoditi samo ručno, jer bi došlo do zatrpavanja rupa u periodu dok se iste ne popune betonom i u njih postave čelični konstruktivni elementi. Radovi ispod kote terena 0+ su uzemljenje objekta, kablovski kanali, podzemni kablovi i kablovska kanalizacija.

Pored prethodo navedenih radova, uporedo se radilo na izgradnji objekta trafostanice i na dijelu priključenja na distributivnu mrežu. Trafostanica je naponskog nivoa 0.8/35 kV, ukupne snage transformatora 5 MVA, dok je priključenje izvedeno 35 kV kablovima na dalekovod po principu ulaz / izlaz.

Na slici 6 prikazan je zahvat solarne elektrane nakon postavljanja čelične konstrukcije, postavljenih djelova solarnih panela i izgrađenih grubih građevinskih radova proizvodne trafostanice. Ova faza projekta trajala je četiri mjeseca.



Slika 6: Zahvat solarne elektrane nakon postavljanja čelične konstrukcije, postavljenih djelova solarnih panela i izgrađenih grubih građevinskih radova proizvodne trafostanice

Dalekovodni stub u trasi postojećeg dvosistemskog 35 kV dalekovoda na koji se trebalo izvršiti priključenje solarne elektrane na elektrodistributivnu mrežu je bio noseći stub. Ovaj stub se morao zamijeniti ugaono-zateznim stubom kako bi podnio i podizanje šest žila kabla (tri žile za ulaz i tri žile za izlaz). Radovi su rađeni iz četiri iteracije i to:

- Iskop temelja novog stuba, ugaono-zateznog stuba, centriranje i postavljanje ankera, podizanje čelične konstrukcije novog stuba – prvi segment tijela pored postojećeg nosećeg stuba;
- Prva beznaponska pauza u trajanju od dva dana za meku demontažu postojećeg nosećeg stuba sa sortiranjem konstrukcije, demontaža provodnika i ovesne opreme, montaža preostala dva segmenta tijela novog stuba, konektovanje novih veza i stavljanje dalekovoda u naponsko stanje;



Slika 8: Zahvat solarne elektrane nakon ugrađenog većeg dijela solarnih panela, izgrađene trafostanice i sa zamijenjenim stubom u tački priključenja

Elektro dio elektrane se, između ostalog, sastoji od ukupno:
 9.288 solarnih panela jedinične snage 665 Wp,
 16 invertera jedinične snage 300 kVA izlaznog napona 0.8 kV i jednog invertera snage 200 kVA izlaznog napona 0.8 kV,
 17 AC ormara koji su postavljeni neposredno pored invertera,
 kablovskih trasa u kojima je postavljeno 68 jednožilnih 0.8 kV kablova, 51km DC kablova, 4.5km ethernet kablova za komunikaciju između invertera i trafostanice i za kamere.
 Na slici 9 prikazan je zahvat solarne elektrane ukupne instalisane snage 6.17 MWp odnosno 5 MW na AC strani sa završenim radovima. Posljednja faza radova trajala je četiri mjeseca, što je u konačnom godinu dana od Prijave građenja objekta.



Slika 9: Solarna elektrana ukupne instalisane snage 6.17 MWp odnosno 5 MW na AC strani sa završenim radovima

U tabeli 1 prikazan je pregled troškova izgradnje solarne elektrane instalisane snage 6.17 MWp odnosno 5 MW na AC strani. Navedenim cijenama nijesu obuhvaćeni troškovi: kupovine/zakupa zemljišta, izrade Glavnog projekta sa neophodnim podlogama, Revizije tehničke dokumentacije, Nadzora nad izvođenjem radova, Tehničkog prijema objekta, takse koje je bilo potrebno platiti prema nadležnim institucijama (jedna od njih je taksa za priključenje na elektrodistributivni sistem).

Tabela 1: Zbirna rekapitulacija troškova izgradnje solarne elektrane instalisane snage 6.17 MWp odnosno 5 MW na AC strani

R.Br.	Pozicija	Cijena
1	Pripremni radovi	
1.1	Geodetsko obilježavanje, krčenje rastinja i odvoz na gradsku deponiju. Postavljanje gradilišne table, kancelarijskih prostorija i prostorije za stražare. Priprema terena za postavljanje konstrukcije. Iskop rupa za temelje ograde u zemljištu VI i VII kategorije. Mašinsko bušenje rupa za fundiranje nosača konstrukcije.	750,985.00 €
2	Solarni sistem	
2.1	Konstrukcija betoniranje temelja za stubove nosača za panele. Šalovanje i betoniranje temelja za stubove ograde. Nabavka, transport i ugradnja čelične konstrukcije za panele.	830,243.09 €
2.2	Elektro instalacije jake struje nabavka solarnih panela.	1,077,158.90 €
2.3	Elektro instalacije jake struje ugradnja solarnih panela. Isporuka i ugradnja invertera, ac ormara, dc kablova, povezivanje stringova, ac kablova, ispitivanje kablovskih veza, parametrisanje invertera, uzemljenja, gromobranske instalacije, pnk regala.	1,165,161.24 €
2.4	Elektro instalacije slabe struje isporuka i ugradnja sks instalacija, sistema video nadzora.	32,692.80 €
3	Trafostanica	
3.1	Arhitektura i konstrukcija betonski radovi, armirački radovi, zidarski radovi, izolaterski radovi, bravarski radovi, limarski radovi, suvo montažni radovi, poopolastički radovi, fasaderski radovi, krovopokrivački radovi, molersko-farbarski radovi, kataloški namještaj.	162,506.13 €
3.2	Elektroinstalacije jake struje isporuka i ugradnja opšte potrošnje objekta - rasvjeta, priključnice, uzemljenje objekta, gromobranska zaštita.	16,329.50 €
3.3	Elektromontažni radovi isporuka i ugradnja srednjenaponskog 35 kv rasklopnog postrojenja, 2 energetska transformatora, sopsstvene potrošnje 0.4 kv i kućnog transformatora, komandno signalni kablovi, 0.8 kv niskonaponski blok.	638,460.00 €
3.4	Elektro instalacije slabe struje isporuka i ugradnja sks instalacija, sistema video nadzora, sistem za detekciju i dojavu požara.	8,038.80 €
3.5	Hidrotehničke instalacije radovi na spoljašnjem vodovodu, unutrašnjem vodovodu, isporuka i ugradnja sanitarnih elemenata, fekalne kanalizacije.	8,253.17 €
3.6	Termotehnika instalacija i ugradnja multi split sistema, ventilacija toaleta.	4,022.50 €
4	Priključenje solarne elektrane	
4.1	Dalekovod isporuka i ugradnja ugaono zateznog stuba, ovjesne opreme, provodnog užeta, zaštitnog užeta. Isporuka i ugradnja 35 kv kablova.	105,068.00 €

5	Saobraćaj	
5.1	Saobraćaj izrada donjeg nosećeg sloja, bitumeniziranog nosećeg sloja, izrada betonskih ivičnjaka, izrada ab kanala za odvodnju, obrada pod tla, mašinsko uređenje posteljice.	266,138.91 €
5.2	Saobraćajna signalizacija ugradnja vertikalne signalizacije, izrada horizontalne signalizacije	1,035.20 €
6	Zaštita od požara	
6.1	Zaštita od požara	2,587.00 €
	Rekapitulacija	5,068,680.24 €

U tabeli 2 prikazana je procijenjena proizvodnja električne energije iz solarne elektrane instalisane 6.17 MWp, obrađena je u programskom paketu PV*Syst 7.2.19 na mjesečnom nivou.

Tabela 2: Procijenjena proizvodnja električne energije iz solarne elektrane na mjesečnom nivou

Mjesec	Em (MWh)	Mjesec	Em (MWh)
Januar	339.078	Jul	1034.455
Februar	418.347	Avgust	971.450
Mart	692.917	Septembar	720.114
April	795.419	Oktobar	574.561
Maj	942.066	Novembar	339.078
Jun	1022.565	Decembar	277.303

5. ZAKLJUČAK

Vrijeme trajanja razvoja i realizacije projekta solarne elektrane instalisane snage 6.17 MWp odnosno 5 MW na AC strani je, iz iskustva koje posjedujem, minimum dvije godine. Za ovaj period rada na projektu bilo je potrebno sarađivati sa cijelim timovima inženjera i institucijama na različitim nivoima (ministarstva, distribucija, lokalna samouprava). Rezultat ovakvog projekta je očekivana električna energija dobijena iz sunčeve energije u količini od 8.09 GWh / godišnje. Očekuje se ušteda emisije CO₂ na godišnjem nivou od 5561.65 tona. Projekat elektrane je rađen i u grafičkom (PV case) i numeričkom (PV syst) modelu. Rezultat ovakvog načina projektovanja su mala odstupanja između isprojektovanog i realizovanog grafičkog prikaza solarne elektrane. Ukupna ulaganja da bi se izgradio objekat ovog tipa i reda veličine su oko 5.5 miliona eura (kupovina zemlje, razvoj projekta, izgradnja objekta). Uticaj na životnu sredinu je neminovan ali su sprovedene sve mjere kako bi za ovaj tip objekata bio minimalan.

Međutim, sve opisano u ovom radu predstavlja jednu cjelinu odnosno prvu fazu. Druga faza je nadogradnja solarne elektrane ugradnjom baterija za skladištenje električne energije, prodaja električne energije krajnjem kupcu ili na berzi električne energije i održavanje solarne elektrane. Iskustva u drugoj fazi na teritoriji Crne Gore su veoma mala, a nadam se da ću o njima moći da pišem za sljedeće Dane elektro inženjera.

LITERATURA

1. Zakon o planiranju prostora i izgradnji objekata („Službeni list CG“, broj 064/17, 044/18, 063/18, 011/19, 082/20, 086/22)
2. Realizovani projekti kompanije Permonte d.o.o. u periodu od 2018. do 2024. godine u oblasti solarnih elektrana reda veličine od 1 MW do 5 MW u Crnoj Gori

ENERGETSKA REKONSTRUKCIJA VISOKOTEMPERATURNOG SUSTAVA CENTRALNOG GRIJANJA OBITELJSKE KUĆE ILI VIŠESTAMBENE ZGRADE

Emil Prpić

Ured ovlaštenog inženjera elektrotehnike Viškovo, Republika Hrvatska

KRATAK SADRŽAJ

Sustavi centralnog grijanja bazirani na dizalici topline imaju polaznu temperaturu vode u rasponu od približno 30 do 50°C te su pogodni za objekte koji se griju površinskim sustavima (npr. podnim grijanjem) ili ventilatorskim konvektorima (eng. fancoil). Klasični sustavi centralnog grijanja bazirani su na kotlovnici, imaju polaznu temperaturu u rasponu od 60 do 85°C i koriste visokotemperaturne radijatore koji se, u smislu efekta grijanja tek aktiviraju na temperaturama preko 60°C te ih nije moguće koristiti uz dizalice topline. U takvim objektima prijelaz na dizalicu topline nije rentabilan zbog niske temperature vode i potrebe zamjene cijele mreže radijatora i pripadajućih cjevovoda. Ovaj rad opisuje tehnički koncept jednostavne i budžetno prihvatljive rekonstrukcije visokotemperaturnog sustava centralnog grijanja baziranog na loživom ulju ili plinu u sustav s fotonaponskom elektranom, spremnikom topline i otpornim električnim grijačima. Ovakav je zahvat ujedno i jedan od najefektivnijih načina izravnog korištenja vlastite fotonaponske električne energije.

Ključne riječi: Fotonaponska elektrana, Centralno grijanje, Kućanstvo, Akumulacija energije

1. UVOD

S porastom broja fotonaponskih elektrana za vlastitu potrošnju, osobito na obiteljskim kućama i manjim višestambenim građevinama, raste potreba za fleksibilnom tzv. upravljanom potrošnjom¹ kako bi se lakše održavalo distribucijsku mrežu stabilnom. Čak i ako operator distribucijskog sustava ne nudi tarifni model i tehničko rješenje upravljane potrošnje, tarife i cijene otkupa viškova energije za kupce s vlastitom proizvodnjom u pravilu su takve da je uvijek znatno isplativije energiju proizvedenu na svom krovu utrošiti sam, nego je predati kao višak u mrežu. U tom smislu, korisno je imati vlastitu upravljanu potrošnju, a najdirektniji primjer toga je neki oblik akumulacije energije. Očito rješenje je baterijski sustav. To je tema kojoj je posvećeno dosta pažnje u posljednje vrijeme pa ćemo se ovdje posvetiti jednom manje popularnom, ali znatno pristupačnijom i brže isplativom.

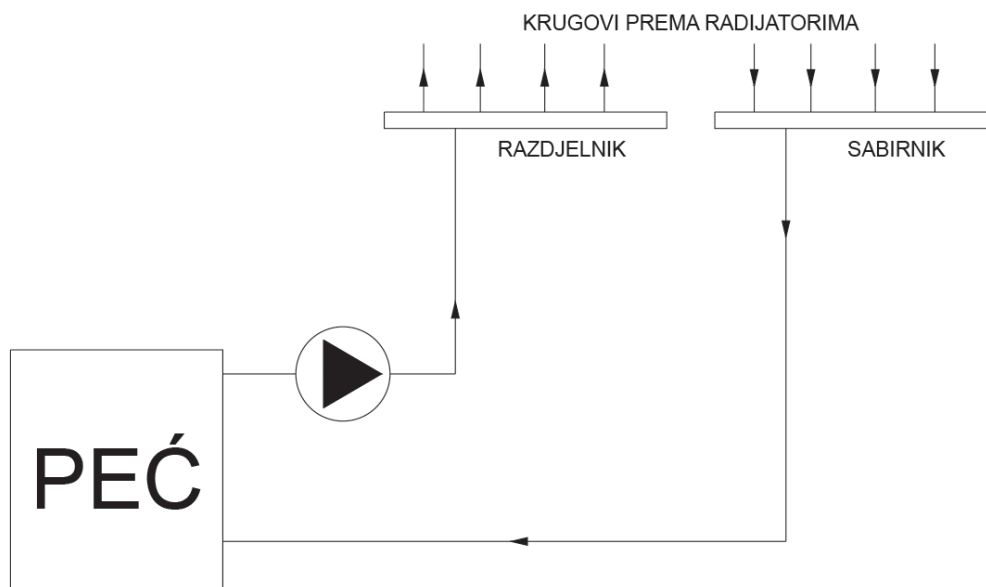
Veliki broj obiteljskih kuća, osobito onih građenih prije dvadeset i više godina, ima tzv. visokotemperaturni sustav centralnog grijanja baziran na kućnoj kotlovnici (na loživo ulje, plin ili kruto gorivo) i klasičnim radiatorima koji zahtijevaju temperaturu vode od najmanje 60°C za funkcionalan rad. Ovaj rad prezentira mogućnost dogradnje takvog sustava akumulatorom topline s električnim otpornim grijačem, što predstavlja jeftin i tehnički relativno jednostavan zahvat koji korisniku daje vlastiti element upravljane potrošnje za optimalno iskorištenje energije proizvedene na vlastitom krovu, a istovremeno i vrlo značajnu uštedu drugog, često i bitno skupljeg energenta.

2. TEHNOLOŠKA OSNOVA

Nove obiteljske kuće i višestambene građevine se danas u pravilu projektiraju po niskoenergetskom načelu, što uključuje i energetske efikasno grijanje i hlađenje. Najviša razina energetske efikasnosti u domovima su tzv. površinski sustavi – npr. podno grijanje i stropno hlađenje. Kad govorimo o grijanju, takvi sustavi u pravilu koriste vodu polazne temperature tipično od 25 do 35°C. Vodeni sustavi bazirani na ventilatorskim konvektorima u pravilu traže nešto veću temperaturu vode u polazu (do 40 ili 45°C, primjerice). U oba slučaja, optimalan izvor topline za takve sustave grijanja je – dizalica topline (toplinska, ili toplotna pumpa, kako se još naziva). S obzirom da koriste električnu energiju, takvi se sustavi odlično kombiniraju s fotonaponskom elektranom za pokrivanje sve ili dijela potrošnje vlastitom proizvodnjom.

Međutim, kuće i višestambene građevine građene ranije, tipično prije 20 i više godina, obično su opremljene tzv. visokotemperaturnim sustavom centralnog grijanja. Radi se o klasičnim radiatorima koji griju prostor gotovo isključivo toplinskim zračenjem (a vrlo malo ili ništa konvekcijom) i trebaju visoku temperaturu vode (barem 60°C, ali često i preko 80°C) da bi ostvarili efekt grijanja. Tako visoku temperaturu dizalice topline u pravilu ne mogu dati (tehnički su izvedive i takve, ali ne proizvode se u snagama primjerenim za kućne sustave, niti bi takvo rješenje bilo energetski, a niti financijski opravdano), već se voda u visokotemperaturnom sustavu centralnog grijanja grije kotlom (peći) na loživo ulje, plin ili kruto gorivo. Pojednostavljena tehnološka shema takvog sustava prikazana je slikom 1.

¹ Upravljanom potrošnjom naziva se potrošače čiji je korisnik fleksibilan s obzirom na vrijeme aktivacije i rada pa njima daljinski upravlja dispečer distribucijskog sustava u svrhu održavanja stabilnosti distribucijske mreže.

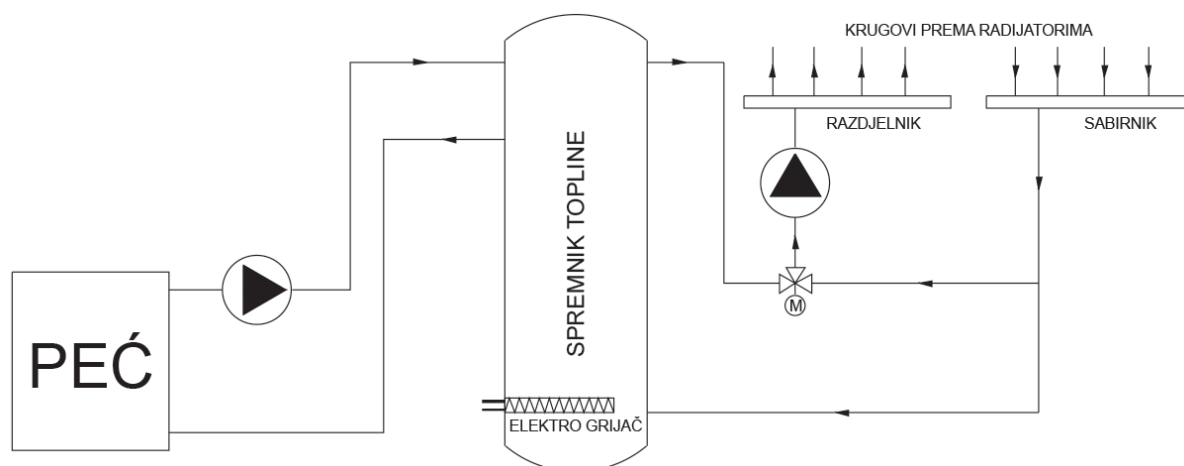


Slika 1: Pojednostavljena tehnološka shema visokotemperaturnog sustava centralnog grijanja (izvor: autor)

U takvom sustavu kakav je prikazan na gornjoj slici, toplinska snaga kotla (peći), bez obzira na energent, mora biti dovoljno velika da zadovoljava toplinske potrebe mreže radijatora u stvarnom vremenu (zagrijavanje je protočno).

Stalni rast cijena naftnih derivata potiče mnoge korisnike ovakvih sustava grijanja na razmišljanje o rekonstrukciji i povećanju energetske efikasnosti. Nažalost, ovi zahvati nisu tako jednostavni kako se na prvi pogled čine. Tržišno dostupne i troškovno opravdane dizalice topline ne mogu postići dovoljno visoku temperaturu za smisleno korištenje postojećih radijatora. Čak niti jednostavna zamjena postojećih radijatora ventilatorskim konvektorima nije uvijek opcija, s obzirom da se vrlo često pokazuje da je postojeći cijevni razvod neadekvatan (cijevi su preuske) pa su za standardni radni režim potrebni previsoki protoci, što izaziva šumove i, opet, značajan gubitak energetske efikasnosti. Tako se vrlo često dolazi do zaključka da je ulaganje u rekonstrukciju grijanja mnogim korisnicima (investitorima) financijski nedostižno, ali i tehnički problematično do te mjere da vodi cjelovitoj građevinskoj adaptaciji prostora pa se cijela ideja u pravilu napušta.

Međutim, postoji rješenje koje je u pravilu tehnički jednostavno, a i financijski znatno povoljnije, a omogućava korisniku značajnu uštedu i vrlo brz povrat investicije, a to je uvođenje elektrootpornih grijača za postizanje visoke temperature polaza. Pri tom ne govorimo o „običnom” tzv. elektrokotlu snage više desetaka kilovata, koji je u stvari protočni bojler velikog kapaciteta, nego o grijačima znatno manje snage i tzv. spremniku topline. Spremnik topline je posuda, obujma tipično 800 do 1500 L (za obiteljske kuće), termički izolirana, koja omogućava pohranu vode zagrijane na maksimalnu temperaturu i time ublažavanje energetske dinamike. Spremnik nam omogućava da vodu zagrijavamo manjom snagom kroz dulji vremenski period pa potrebe mreže radijatora ne treba pokrivati protočnom snagom, nego nekom bitno manjom. Osim toga, spremnik topline nam omogućava i da stvorimo toplinsku zalihu (akumulaciju) u periodima dana kad nam to bolje odgovara, a trošimo je onda kad nam je potrebna. Sustav se može dodatno, u smislu energetske efikasnosti, unaprijediti ugradnjom troputog, tzv. miješajućeg regulacijskog ventila kojim se miješa voda iz spremnika topline i ona iz povrata kako bi se dobila optimalna (niža) temperatura polaza prema radijatorima, usklađena s trenutnom vanjskom temperaturom i željenom temperaturom prostorija. Kotao (peć), ako ostaje u funkciji nakon rekonstrukcije, koristi se samo interventno, odnosno kao rezervni izvor topline. Pojednostavljena shema visokotemperaturnog sustava rekonstruiranog na ovakav način prikazana je slikom 2.



Slika 2: Pojednostavljena tehnološka shema rekonstruiranog visokotemperaturnog sustava centralnog grijanja (izvor: autor)

Ovako rekonstruiran sustav je, uz vlastitu fotonaponsku elektranu na krovu kuće, idealan energetski tandem, iz tri glavna razloga:

1. Primarni energent za grijanje postaje električna energija (umjesto fosilnog goriva ili biomase) – ovo je važno jer operator distribucijske mreže dozvoljava status kupca s vlastitom proizvodnjom samo do snage i godišnje proizvodnje koja je manja ili jednaka priključnoj snazi i godišnjoj potrošnji, dakle – puno je jednostavnije vlastitom fotonaponskom proizvodnjom nadomjestiti trošak vlastite potrošnje električne energije, nego vlastite potrošnje nekog drugog energenta.
2. Snaga elektrootpornih grijača može se odabrati relativno fleksibilno (snaga grijača i količina pohranjene vode u spremniku topline se uravnotežavaju), pa time i uskladiti sa snagom fotonaponske elektrane koja primarno ovisi o raspoloživom mjestu na krovnim ploham, njihovom nagibu i orijentaciji.
3. Elektrootporni grijač vode u spremniku topline predstavlja, u stvari, upravljanu potrošnju, dakle fleksibilni smo u pogledu trenutka i perioda aktivnosti pa ga možemo aktivirati kad god imamo raspoloživ višak energije s vlastitog krova kojeg bi inače morali predati u mrežu (otkupna cijena predane energije je uvijek u konačnici niža od one koju plaćamo za preuzetu energiju).

3. ENERGETSKA BILANCA

Optimalno dimenzioniranje spremnika topline predmet je strojarskog projekta rekonstrukcije sustava. Kriteriji optimuma su fizika građevine (toplinska izolacija fasade itd.), klimatski uvjeti, ukupna površina i obujam grijanih prostorija, odnosno snaga postojećih radijatora, ali i raspoloživa snaga fotonaponske elektrane na krovu, kao i ukupno opterećenje i potrošnja električne energije u objektu.

Sa strane potrošnje, jedan mogući primjer je kuća neto korisne površine od oko 100 m² energetskog razreda D koja u kontinentalnom okruženju može trebati (ovisno o klimatskim prilikama) oko 0,5 kWh/m² energije grijanja na dan, odnosno 50 kWh dnevno. To bi značilo da za takvu kuću teoretski minimalan spremnik topline treba držati 50 kWh upotrebljive pohranjene energije, ali, ako je moguće i višestruko više.

U suštini, povoljnije je, u smislu dugoročne isplativosti te ako raspoloživ prostor u kotlovnici to dozvoljava, spremnik topline predimenzionirati, na način da je dostatan i za nekoliko dana grijanja kuće u očekivano oštrim zimskim uvjetima. Na taj način se stvara značajan manevarski prostor upravljanja tom potrošnjom i maksimizira mogućnost iskorištenja vlastite fotonaponske proizvodnje za vlastite potrebe, a istodobno omogućava više oblačnih dana zaredom bez eksternog

troška za grijanje. Nedostatak predimenzioniranog spremnika topline može biti veći eksterni trošak dopunjavanja toplinom u periodima duljeg oblačnog vremena i kratkih (zimskih) dana.

Važan aspekt dimenzioniranja spremnika topline je pravilno sagledavanje ukupno akumulirane topline u odnosu na iskoristivu akumuliranu toplinu. Ovo je najjednostavnije predočiti na jednom jednostavnom primjeru. Recimo da imamo spremnik obujma 1 m^3 (odnosno 1000 litara) u kojem se, nakon ljetne neaktivnosti sustava grijanja, voda ohladila na temperaturu od 15°C . Maksimalna temperatura do koje je razborito zagrijati vodu u spremniku je 90°C (konzervativniji projektanti ograničavaju ovo i niže, na primjer na 85°C). Na 95°C aktivira se zaštitni termostat koji trajno isključuje elektrootporni grijač, do ručnog reseta.

Pohranjena toplinska energija računa se po formuli

$$E = m \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdje su:

m – ukupna masa vode u spremniku

c_v – specifični toplinski kapacitet vode ($4181 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 0,0012 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)²

ΔT – razlika od minimalne do maksimalne temperature u spremniku

Gustoća vode je 1000 kg/m^3 , dakle spremnik iz našeg primjera, koji ima 1000 litara, odnosno 1 m^3 , sadrži ukupnu masu vode od 1000 kg. Razlika temperature je $90 - 15 = 75 \text{ }^\circ\text{C} = 75 \text{ K}$. Prema tome, ukupno akumulirana toplinska energija u spremniku iznosi

$$E_u = 1000 \text{ kg} \cdot 0,0012 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 75 \text{ K} = 90 \text{ kWh} \quad (2)$$

Međutim, nije sva akumulirana energija iskoristiva. Naime, ako temperatura vode u spremniku padne ispod 60°C (kod nekih radijatora možda je ova donja granica i viša), radijatori visokotemperaturnog sustava postaju marginalno upotrebljivi. Zato nam je upotrebljiva razlika temperature $90 - 60 = 30 \text{ }^\circ\text{C} = 30 \text{ K}$. Dakle, upotrebljiva pohranjena energija iznosi

$$E_g = 1000 \text{ kg} \cdot 0,0012 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 30 \text{ K} = 36 \text{ kWh} \quad (3)$$

Dakle, optimalan način rada sustava je takav da se tokom cijele sezone grijanja temperatura vode u spremniku topline ne spušta ispod upotrebljive razine, a energija potrebna za inicijalno zagrijavanje vode iznad te temperature se troši jednokratno, samo na početku sezone grijanja.

S druge strane bilance imamo snagu fotonaponske elektrane, odnosno snagu elektrootpornog grijača. Tipično obiteljske kuće imaju krovove koji omogućavaju postavljanje fotonaponskog polja vršne instalirane snage od 5 do 15 kW. Pri tom se navedena snaga ostvaruje samo u dijelu dana kad je sunce oko zenita, te samo u dijelu godine kad je visina zenita veća. U svakom slučaju, u pravilu se cilja dimenzionirati operativnu snagu grijača oko 30 do 35% nazivne vršne instalirane snage fotonaponske elektrane. Naime, u kući postoje i drugi potrošači s kojima korisnici nisu fleksibilni, dakle su prioritetni, a maksimalna vršna snaga fotonaponska elektrana nije raspoloživa čim sija sunce, nego tipično samo nekoliko sati na dan kroz nekoliko mjeseci godišnje.

Relativno čest scenario su kuće s fotonaponskim elektranama od oko 12 kW vršne instalirane snage i trofaznim elektrootpornim grijačem ukupne snage od 6 kW koji se upravlja u tri stupnja po 2 kW (tri grijača tijela spojena u zvijezdu) te se grijanje aktivira prema raspoloživom višku snage s krova – 2, 4 ili 6 kW.

² $4181 \text{ J} = 4181 \text{ W} \cdot \text{s} = 4181 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \cdot 3600 \cdot 1 \text{ h} = 0,0012 \text{ kWh}$

Ovdje, naravno, valja uskladiti snagu grijača i s energetsom potrebom spremnika topline. Ako pretpostavimo da imamo spremnik kao u gornjem primjeru, jednom nakon inicijalnog zagrijavanja spremnika je za nadomještanje svih 36 kWh upotrebljive pohranjenje energije potrebno šest sati pri maksimalnoj snazi (6 kW), devet sati pri snazi od 4 kW, odnosno 18 sati pri snazi od 2 kW. Ako znamo da u sezoni grijanja na našim geografskim širinama imamo od približno osam do 12 sunčanih sati (uz potpuno vedro vrijeme), jasno je da punjenje minimalnom snagom teorijski ne može nikad završiti jer se noću toplina troši, a ne nadopunjuje. Međutim, strategija upravljane potrošnje je takva da se koristi svaki višak vlastite proizvodnje za nadopunjavanje spremnika topline te se, ukoliko količina viška vlastite proizvodnje nije dostatna, grijač aktivira noću, za vrijeme niže tarife. Naravno, balans obujma spremnika topline, snage elektrootpornog grijača i snage fotonaponske elektrane moraju biti takvi da se takva dopunjavanja topline o eksternom trošku događaju najrjeđe moguće.

4. UPRAVLJANJE

Osnovni algoritam upravljanja je u suštini vrlo jednostavan i može se opisati jednom rečenicom: dokle god postoji višak snage vlastite proizvodnje, a maksimalna dozvoljena temperatura u spremniku topline nije postignuta, drži uključene grijače u onom stupnju rada koliko dozvoljava višak snage. Osnovna potrošnja kuće je, u svakom slučaju, prioritet te se ona bez posebnog upravljanja napaja iz vlastite proizvodnje u onoj mjeri koliko je u nekom trenutku dostupno, a eventualno potrebna razlika se namiruje kupovinom energije iz distribucijske mreže.

Kako bi ovo upravljanje bilo moguće, najprije nam je potreban uređaj (na tržištu najčešće poznat

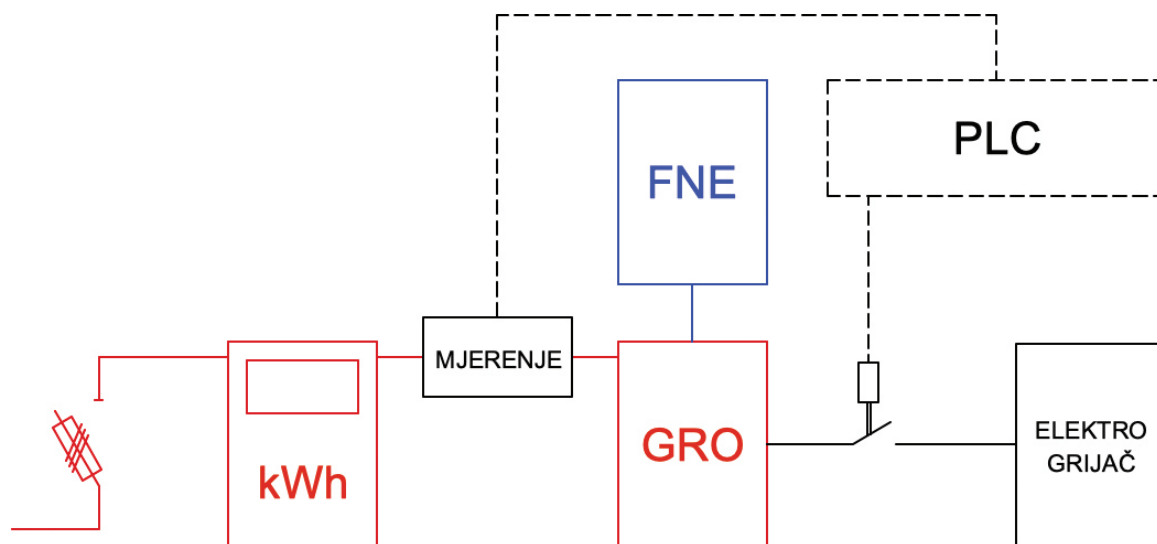


Slika 3: Mjerni uređaj DTSU666

po engleskom nazivu „*smart meter*”) koji mjeri snagu i smjer toka energije, kako bismo znali kad i koliko viška snage imamo u svakom trenutku. Trenutno tržišno najdostupniji i najpopularniji takav uređaj prikazan je na slici 3. Uređaj se u suštini spaja na isti način kao i službeno brojilo električne energije koje ugrađuje operator distribucijskog sustava, samo, naravno, u ormar koji je dostupan serviseru i korisniku.

Zakućne instalacije, mjerenje struja je gotovo uvijek direktno (bez strujnih mjernih transformatora). Opremljen je RS485 komunikacijskim priključkom, a osnovni protokol komunikacije je Modbus RTU, tako da putem njega može komunicirati s kontrolerom i dostavljati točne trenutne mjerne podatke o iznosu i smjeru te faktoru snage. Na temelju tih podataka, kontroler dalje odlučuje kada i koliko grijača uključiti ili isključiti. Ono po čemu se ovaj uređaj razlikuje od standardnog dvosmjernog brojila jer to što su mu

Modbus registri i parametri komunikacijskog protokola usklađeni sa standardom komunikacije kojeg očekuje veliki broj fotonaponskih invertera na tržištu, tako da se može komunikacijski povezati izravno na inverter i time inverteru omogućiti automatsku regulaciju izlazne snage. To je, na primjer, bitno kad je operator distribucijskog sustava odredio takve tehničke uvjete da nije dozvoljena izlazna snaga kod predaje u mrežu veća od neke granične. U našem primjeru ta funkcija nije bitna. Moglo bi se koristiti bilo koji dvosmjerni digitalni multimetar s mogućnošću komunikacije. Slika 4 prikazuje načelnu blokovsku shemu upravljanja.

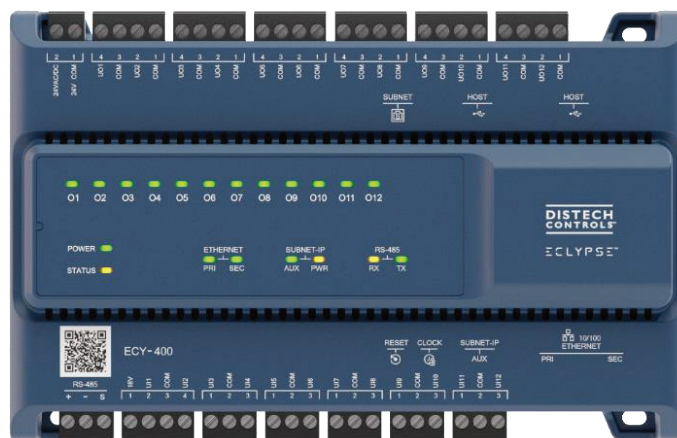


Slika 4: Blokovska shema upravljanja grijačem (izvor: autor)

Naravno, nije nužno imati zaseban kontroler (PLC) samo za upravljanje grijačem. Radi se o jednom te istom kontroleru koji će služiti i za upravljanje cijelim sustavom centralnog grijanja (regulacijom temperature polaza, cirkulacijskim crpkama, itd.). Za obiteljsku kuću to može biti namjenski kontroler nekog specijaliziranog proizvođača, neki jednostavniji kontroler namijenjen zgradarskoj automatizaciji (primjerice – Distech Controls Eclipse 400 serija), ili neki napredniji tzv. „pametni relej“ kao što je npr. Unitronics Jazz, Siemens LOGO! Ili Schneider Electric Zelio Logic. Na slikama u nastavku prikazana su ilustrativno dva od navedenih uređaja. Točna konfiguracija ovisi o složenosti sustava grijanja i detaljima rješenja danih strojarskim projektom (o čemu više u nastavku), a izbor marke i tipa releja najviše o izboru programera (automatičara), odnosno programskom jeziku kojeg preferira koristiti.

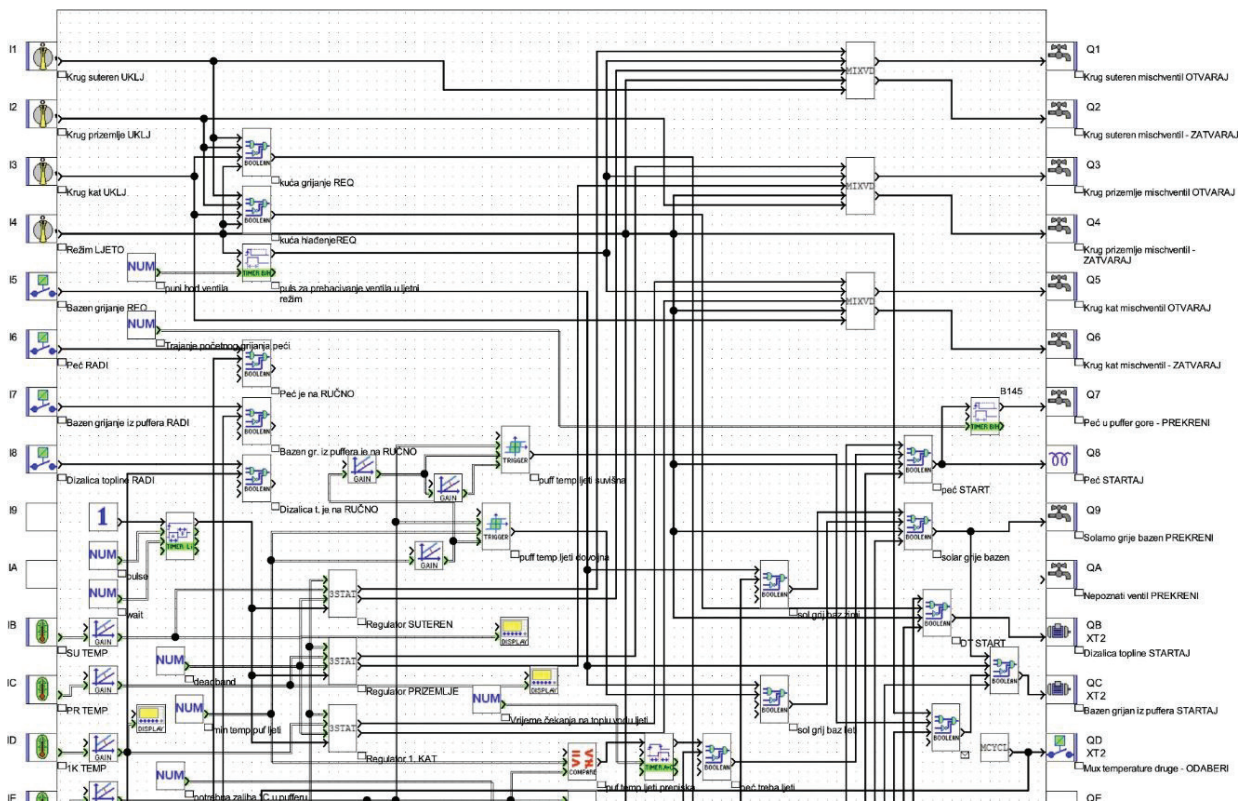


Slika 5: Unitronics Jazz "pametni" relej



Slika 6: DDC kontroler Distech Eclipse 400

Zgradarski kontroleri se tipično programiraju grafičkim jezikom nalik funkcionalnom blok dijagramu (pa se taj programski jezik i naziva FBD), slično kao kod nekih „pametnih releja“, dok se Unitronics Jazz, na primjer, programira standardnim Ladder grafičkim programskim jezikom kakav se koristi i kod većih PLC uređaja industrijske namjene. Slika 7 prikazuje dio FBD programa „pametnog releja“ iz strojarnice jedne obiteljske kuće na Rabu (ovo je projekt iz 2015. godine gdje se radilo o potpuno novoj obiteljskoj kući s podnim grijanjem, dizalicom topline i toplovodnim solarnim kolektorima).



Slika 7: Primjer dijela programa za SE Zelio Logic, napisanog FBD grafičkim jezikom

Prostora za unapređenja od osnovnog algoritma, naravno, ima. Prvenstveno, temperatura vode u spremniku topline nije homogena, osobito ako nema trajne cirkulacije, jer dolazi do termičkog raslojavanja pa je temperatura na dnu spremnika niža i raste prema vrhu. Zato strojarski projektant, radi pokrivanja svih scenarija dinamike, može odrediti raspored grijača na dvije visine: nisko, za zagrijavanje akumulacije kroz dulji period i visoko, za promptnije zagrijavanje manje količine vode, većom snagom, na primjer noću, potrošnjom energije iz mreže, ako se utroši zaliha topline prikupljena u vrijeme dok je bilo vlastite proizvodnje na krovu. Također, u takvim se projektima temperatura u spremniku topline i mjeri na više visina kako bi se omogućilo preciznije upravljanje. Idući mogući korak unapređenja je pristup internetskom meteorološkom servisu, u svrhu prilagođenja očekivanim vremenskim prilikama sutradan.

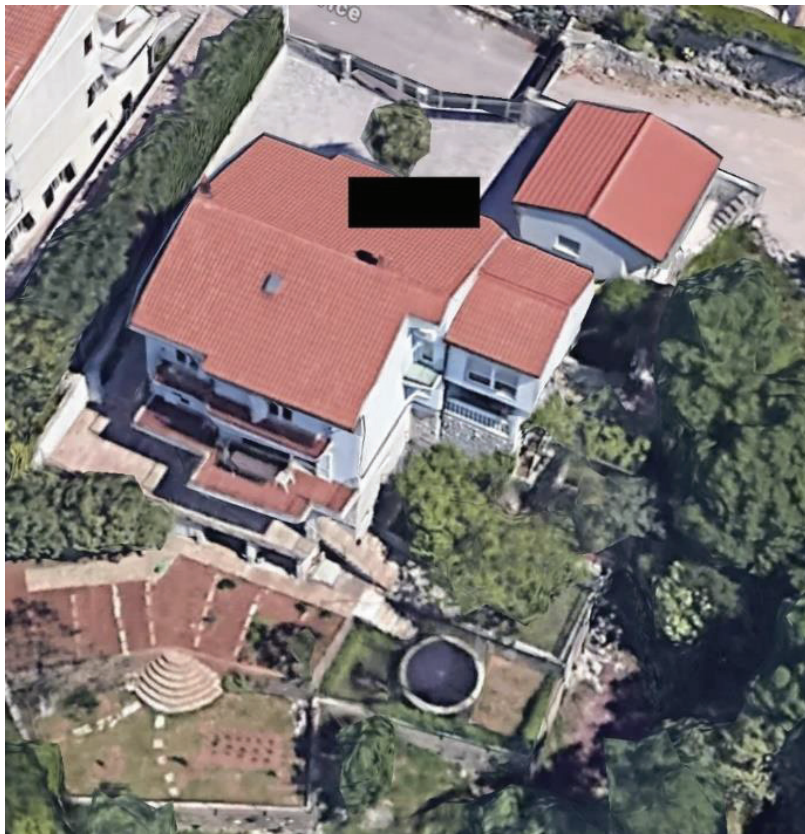
Ovdje su dva najčešća aspekta:

- ako očekujemo sutradan (još jedan) oblačan dan, to znači da se spremnik topline sutradan neće moći dopuniti besplatnom fotonaponskom energijom s krova pa je povoljnije da ga tokom noći dopunimo potrošnjom iz mreže, za vrijeme niže tarife, nego da sutradan povlačimo iz mreže po višoj tarifi;
- ako sjutradan očekujemo dnevne temperature koje nisu naročito niske, to znači da temperatura polaza vode za grijanje neće morati biti vrlo visoka, nego neka minimalna (npr. 60 do 65°C), što znači da će se utrošiti manje akumulirane energije iz spremnika, a ovo je korisno znati ako će dan također biti i oblačan jer onda ne moramo kroz noć uz eksterni trošak dopunjavati spremnik do maksimalne temperature, nego niže od toga.

5. PRIMJER STVARNOG PROJEKTA

Jedan primjer opisane rekonstrukcije izveden je u obiteljskoj kući u Kastvu, pokraj Rijeke, 2022. godine. Kuća je bruto razvijene površine oko 440 m² u tri etaže, od čega je oko 290 m² grijano. Kuća je građena u razdoblju od 1990. do 1999. godine i izvedena je najnaprednijim materijalima

toplinske ovojnice koji su u ono doba bili dostupni (termožbuka debljine 3 cm i drvena vanjska stolarija s jednoslojnim tzv. „termopan“ staklima). Investitor nije nikad dao izraditi energetske certifikat po današnjim standardima, ali procjena je autora ovog članka da bi se najvjerojatnije radilo o energetske klasi C.



Slika 8: Obiteljska kuća u Kastvu (izvor: Google)

Prije rekonstrukcije, sustav centralnog grijanja bio je baziran na klasičnim visokotemperaturnim radijatorima i kotlu marke Schäfer, na ekstra lako loživom ulju snage 36 kW.

Kotao je proizveden 2000. godine, kao visokoefikasan (tj. s ugrađenim ekonomizerom za predgrijavanje u dimnom traktu i temperaturom dimnog plina na donjoj granici dozvoljenoj za izbjegavanje kondenzacije u dimnjaku). Radi se, dakle, o kotlu najveće moguće efikasnosti. Radijatori su već bili opremljeni autonomnim termostatskim ventilima, ali polazna temperatura vode nije bila klizno regulirana, već fiksno postavljena na termostatu peći, na temperaturu koju je proizvođač odredio kao optimalnu – 75°C. U uvjetima neuobičajeno hladnog vremena korisnik bi ručno podigao podešenje termostata na 85°C, a u prijelaznim razdobljima (kasna jesen i rano proljeće) bi ga spustio na 70°C.

Prema informacijama primljenim od investitora, prosječna potrošnja loživog ulja kretala se između 2 i 2,5 m³ po sezoni grijanja. Prema aktualnom hrvatskom Pravilniku o sustavu za praćenje mjerenje i verifikaciju ušteda energije (objavljenom u Narodnim novinama br. 98/2021, izmjene i dopune u br. 30/2022) normativna energetska vrijednost ekstra lakog loživog ulja je 42,71 MJ/kg. Uz prosječnu gustoću od 1,05 litara po kilogramu to je 40,68 GJ/m³, odnosno 11.390,40 kWh/m³.

Energetska potrošnja objekta na grijanje loživim uljem iznosila je, dakle, između 22.800 i 28.500 kWh po sezoni grijanja. Na 290 m² grijanog prostora, to je utrošak od 79 do 98 kWh/m² po sezoni grijanja. U okolici Rijeke, na nadmorskim visinama od 200 do 350 mnm, sezona grijanja traje 4,5 do 5 mjeseci (135 do 150 dana) godišnje pa je, u slučaju promatrane kuće, specifični utrošak energije grijanja ekstra lakim loživim uljem od 0,52 do 0,73 kWh/m² na dan. Uz deklariranu efikasnost kotla kad je bio nov od 87% i procijenjen gubitak efikasnosti kroz 20

godina eksploatacije, očekujemo trenutnu efikasnost kotla od 83%, što znači da je za samo grijanje potrebno 0,44 do 0,6 kWh/m² na dan, odnosno radijatorska mreža troši 126 do 175 kWh na dan.

Navedene vrijednosti predstavljaju statističke granice varijacije na prosječan dan grijanja. Energetske potrebe sustava mogu biti i veće u manjem broju vrlo hladnih dana usred zime, a mogu biti i manje u većem broju dana u prijelaznom razdoblju (kasna jesen i rano proljeće).

Vidljivo je da je potrošnja neznatno veća od očekivane s obzirom na izvedbu toplinske izolacije kuće. Vjerojatan razlog su navike ukućana (neki prozori otvoreni više sati ili cjelodnevno dok grijanje radi, nepotrebno visoka polazna temperatura vode s obzirom na vanjsku temperaturu, i sl.).

Kako je ranije izračunato jednadžbom (3), spremnik obujma 1 m³ može akumulirati 36 kWh iskoristive toplinske energije za grijanje. Prema tome bi za dnevnu zalihu koja približno odgovara izračunatoj dnevnoj energetskej potrebi trebalo izvesti spremnik topline obujma 4 m³ (4·36=144 kWh). Investitor, međutim, nije imao na raspolaganju dovoljno prostora za ugradnju tolikog spremnika pa je projektiran najveći mogući spremnik koji se mogao smjestiti u raspoloživ prostor, a da je dostupan kao tipski, kataloški proizvod. Cilindrični spremnik unutarnjeg promjera 1,2 m i unutarnje visine 2,1 m, neto obujma 2,3 m³. Takav spremnik drži do 83 kWh iskoristive toplinske energije.



Slika 9: Dispozicija fotonaponskih panela

Krov je vrlo povoljne konfiguracije i orijentacije te je na njega smješteno 28 panela po 440 Wp, odnosno ukupno 12,3 kWp instalirane istosmjerne vršne snage, kao što je prikazano na slici 9. Orijentacija krova je 27° zapadno, a nagib krovnih voda je 15°. Ugovorena priključna snaga korisnika je i prije gradnje fotonaponske elektrane bila 13,84 kW (trofazni simetrični limitator od 20A) iako očito bez prave potrebe jer se godišnja potrošnja električne energije kretala između 2800 i 3500 kWh. PVGIS* proračun je prikazao godišnju proizvodnost projektirane fotonaponske elektrane od oko oko 15.700 kWh, od čega bi najmanje 2.200 kWh trebalo preostati za potrebe

grijanja ili za predaju u mrežu.

Ranija potrošnja loživog ulja ekvivalentna je godišnjem utrošku od, kako smo ranije izračunali, 22.800 do 28.500 kWh. Uz procijenjenu efikasnost kotla od 83%, očekivani ukupni utrošak električne energije na grijanje trebao je biti u rasponu od 19.000 do 23.700 kWh po sezoni. Stvarna potrošnja električne energije na rad elektrootpornih grijača kroz dvije sezone grijanja pokazala se i manjom od očekivanja, primarno zbog uvođenja klizne regulacije temperature polaza s obzirom na vanjsku temperaturu, čega ranije nije bilo.

Tablica 1: Energetska bilanca nakon dvije sezone grijanja (sve vrijednosti u kWh)

MJ	KUĆANSTVO		ZA GRIJANJE	FNE PROIZV.	GRIJANJE + KUĆA		VIŠAK U MREŽU
	VT	NT			IZ FNE	IZ MREŽE	
	(1)	(2)			(3)	(4)	
	mjereno				(4)-(1)	(3)-(5)+(2)	(4)-(5)-(1)
1	220	73	2.793	683	463	2.403	0
2	184	84	2.958	867	683	2.359	0
3	182	79	1.932	1.278	1.096	915	0
4	152	56	1.064	1.569	1.064	56	353
5	159	66	0	1.753	0	66	1.594
6	150	62	0	1.923	0	62	1.773
7	129	66	0	2.029	0	66	1.900
8	152	56	0	1.876	0	56	1.724
9	143	57	0	1.429	0	57	1.286
10	144	63	1.332	1.045	901	504	0
11	295	61	1.589	640	345	1.328	0
12	301	75	2.680	605	304	2.455	0
GOD.	2.211	798	14.348	15.697	4.856	10.327	8.630

* PVGIS je službeni geografski informacijski sustav Europske komisije za fotonaponsku tehnologiju (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)

U tablici 1 prikazane su analitički po mjesecima prosječne vrijednosti za:

- potrošnju kućanstva u višoj (dnevnoj) tarifi – stupac (1)
- potrošnju kućanstva u nižoj (noćnoj) tarifi – stupac (2)
- dodatnu potrošnju električne energije za grijanje – stupac (3)
- proizvodnju fotonaponske elektrane – stupac (4)
- vlastitu proizvedenu energiju utrošenu za grijanje – stupac (5)
- električnu energiju preuzetu iz mreže za grijanje i kućanstvo (sve u noćnoj tarifi) – stupac (6)
- višak vlastite električne energije predan u mrežu (sve u dnevnoj tarifi) – stupac (7).

Investitor je s opskrbljivačem sklopio tzv. ugovor o samoopskrbi. Ovo je mogućnost koju u Hrvatskoj imaju samo kućanstva (ne i privredni subjekti) gdje se na razini godine radi prijebom predanog viška i preuzete energije u kWh (ne u eurima). U ovom je slučaju investitor zapravo financijski oštećen jer svu energiju iz mreže preuzima u noćnim satima (za vrijeme niže tarife), a viškove predaje za vrijeme dnevne (više) tarife. Međutim, i da se radi novčani prijebom, otkupna cijena za viškove nije nužno dovoljno visoka da pokrije prodajnu cijenu u nižoj tarifi, a na ovaj način je investitor u povoljnijoj situaciji kad u skoroj budućnosti odluči prijeći s benzinskog ili dizelskog automobila na električni i ugraditi vlastitu punionicu.

U svakom slučaju, na razini godine, ukupni trošak električne energije preuzete iz mreže (nakon prijeboma s predanim viškom) iznosi, prema aktualnim cijenama, 148 €. Godišnja razlika između stupaca (6) i (7) iznosi 1697 kWh, sve po cijeni niže tarife od 0,0772 €/ kWh plus 13% PDV.

U odnosu na prethodnu prosječnu potrošnju loživog ulja od 2250 litara godišnje po trenutnoj cijeni od 0,89 €/L (u vrijeme projektiranja, cijena je bila i bitno veća), što predstavlja godišnji trošak od oko 2.000 €, ovo je godišnja ušteda od oko 1.850 €.

Ukupni trošak investicije iznosio je (prema usmenoj informaciji primljenoj od investitora) oko 16.000 €, što uključuje trošak dobave i gradnje fotonaponske elektrane, spremnika topline s ugrađena tri trofazna grijača po 3 kW, na tri različite visine, regulacijskog ventila, temperaturnog osjetnika i upravljačkog ormarića komplet s programiranjem kontrolera i puštanjem sustava u rad.

Sustav, prema tome, ima rok isplativosti između osam i devet godina prema sadašnjim cijenama loživog ulja i električne energije. Izvorno proračunati rok isplativosti od šest do sedam godina bio je baziran na povijesno najvišim cijenama naftnih derivata iz 2022. godine. Međutim, neovisno o kratkotrajnim fluktuacijama, dugoročni trend je jasan porast cijene svih energenata, a naftnih derivata uvijek više, nego električne energije pa se može očekivati da će se u konačnici sustav isplatiti i ranije od trenutno projiciranih osam do devet godina.

6. PROŠIRENJE KONCEPTA

Načelo upravljanje potrošnje za akumulaciju energije u termotehničkom sustavu može se jednako uspješno primijeniti i u ljetnom režimu, i to na dva načina:

- Za grijanje potrošne tople vode (osobito u objektima za apartmanski turistički smještaj ili u sanitarnim čvorovima kampova). Usljed tržišnih okolnosti i tehnološkog razvoja danas su jednostavnija, jeftinija i efikasnija rješenja bazirana na fotonaponskoj elektrani i elektrootpornim grijačima od nekadašnjih toplovodnih sustava solarnih kolektora. Ponajprije zato što se na istoj krovnoj površini danas postiže bitno veća snaga fotonaponskim panelima u odnosu na toplovodne, a uz manji trošak, a zatim i zbog veće fleksibilnosti koju pruža električni sustav.
- Za akumulaciju rashladne energije (u hladnom spremniku topline) u vodenom sustavu rashlade, koji koristi dizalicu topline i površinsko (stropno) hlađenje ili ventilatorske konvektore.

Pri tom je za oba ova primjera, za svrsishodan rad ipak potrebno osigurati veću snagu fotonaponske elektrane jer je vršno termičko opterećenje sustava u istom periodu kad je prilika za pohranu energije pa fotonaponska elektrana mora snagom pokriti i neposrednu potrošnju termotehničkog sustava, i dodatnu snagu za akumuliranje energije. Ipak je ovo zanimljiva primjena, jer je u klimatski blažim regijama (tipično onima uz more) ljetni režim hlađenja energetski zahtjevniji od grijanja zimi, a naročito kad je to povezano s turističkim najmom.

ZAKLJUČAK

Troškovi grijanja, hlađenja i klimatizacije u ukupnoj energetskej bilanci neke zgrade pridonose s minimalno 40 pa do preko 70%. Stalni rast cijena prirodnog plina i naftnih derivata permanentno povećava broj investitora zainteresiranih za zamjenu fosilnih energenata za grijanje drugim opcijama.

Pri tom je, naročito u segmentu obiteljskih kuća i manjih višestambenih građevina, zahvat zamjene visokotemperaturnog sustava grijanja znatno efikasnijim niskotemperaturnim – često ne samo vrlo skup, nego i vrlo teško tehnički izvediv bez cjelovite adaptacije objekta.

Ovdje opisano rješenje je dokazano kao tehnički jednostavno izvedivo i financijski prihvatljivo rješenje prijelaza s loživog ulja ili plina na električnu energiju s vrlo brzim rokom povrata investicije - ovisno o klimatskoj zoni i lokalnoj cijeni energenata, od tri do šest godina - jer velika ušteda nije samo rezultat rastuće disproporcije cijene loživog ulja i plina u odnosu na električnu

energiju, nego i neusporedivo veće tehničke efikasnosti električnih grijača kao ogrjevnog medija u odnosu na čak i najmodernije kotlove (a još više na one stare dvadeset i više godina).

LITERATURA

1. Donjerković, „Osnove i regulacija sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije, 1. dio”, Alfa Zagreb, 1996.
2. <https://chintglobal.com/products/dtsu666-three-phase-din-rail-meter-8-1007>. (02.09.2024.)
3. <https://www.distech-controls.com/products/detail/947933/distech-controls/eclipse-400-series> (02.09.2024.)
4. <https://www.unitronicsplc.com/jazz-series-jazz/> (02.09.2024.)

KOMPLEKSNO KORIŠĆENJE HIDROPOTENCIJALA VRELA I POVREMENIH TOKOVA CRNE GORE

Miodrag Kaluđerović

ENOP DOO Podgorica

KRATAK SADRŽAJ

Karakteristika svih vodnih tokova Crne Gore je visoka promjenljivost intenziteta proticaja kako po godinama tako i u okviru pojedinih mjeseci tokom godina. Prosječni godišnji proticaji direktno su zavisni od intenziteta padavina koje variraju u širokom opsegu između maksimuma i minimuma. U analiziranom periodu od 1979. do 2005. maksimalni godišnji prosječni protok na m.s. Duklo iznosio je $30,87\text{m}^3/\text{s}$ (1979) dok je minimalni godišnji prosječni protok iznosio $9,80\text{m}^3/\text{s}$ (1983) što daje razliku 315%. Prosječni mjesečni proticaji takođe variraju u širokim granicama od nultih do visokih vrijednosti. Promjenljivost intenziteta proticaja pored padavina uslovljena je i geografskim karakteristikama terena kao i geološkim karakteristikama terena slivnih područja koje ograničavaju mogućnost stvaranja podzemnih izdani iz kojih bi se napajali rječni tokovi kada nema atmosferskih padavina. Rječni tokovi su intenzivni isključivo u vrijeme padavina, naglog topljenja snijega i kratko vrijeme poslije njihovog prestanka. Među zemljama Evrope prema / tradingeconomics.com/country-list/precipitation?continent=europe/[1] Crna Gora se nalazi na drugom mjestu iza Farskih ostrva, ispred Švajcarske, Norveške i Slovenije ali pati i od suša i od poplava. Postavlja se pitanje kako se osloboditi negativnih uticaja suša i poplava? Nepostojanje podzemnih izdani može se kompenzovati izgradnjom akumulacija na stalnim i povremenim tokovima. U radu je dato takvo rješenje na primjeru racionalnog korišćenja hidro potencijala gornjih horizonata rijeke Zete za intenzivnu proizvodnju električne energije i druge namjene što je na sličan način moguće primijeniti na brojnim rijekama i vrelima širom Crne Gore i šire.

Ključne riječi: Finansiranje izgradnje energetskih objekata, Reverzibilne hidro elektrane, Tehničko ekonomski pokazatelji, Unapređenje ambijenta, Valorizacija hidropotencijala

1. SLIV GORNJIH HORIZONATA RIJEKE ZETE

Koncepcija korišćenja hidro potencijala gornjih horizonata rijeke Zete zasniva se na potpunom korišćenju ne samo u energetsom pogledu već i u višenamjenskom korišćenju ovih voda naročito za unapređenje ambijenta, sprečavanje poplava na nizvodnim tokovima kao i za navodnjavanje što je posebno važno u sušnom periodu godine.

Sliv rijeke Zete do ušća u rijeku Moraču na mjernoj stanici Podgorice iznosi 2.091km^2 u čemu je posebno značajan sliv koji čine tereni koji su na višoj nadmorskoj visini od kompenzacionog basena Norin koji ima kotu preliva 604mnm . Generalno gledajući uzvodno slivno područje rijeke Zete iznad kote 604mnm je veličine oko 1.000km^2 i uzdiže se do vrhova planina sa visinom do 2.300mnm . Prosječne godišnje padavine na ovom dijelu sliva rijeke Zete su iznad 2.000mnm .

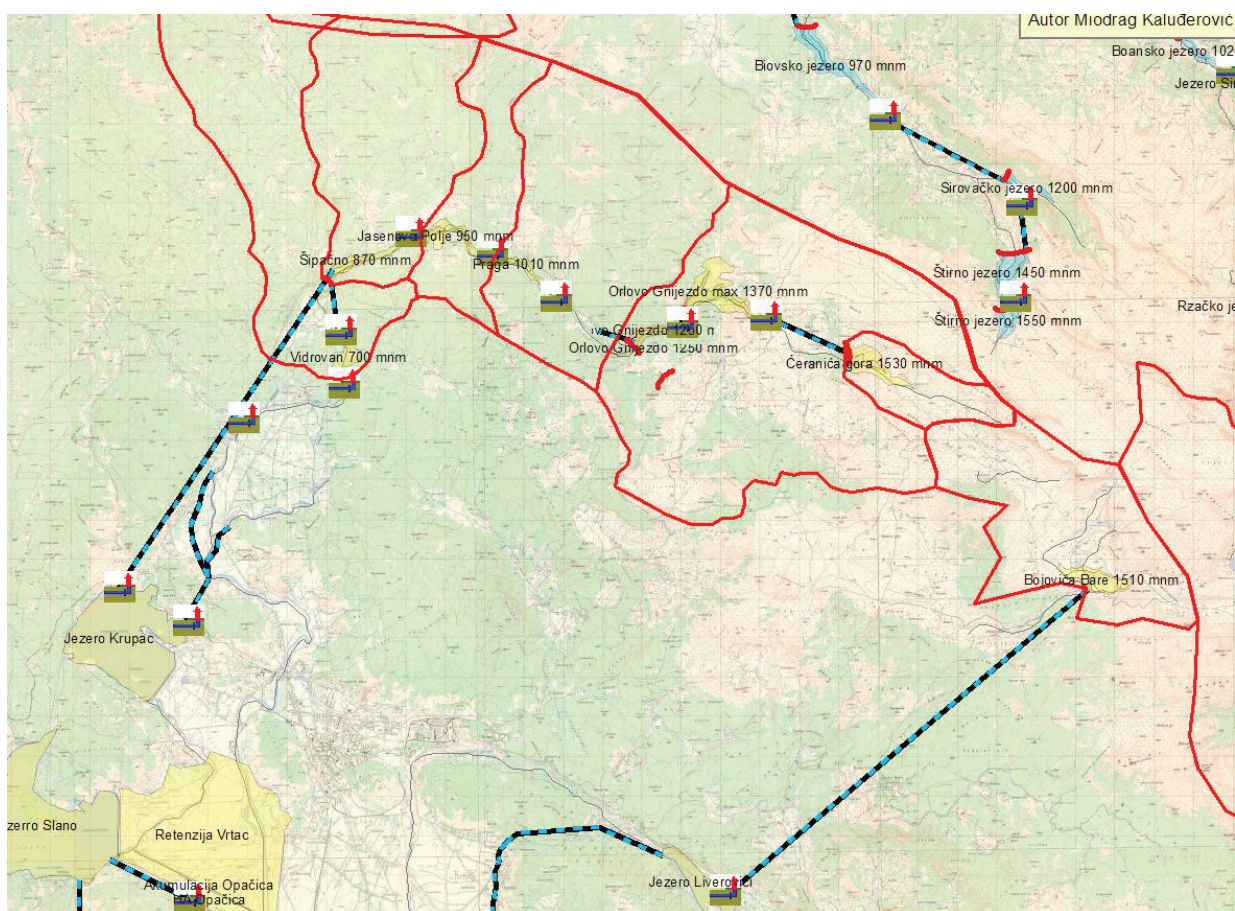
Dosadašnja hidro geološka istraživanja su uglavnom bila vezana za hidro geološke fenomene neposredno po obodu Nikšićkog polja kao i u samom polju. Ističemo da do sada nijesu vršena značajnija istraživanja sliva uzvodno od Vidrovana sa kotom iznad 660mnm . Ukupna površina ovog sliva je 145km^2 sa prosječnim godišnjim padavinama od 2.500 do 3.000mnm . Prikupljeni podaci i proračuni ukazuju na značajan hidro energetski potencijal ovog područja. Izgradnjom niza akumulacija ostvario bi se pozitivan uticaj na čovjekovu okolinu. Potrebno je dodatno proučavanje protoka na predviđenim mjestima gradnje brana kao i uslova za stvaranje odgovarajućih akumulacija.

Postoje brojni i kvalitativni meteorološki, hidrološki i hidrogeološki podaci za sliv rijeke Zete ali je nažalost izostala kvalitetna kvantitativna interpretacija. Kvalitetna savremena interpretacija ovih podataka na dnevnoj bazi omogućava nov pristup za valorizaciju energetskog i drugog potencijala rijeke Zete. Na slici broj 1 prikazana je moguća izgradnja hidro akumulacija i reverzibilnih hidroelektrana na dijelu sliva iznad 660mnm čime bi se omogućilo optimalno korišćenje hidro potencijala u uslovima maksimalnih proticaja ali isto tako stvorile bi se neophodne zalihe vode za snabdijevanje u sušnim periodima.

Veoma je važno uočiti značaj izgradnje sistema akumulacija i reverzibilnih elektrana: Čeranića Gora sa kotom preliva 1.570mnm , Orlovo gnijezdo 1 sa kotom preliva 1.370mnm , Orlovo gnijezdo 2 sa kotom preliva 1.250mnm , Praga sa kotom preliva 1.010mnm , Jasenovo Polje sa kotom preliva 950mnm i Šipačno sa kotom preliva 870mnm na kojima se prema tabeli 1 može instalirati oko 160MW kao i ostvarenje proizvodnje na prirodnom dotoku od oko 320GWh . Važan dio gornjih horizonata rijeke Zete je i dio koji pripada slivu rijeke Gračanice. U tabeli 1 prikazana je mogućnost izgradnje akumulacije Bare Bojovića i izgradnja RHE Liverovići instalirane snage 40MW i prosječne godišnje proizvodnje na prirodnom dotoku oko 80GWh . Odgovarajućom regulacijom navedenog dijela sliva u potpunosti se eliminišu gubici energije zbog nekontrolisanih gubitaka u retenziji Vrtac od oko 300GWh prosječno godišnje. Pored energetskih efekata praktično se isključuju sve poplave u nizvodnim područjima.

2. KORIŠĆENJE RASPOLOŽIVOG POTENCIJALA

Analizom korišćenja vode prema [2] saopšteni su prosječni godišnji gubici vode po osnovu gubitaka poplavnog talasa u retenziji Vrtac u iznosu od cca 200 miliona m^3 , zatim gubici zbog preliva iz akumulacija Krupac i Slano od oko 50 miliona m^3 i Gračanice oko 120 miliona m^3 ili ukupno 370 miliona m^3 što predstavlja gubitak energije za HE Perućica od $370 \cdot 1,24 = 458\text{GWh}$. Iz navedenog proizilazi da navedene akumulacije na gornjim horizontima imaju pozitivan nizvodni efekat bez izgradnje elektrana na ovim akumulacijama samo na način što bi oticanje vode sa ovog sliva bilo upravljano. Ističemo da su vode naše najveće prirodno bogatstvo ali iz ove analize vidimo da dio hidropotencijala, zbog neadekvatnog upravljanja, umjesto bogatstva, ne donosi korist, već nanosi štetu izazivanjem poplava.



Slika 1. Moguće hidroakumulacije i RHE u slivu Gornje Zete

U tabeli broj 1 prikazan je hidro energetski potencijal čije je korišćenje uslovljeno obezbjeđenjem vododrživosti akumulacija. U postojećim uslovima funkcija predloženih akumulacija bi bila ograničena na pomjeranje doticanja u postojeću HE Perućica dok bi korišćenje navedenih akumulacija za proizvodnju električne energije na elektranama gornjih tokova bilo od sekundarnog značaja. Akumulacije su postavljene u nizu na način da se na minimum svedu investicije u objekte kao što su dovodni kanali i cjevovodi tako da se investicije uglavnom odnose na izgradnju brana i ugradnju elektro mašinske opreme.

Izgradnja klasičnih HE bila bi neopravdana zbog bujičnog karaktera oticaja. Uslov da se ovaj značajan energetski potencijal koristi bila bi sanacija navedenih akumulacija i ugradnja reverzibilnih hidro elektrana (RHE) umjesto klasičnih HE. Kanjon Surdup, kojeg je usjekao istoimeni vodotok u kojem je predviđena izgradnja akumulacija i RHE, nastao je na način što se brže razvijala rječna nego karstna erozija zbog čega se površinsko oticanje manifestuje jedino za vrijeme ekstremnih proticaja dok se srednji i niski oticaji odvijaju podzemno. Treba imati u vidu izrazito bujični režim protoka zbog čega se u klasičnim hidro elektranama ovaj resurs ne može adekvatno valorizovati. Uvidom u tabelu 2 ostvarila bi se proizvodnja samo uz uslov da je akumulacija na stalnom maksimumu što se ne može obezbijediti sistemom klasičnih hidro elektrana, tako da bi proizvedena energija na prirodnom dotoku bila preko 50% manja, bez mogućnosti upravljanja proizvodnjom kojom se realizuje proizvodnja u periodu najvećih cijena na berzi.

Važan aspekt pri korišćenju hidro potencijala predstavljaju visoke razlike cijena na berzi kako u toku dana tako i po nedjeljama, mjesecima i godinama. Neregulisana energija iz hidro izvora ima sličan karakter sa PV i vjetro generatorima, od kojih ima skuplju proizvodnju pa je zbog toga nekonkurentna. Regulisana proizvodnja putem izgradnje RHE višestruko povećava vrijednost sopstvene proizvodnje uz istovremeno povećavanje proizvodnje navedenih obnovljivih izvora takozvane "zelene energije".

Tabela 1. Brane i akumulacije na gornjim horizontima rijeke Zete

KARAKTERISTIKE AKUMULACIJA I ELEKTRANA SISTEMA GORNJI HORIZONTI RIJEKE ZETE											
R.b.r	Objekat	Kota preliva mnm	Pov. hilj. m2	Duž. obale M	Površina sliva hilj. m2	Pr. d m3/s	Inst. p. m3/s	Snaga MW	Pr. dot. GWh	Pr. RHE GWh	Uk. u GWh
1	Ćeranića Gora	1530	780	5438	15.701	0,4	1,5	3	6	12	18
2	Orlovo gnijezdo	1370	1.109	10635	43.490	3,5	14	29	58	62	120
3	Orlovo gnijezdo	1250	381	4750	47.438	3,9	15	32	95	105	200
4	Praga	1010	299	4803	61.508	6,7	28	14	32	24	56
5	Jasenovo polje	950	500	6309	87.187	6,8	27	22	43	37	80
6	Šipačno	870	464	5700	101.634	6	24	52	93	115	208
7	Bare Bojovića	1510	743	4871	32.095	2	8	50	100	138	238
8	Ukupno		4276	42506				202	427	493	920

3. NOVI PRISTUPI I SAVREMENA EVROPSKA PRAKSA

Prema "Energy stored capacities 2020-2050"^[3] strana 2, postojeći ukupni kapaciteti RHE u Evropi u toku 2022. iznosili su oko 60 GW dok se potrebe ocjenjuju na 200 GW u 2030. i 600 GW u 2050. godini. Navedena izgradnja je neminovna kako bi se u potpunosti zadovoljio cilj Evropske komisije (EK) a to je da se za proizvodnju električne energije eliminišu fosilna goriva. To nas stavlja pred zadatakom izgradnje potpuno drugačije energetske strukture u Evropi čiji smo dio. U studiji EK "Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage"^[4] naglašena je potreba definisanja mogućih parova akumulacija PS (Pumped Storage) u zemljama EU, zemljama kandidatima i Turskoj kao izraz povećane potrebe za balansiranje sve veće proizvodnje električne energije iz vjetro i solarnih elektrana. Analiziranjem ovog dokumenta naglašen je značaj PHS sistema. U svijetu oko 70% RHE nema prirodne dotoke vode već se voda koristi samo kao medijum u zatvorenom ciklusu. Zbog navedenog prosjek rada RHE sistema je oko 1.200 časova godišnje od ukupnog fonda 8.760 časova.

Bez dubokih analiza jasno je da ogromnu prednost imaju takozvani hibridni sistemi tj. sistemi koji će imati mogućnost rada u režimu RHE i na prirodnom dotoku vode, što je karakteristično za gornje horizonte rijeke Zete, što povećava broj časova rada u proizvodnom režimu. Veoma je značajno istaći da u ukupnim investicijama RHE 50 do 70% otpada na stvaranje akumulacija. Ova činjenica stvara dodatnu prednost investitorima u RHE kada se kao donja akumulacija koriste postojeće prirodno jezero, vještačka akumulacija ili rječni vodotok naročito u sistemu kada postoji mogućnost više akumulacija koje su međusobno povezane.

Tabela br. 2. Karakteristike brana i elektrana na gornjim horizontima rijeke Zete

Karakteristike brana i elektrana na gornjim horizontima rijeke Zete										
Red. Broj	Naziv elektrane	Naziv akumulacije	Visina brane u m	Dužina brane u m	Prosječna širina zemljane brane u m	Zapremina zemljane brane u m ³	Srednji godišnji protok u m ³ /s	Inst. protok u m ³ /s	Inst. snaga u MW	Pr.energije u Gwh
1	RHE "Liverovići"	Bare Bojovića	20	105	30	31500	1,45	5,81	40,67	80,02
2	RHE "Gvozd"	Ćeranića Gora	50	600	50	750000	0,4	1,59	3,18	6,31
3	RHE Orlovo gnijezdo 1250 mm	Orlovo Gnijezdo	200	431	130	5603000	3,91	15,64	48,484	95,56
4	RHE Orlovo gnijezdo 1370 mm		50	197						
5	RHE "Praga"	Praga	40	200	40	160000	6,7	24,26	14,556	31,69
6	RHE "Jasenovo Polje"	Jasenovo Polje	60	355	80	852000	6,83	27,32	21,856	43,08
7	RHE "Šipačno"	Šipačno	50	272	80	544000	2,47	9,88	16,302	32,13
8	HE "Vidrovan"	Vidrovan				0	2,29	9,16	2,748	5,42
9	RHE "Vir"	Šipačno				0	6	24	52,8	104,07
	Ukupno					7940500			200,6	398,28

U odnosu na 5.000 parova mogućih akumulacija registrovanih u prema [4] postojeće razvojne mogućnosti na predloženim akumulacijama i elektranama Gornje Zete i brojni slični tokovi širom Crne Gore imaju značajne komparativne prednosti.

4. KARSTNA EROZIJA

Erozija u karstnim područjima Crne Gore je intenzivna i odvija se u vidu površinske i rječne. U područjima gdje je dominantna površinska erozija izostaju površinski tokovi vode dok rječnu eroziju karakterišu površinsko ali i podzemno oticanje. Za razmatrano područje karakteristična je rječna erozija gdje je rijeka Zeta usjekla kanjon Surdup koji, iako u toku godine teče kratkotrajno, predstavlja gornji tok rijeke Zete.

Atmosferska voda pada na zemljinu površinu, linijom manjeg otpora otiče prema nižim područjima ili ponire na vodopropusnoj podlozi. Voda ponirući popunjava međuprostore. Nailazeći na nepropusne stijene izlazi na površinu u obliku izvora. Tečenjem prema nižim djelovima hemijskim i mehaničkim djelovanjem oblikuje reljefne oblike. Rječna erozija (lat. erodere - odnošenje, skidanje) je razarački rad površinskih tokova (potoka i rijeka) koji se manifestuje oblikovanjem korita i dolina. Rječna erozija se realizuje bočno i dubinski. Intenzitet i vrsta erozije zavise od količine vode, karakteristika tla i nagiba terena.

Tok rijeke Zete od izvorišta zvanog Kamena česma na koti 1.560mm teče površinski do predviđene brane na mjestu Ćeranića Gora sa kotom preliva 1.560mm. Od predviđene Brane Ćeranića Gora do Brane Orlovo gnijezdo 1 sa prelivom na 1.350mm teče kroz morenski materijal gdje najvećim dijelom godine teče podzemno u dužini od 15km. Nizvodno je moguće realizovati formiranje akumulacija kako slijedi: HA Orlovo gnijezdo 2 sa prelivom na 1.250mm, HA Praga sa prelivom 1.010mm, HA Jasenovo Polje sa prelivom 950mm i HA Šipačno sa prelivom 870mm.

Teren je većim dijelom pokriven šumom bez komercijalnog značaja. Najvećim dijelom godine korito rijeke je suvo i generalno govoreći područje se može smatrati bezvodnim. Izgradnja brana je predviđena u suženim djelovima kanjona. Na površinama predviđenim za smještaj akumulacija nema naselja niti objekata privrednog značaja.

Razlozi za izgradnju akumulacija su sljedeći:

1. Spriječiti naglo nekontrolisano oticanje sa sliva koje je, iako kratkotrajno, na profilu Šipačno prosječno godišnje 200 miliona m³. Sa tačke gledišta upravljanja sistemom ispravno je imati fokus na maksimume što za dati profil iznosi oko 300 miliona m³. Prosječni godišnji protok na m.s. Duklo za period od 1991. do 2005. je 637 miliona m³, dok su maksimumi za m.s. Duklo 937 miliona m³.
2. Navedenih prosječnih 200 miliona m³ (31% protoka m.s. Duklo) i prosječnih godišnjih maksimuma od 300 miliona m³ (32% maksimalnog protoka na m.s. Duklo) su sinhroni sa doticajima rijeke Zete u retenziji Vrtac i dotocima rijeke Gračanice oko 120 miliona m³. U retenziji Slivlje voda se gubi u ponorima. Od viškova vode koje u određenim vremenskim periodima ne može da prihvati HE Perućica nema bilo kakve koristi već naprotiv uzrokuje velike štete u selima Gornje polje, Miločani, Zavrh, Mokra njiva, Čemenca, prigradska naselja Nikšića, Vitalac, Slivlje pa sve do Skadarskog jezera i rijeke Bojane.
3. Odgovarajućim upravljanjem navedenim količinama vode ostvarila bi se povećana proizvodnja električne energije u HE Perućica od cca 250 GWh bez i najmanjih dodatnih investicija.
4. Izgradnjom brana prema slici 1 i sanacijom akumulacija stvara se mogućnost akumulacija kapaciteta oko 80.000.000 m³ što čini da su navedene akumulacije pogodne za više sezonsko izravnanje voda navedenog sliva uz istovremeno veoma pozitivan uticaj na status nizvodnih vodnih tijela.
5. Na bazi količina vode koje bi stajale na raspolaganju bilo bi moguće realizovati proizvodnju na dotoku oko 400 GWh i dodatne proizvodnje po osnovu reverzibilnog rada u visokoj tarifi oko 520 GWh. Treba uočiti činjenicu da u određenim razlikama cijena na berzi ostvaruje se veći profit po osnovu reverzibilnog rada nego po osnovu prirodnog dotoka.
6. Predmetno područje koje bi bilo potopljeno predviđenim akumulacijama u postojećim uslovima nema bilo kakav privredni značaj, dok bi izgradnjom jezera bilo pretvoreno u područje egzotične ljepote komplementarno sa postojećim sistemom nikšićkih jezera takođe egzotične ljepote.
7. Preko brane Orlovo gnijezdo 2 izgradio bi se put sa 4 trake i tuneli kroz planinu Studena prema Nikšiću i kroz planinu Vojnik prema Šavniku. Izgradnjom navedena dva tunela skratilo bi se put između Nikšića i Šavnika sa oko 40km na oko 22km. Materijal dobijen pri izgradnji tunela bio bi ugrađen u tijelo brane Orlovo gnijezdo 2 kao i višak otkopanog materijala pri izgradnji puta od brane prema Nikšiću, Šavniku i drugim mjestima.

5. USLOVI ZA FORMIRANJE AKUMULACIJA

Naglašavamo da su potrebna dopunska istraživanja nadzemnog i podzemnog režima tečenja vode. Na osnovu dosadašnjih nesistematskih posmatranja zapažena su kratkotrajna ali veoma intenzivna površinska tečenja vode. Nešto dugotrajnija su tečenja na toku od Čeranića gore pod imenom Glogov potok, gdje se voda gubi u podzemlje pojavljujući se u dijelu Surdupa od Šipačna do Vidrovana. Lako se uočava da su intenzivna poniranja u koritu rijeke odakle slijedi zaključak da je prvi uslov za formiranje akumulacije za sprečavanje poniranja nanošenje potrebne količine gline kao nepropusnog sloja duž čitavog korita Surdupa i Glogovog potoka. Budući da je tokom geološke istorije dominantna bila rječna erozija nije realno očekivati značajno lateralno gubljenje vode iz budućih akumulacija.

Prema tabeli 2 na dotoku se dobija oko 400 GWh i mogućnost po osnovu reverzibilnog rada

cca 520 GWh. Na nizvodnom toku obezbjeđuje se dodatna proizvodnja u HE Perućica po osnovu upravljanja vodama gornjih horizonata rijeke Zete i sanacijom akumulacija oko 800 GWh

Tabela 3. Upoređenje klasičnih HE i RHE moguće za proizvodnju električne energije

Upoređenje moguće, projektovane i ostvarene proizvodnje električne energije								
Redni broj	Proizvodnja na prirodnom dotoku				Proizvodnja u reverzibilnom režimu			
	Naziv objekta	Snaga HE MW	Projekt. proizvod. Gwh	Realna proizvodnja GWh	Snaga RHE MW	Proizvodnja na dotoku RHE GWh	Proizvodnja reverzibilni rad GWh	Proiz. u VT GWh
1	RHE "Liverovići"	40,67	80,02	56	40,67	80,02	80	160
2	RHE "Gvozd"	3,18	6,31	4,5	3,18	6,31	6	12
3	RHE Orlovo gnijezdo 1250 mm	48,484	95,56	67	48,484	95,56	105	200
4	RHE Orlovo gnijezdo 1370 mm	29,4	58	40	29,4	58	62	120
5	RHE "Praga"	14,556	31,69	22	14,556	31,69	24	56
6	RHE "Jasenovo Polje"	21,856	43,08	30	21,856	43,08	37	80
7	RHE "Šipačno"	16,302	32,13	22	16,302	32,13	32	64
8	HE "Vidrovan"	2,748	5,42	4	2,748	5,42	6	11
9	RHE "Vir"	52,8	104,07	71	52,8	104,07	96	200
Ukupno na dotoku		230	398,28	278		398		
Ukupno RHE					230	398	520	920

Izgradnja sistema akumulacija i RHE zahtijeva izgradnju brana, pristupnih puteva kao i ugradnju elektro mašinske i regulacione opreme. Veliku prednost predstavlja činjenica da izgradnja navedenih objekata na razmatranom području ne izaziva bilo kakve sukobe u prostoru, naprotiv vrši pozitivan uticaj na uže i šire okruženje. Značajno je istaći i da nema potrebe za eksproprijacijom privatnog zemljišta.

6. INVESTICIJE I TROŠKOVI

U neposrednoj blizini izgradnje postoje odgovarajući pristupni putevi. Najvažnija i najveća stavka je obezbjeđenje materijala za izgradnju brana u iznosu od oko 8.000.000m³ i gline oko 15.000.000m³. Značajna količina materijala dobila bi se izgradnjom predviđenih tunela kroz planinu Vojnik dužine 4.800m i kroz planinu Studena 2.200m što ukupno iznosi 7.000m. Odabran je profil tunela sa 4 trake poprečnog profila iskopa 200m². Izgradnja tunela, uprkos velikoj dužini, može se smatrati povoljnom budući da prolazi kroz krečnjačke stijene velike nosivosti. Iskopom materijala iz tunela i pripadajućih portala obezbijedilo bi se oko 2.000.000m³. Za procjenu troškova uzete su ugovorene cijene prema promjeru radova za tunel Vjeternik, na dijelu autoputa Smokovac-Mateševo, dužine za obje cijevi 5.891m i ukupne cijene za sve radove, mjerenja, nadzor i profit 56.770.000€ ili po dužnom metru 56.770.000/5.891=9.636 €/m. Obzirom na povoljnije uslove i niže standarde opreme za predviđene tunele u odnosu na autoput predviđena cijena od 10.000€/m može se smatrati realnom i očekivanom.

Ostatak materijala bi bio korišćen od viška materijala koji bi se dobio izgradnjom saobraćajnica prema Nikšiću dužine 11km i prema Šavniku 5km kao i puteva oko predviđenih akumulacija i njihovo povezivanje. Cijenu iskopa i ugradnje od 10€/m³ uzimamo nešto iznad uobičajenih cijena

(cijena sličnog iskopa za dionicu Smokovac-Mmateševo 6,86€/m³) budući da se naglasak stavlja na visoke ambijentalne vrijednosti koje treba da budu dominantne u svim fazama realizacije.

Polazeći od dužine korita Surdupa i Glogovog potoka od 15.000m, prosječne širine korita 40m i potrebne debljine sloja gline od 1m, kao i cijene gline sa ugradnjom, može se očekivati trošak za sprečavanje poniranja kako slijedi:

Trošak sprečavanja poniranja - $15.000 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 30 = 18.000.000 \text{€}$

Cijena za elektro mašinsku i regulacionu opremu od 400.000€/MW uzeta je prema [6] i uvećana za 20% radi sigurnosti zbog inflacije i poremećaja lanca za snabdijevanje na globalnom nivou za isporuke vezano za ovu vrstu opreme.

Rekapitulacija glavnih investicija i troškova

Izgradnja tunela – 7.000m*10.000€/m.....	70.000.000€
Materijal za tijelo brane – 6.000.000m ³ *10.000€/m ³	60.000.000€
Glina za korito Surdupa i brane 600.000m ³ *30€/m ³	18.000.000€
Elektro mašinska oprema 400.000€/MW*200MW.....	80.000.000€
Ukupno.....	228.000.000€
Ostalo 10%.....	23.000.000€
Sve zajedno.....	251.000.000€

7. ENERGETSKI EFEKTI

Energetski efekti prikazani u tabeli 2 nastaju primarno kroz sljedeće efekte:

1. Korišćenje proizvedene energije na prirodnom dotoku u iznosu od oko 400 GWh;
2. Obezbjedenje uslova za proizvodnju po osnovu reverzibilnog režima rada u iznosu od 520 GWh;
3. Doprinos u izbjegavanju gubitaka vode u ponorima na obodu Nikšićkog polja;
4. Veoma su značajne dodatne mogućnosti proizvodnje u najpovoljnijim tržišnim uslovima.

U slučaju da se ne prevodi poplavni talas Zete u Krupac i Slano efekat po ovom osnovu iznosio bi dodatno oko 250 GWh. Prevođenje poplavnog talasa rijeke Zete u Krupac i Slano ne treba isključiti iako se realizuje izgradnja navedenih objekata na gornjim horizontima jer je prevođenje poplavnog talasa značajno sa tačke gledišta optimalnog upravljanja hidro potencijalom ukupnog sliva rijeke Zete.

Visok nivo zaduženosti Crne Gore uslovljava ograničenu mogućnost razvoja po dosadašnjem modelu finansiranja izgradnje elektroenergetskih objekata. Postojeća rješenja ne generišu zadovoljavajući profit te zbog toga ne mogu privući potreban kapital. Budući da je u Crnoj Gori razvijen nov pristup izgradnje energetskih objekata, koji obezbjeđuju visoku profitabilnost, nametnula se potreba da se pored novih tehničko tehnoloških rješenja nađu i nova rješenja u pogledu finansiranja kojima bi se omogućila realizacija izgradnje objekata bez zaduživanja države. Osnovni uslov za očekivanu spremnost domaćih i stranih partnera da učestvuju u finansiranju novih objekata je da projekti budu visoko profitabilni i da se omogući sigurnost za strana ulaganja. S druge strane, potrebno je naći rješenja koja će obezbijediti Crnoj Gori da, koristeći svoju prirodnu rentu, izgrađene kapacitete i infrastrukturu kao i specifičnost svojih rješenja, ostvari odgovarajuću dobit i kontrolu nad svojim nacionalnim resursima.

8. FINANSIJSKI EFEKTI

Ukupan prihod formira se po osnovu rada na prirodnom dotoku po cijeni od 150€/MWh, dok se prihod po osnovu reverzibilnog rada umanjuje na 100€/MWh poslije odbitka troškova za nabavku energije za pumpanje vode.

Prihod po osnovu prirodnog dotoka - 398.000*150.....	9.700.000€
Prihod po osnovu reverzibilnog rada - 520.000*100.....	52.000.000€
Ukupno.....	111.700.000€
Troškovi otplate kredita (period - pet godina).....	247.000.000/5= 49.400.000€
Operativni troškovi iznose 920.000MWh * 5€/MWh.....	4.600.000€
Nabavka energije 530.000 MWh * 50 €/MWh.....	6.500.000€
Profit 111.700.000 - 49.400.000 - 4.600.000 - 26.500.000.....	31.200.000€
Druga varijanta (otplata 10 godina), godišnji troškovi otplate su 24.700.000€ pa je godišnja dobit 55.900.000€ što je prikazano u tabeli 5.	
Izgrađeni sistem bi prema [6] imao	
vrijednost kako slijedi: 230MW*3.000.000€/MW.....	690.000.000€
Troškovi izgradnje sistema.....	247.000.000€

Prema [5] operativni troškovi iznose 5 €/MWh. Tako da veća ili manja odstupanja troškova po ovom osnovu nemaju značaja.

U navedenim proračunima korišćene su cijene koje su važile tokom mjeseca jula 2024. godine uz napomenu da su tokom 2022, 2023. i 2024. veoma oscilirale kako u toku dana tako i u raznim periodima godine. Navedene cijene su usvojene na nižim vrijednostima od ostvarivanih cijena na tržištu radi sigurnosti. U ovom radu kriterijum opravdanosti se odnosi uglavnom na objekte u užem smislu, tj. analizom objekata na gornjim horizontima Gornje Zete, ali treba imati u vidu i značajan uticaj na nizvodne efekte i pozitivan uticaj na poljoprivredu, smanjenje poplava, smanjenje negativnog uticaja sušnih perioda, ambijent i razvoj infrastrukture.

9. PLAN SMANJENJA UČEŠĆA INVESTITORA U VLASNIŠTVU KOMPLEKSA ENERGETSKOG SISTEMA GORNJIH HORIZONATA SLIVA GORNJE ZETE

Izgradnja RHE na gornjim horizontima karakterističan je po tome što su veći efekti na nizvodnim objektima nego na samom sistemu koji bi se izgradio na gornjim horizontima. Ipak, u ovoj analizi dati su ekonomski pokazatelji vezani samo za gornje horizonte budući da se na nizvodnim objektima značajna poboljšanja ostvaruju i drugim rješenjima koja su ranije prezentirana sa naše strane. Valorizaciju smo vezali za sam bonitet rješenja u dvije varijante vodeći računa da se investicija vrati za pet ili 10 godina. Ključni faktori za osjetljivost analize su vododrživost akumulacija, iznos investicija i cijene energije na berzi.

Vrijednost sistema je kako slijedi:

Vrijednost instaliranog MW prema [5].....	3.000.000€
Odakle slijedi vrijednost sistema 230*3.000.000.....	690.000.000€
Učešće Investitora 100%.....	247.000.000€
Učešće investitora u vrijednosti sistema	
prve godine rada 100*247.000.000/690.000.000.....	35,79%

Tabela 4. Plan smanjenja učešća u vlasništvu stranog partnera za kompleks RHE Gornji horizonti sliva rijeke Zete za slučaj otplate pet godina

God.	Vrijednost sistema 10 ³ €	Godišnja otplata 10 ³ €	Učešće stranog parnera 10 ³ €	Procenat učešće stranog parnera	Godišnja dobit 10 ³ €	Dobit CG u procentima	Dobit CG 10 ³ €	Dobit investitora 10 ³ €
P.Stanje	690.000.000		247.000					
1	690.000.000	49.400	247.000	35,7	31.200	64,3	20.061	11.138
2	690.000.000	49.400	197.600	28,6	31.200	71,4	22.276	8.923
3	690.000.000	49.400	148.200	21,47	31.200	78,53	24.501	6.698
4	690.000.000	49.400	98.800	14,31	31.200	85,69	26.735	4.464
5	690.000.000	49.400	49.400	7,12	31.200	92,88	28.978	2.221
Ukupno		247.000			156.000		122.553	33.446

Dobit investitora, uz plan podjele dobiti između Crne Gore i investitora, za pet godina iznosi 11.138,40/247.000=4,5%, što vjerovatno nije dovoljno da zadovolji investitore. Opcija Vlade Crne Gore je ili da učešće investitora u dobiti produži na oko 10 godina ili da se odrekne dijela dobiti u prvih pet godina da bi ranije koristila puni iznos dobiti.

Tabela 5. Plan smanjenja učešća u vlasništvu stranog partnera za kompleks RHE Gornji horizonti sliva rijeke Zete otplata 10 godina

Godine	Vrijednost sistema 10 ³ €	Godišnja otplata 10 ³ €	Učešće stranog parnera 10 ³ €	% stranog parnera	Godišnja dobit 10 ³ €	Dobit CG u procentima	Dobit CG 10 ³ €	Dobit investitora 10 ³ €
P.Stanje	690.000	247.000	247.000					
1	690.000	24.700	247.000	35,79	55.900	64,21	35.893	20.006
2	690.000	24.700	222.300	32,21	55.900	67,79	37.894	18.005
3	690.000	24.700	197.600	28,63	55.900	71,37	39.895	16.004
4	690.000	24.700	172.900	25,57	55.900	74,43	41.606	14.293
5	690.000	24.700	148.200	21,47	55.900	78,53	43.898	12.001
6	690.000	24.700	123.500	17,89	55.900	82,11	45.899	10.001
7	690.000	24.700	98.800	14,31	55.900	85,69	47.900	7.999
8	690.000	24.700	74.100	10,73	55.900	89,27	49.901	5.998
9	690.000	24.700	49.400	7,16	55.900	92,84	51.897	4.002
10	690.000	24.700	24.700	3,57	55.900	96,43	53.904	1.995
Ukupno		247.000			559.000		454.695	100.306

Dobit investitora uz plan podjele dobiti između Crne Gore i investitora za 10 godina iznosi 20.967,6/270.000=7,76%.

10. REDOSLJED IZGRADNJE SISTEMA

Zavisno od rezultata koji će se dobiti dodatnim istraživanjima utvrđivaće se dinamika i redosljed izgradnje objekata na sistemu gornjih horizonata rijeke Zete. Očekujemo da će prioritetan objekat biti brana za akumulaciju Orlovo gnijezdo 2 sa kotom preliva 1.250mm. Realizacijom izgradnje brane stvaraju se uslovi da se smanje gubici vode u Vrtcu koji nastaju od poplavnog talasa rijeke Zete, preliva Krupca i Slanog kao i bolje korišćenje vode rijeke Gračanice i međusliva. Budući da je velikim dijelom godine na mjestu gradnje brane korito suvo ne treba graditi zagat niti obilazni tunel. Značajna količina materija za izgradnju brane dobija se izgradnjom tunela kroz planinu Vojnik prema Šavniku i tunela kroz planinski masiv Studena prema Nikšiću. Brana i tuneli imaju veliki značaj i zbog skraćanja puta prema Šavniku, Žabljaku, čime se ostvaruje izuzetno dobro povezivanje centralnog i sjevernog područja Crne Gore. Pored navedenih prednosti od posebnog značaja je izbjegavanje planinskog prevoja na planini Vojnik čija je nadmorska visina 1.650mm.

Za formiranje akumulacija potrebno je pored izgradnje navedenih brana čitavom dužinom Glogovog potoka i Surdupa ugraditi sloj gline prosječne širine 40m i debljine oko 1m da se spriječi oticanje po dnu akumulacija, budući da je na čitavoj dužini navedenih tokova intenzivno podzemno oticanje.

11. EKOLOŠKI ASPEKT

Ukupna površina koja bi se našla pod vodom izgradnjom akumulacija na gornjim horizontima rijeke Zete iznosi oko 3,5km², dok bi se spriječilo od periodičnog plavljenja samo na području Nikšićkog polja 23km². Potopljeno zemljište nema bilo kakvu tržišnu vrijednost što ilustruje činjenica da nema zahtjeva za kupovinu zemljišta. Izgradnja vještačkih jezera u ovom području uslovlila bi visok rast vrijednosti okolnog zemljišta što bi moglo, da pored pozitivnih efekata, izazove naglu nekontrolisanu izgradnju objekata što treba spriječiti blagovremenom izradom projektne dokumentacije i planskog razvoja.

Vještačka jezera treba graditi tako da se maksimalno unapređuje ambijent u čemu prednost treba dati zemljanim nasutim branama u odnosu na betonske brane. Vremenom će se pokazati da ovakva jezera imaju prednost u odnosu na postojeća lednička jezera koja su podložna procesu nestajanja dok stalnost nivoa projektovanih jezera obezbjeđuju reverzibilne elektrane.

Izgradnjom projektovanog sistema daće se veliki doprinos korišćenju brojnih povremenih vrela i tokova širom Crne Gore i Evrope. Nemjerljiv doprinos će biti i u praktičnoj eliminaciji poplava u nizvodnim područjima sve do ulivanja u jezera, mora.

Kontrolisanim naseljavanjem spriječiće se odliv stanovništva sa ovih prostora i smanjiti nepoželjan pritisak na gradska područja.

12. ŠIRI ASPEKT RAZMATRANE PROBLEMATIKE

U Evropi, pa samim tim i u Crnoj Gori, do skoro povremeni izvori i rječni tokovi nijesu izučavani saglasno njihovom značaju. Vodna tijela koja pripadaju povremenim rijekama i izvorima čine preko 50% tla Evrope [7]. Problem je još veći kada se uzme u obzir da svjedočimo činjenici da mnoga vrela, izvori i rijeke od stalnih prelaze u kategoriju povremenih. Imajući navedeni problem u vidu formiran je konzorcijum SMIRES (Science and Management of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams, www.smires.eu) sa zadatkom da sakupi i objedini rasute podatke o povremenim tokovima izvora i rijeka širom Evrope.

Od brojnih vrsta podataka posebno su značajni hidrološki, ekološki, biogeohemijski i društveni. Program je podržao COST (European Cooperation in Science and Technology, www.cost.eu) i uključio je brojne institucije i naučnike širom Evrope što je omogućilo izdavanje priručnika za

jedinstveno tretiranje navedene problematike na području Evrope. Priručnik pod naslovom “Intermittent rivers and ephemeral streams handbook (2020)” je veoma obiman i na 181 strana omogućava kvalitativnu i kvantitativnu valorizaciju ovog izuzetno važnog resursa.

Cilj ovog rada je da naglasi da relevantne institucije i naučni radnici u Crnoj Gori posvete posebnu pažnju na promjenu pristupa rješavanju kvalitativnih i kvantitativnih problema vezano kako za stalne tokove vrela, izvora i rijeka tako i onih interinentnog karaktera.

13. ZAKLJUČAK

Predloženi koncept novog pristupa valorizaciji hidro potencijala gornjih horizonata rijeke Zete, između ostalog, daje više pozitivnih efekata od kojih ističemo kao najznačajnije:

1. Značajna proizvodnja električne energije po osnovu dotoka i po osnovu reverzibilnog rada;
2. Značajno povećanje proizvodnje na nizvodnim elektranama;
3. Smanjenje poplava u Nikšićkom polju, području donje Zete i Skadarskog jezera;
4. Značajno povećanje vrijednosti zemljišta duž nove saobraćajnice Nikšić-Šavnik;
5. Dvostruko smanjenje rastojanja Nikšić-Šavnik, na 22km u odnosu na postojećih 45km;
6. Saobraćajnica Nikšić-Šavnik postala bi ekskluzivni bulevar;
7. Značajan doprinos integraciji prostora i povezivanja južnog, centralnog i sjevernog područja Crne Gore.

LITERATURA

1. Trading economics, 2022 /tradingeconomics.com/country-list/precipitation?continent=europe
2. Kaluđerović M. “Prevođenje poplavnog talasa rijeke Zete u Krupac i Slano”, Ing komora CG, Pogled br. 20
3. Prema European Association to Regulate Energy (EASE), Energy Stored Capacities 2020- 2050, str. 2
4. Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage European Commission 2013
5. IRENA, Renewable Power Generation Costs IN 2022
6. Kaluđerović M, Upoređenje ključnih ambijentalnih, tehničkih i ekonomskih parametara klasičnih HE i RHE na primjeru valorizacije hidro potencijala rijeke Pive, Drugi dani SKEI Crne Gore, Zborni radova str. 89-103
7. Intermittent rivers and ephemeral streams handbook (2020), COST (European Cooperation in Science and Technology, www.cost.eu

FUNKCIONISANJE DAN-UNAPRIJED TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE U CRNOJ GORI I ZEMLJAMA U REGIONU SA OSVRTOM NA TRŽIŠNO POSLOVANJE EPCG A.D.

Božana Miljanić-Marušić, Maja Rašković

EPCG A.D. Nikšić

KRATAK SADRŽAJ

Organizovano tržište električne energije doprinosi razvoju konkurentskih odnosa između učesnika na tržištu električne energije. Berza električne energije predstavlja osnovni oblik organizovanog tržišta električne energije. Fokus u ovom radu je na razvoju i funkcionisanju dan unaprijed tržišta električne energije u Crnoj Gori i u zemljama u regionu, sa posebnim osvrtom na učešće kompanije EPCG A.D. na dan-unaprijed tržištu električne energije.

U radu će biti prikazani podaci o funkcionisanju berzi nakon uspješnog pokretanja dan-unaprijed tržišta u Rumuniji, Mađarskoj, Sloveniji, Bugarskoj, Hrvatskoj, Srbiji, Crnoj Gori, Sjevernoj Makedoniji, Albaniji i Kosovu. Podaci o prometu električne energije i realizovanim cijenama band energije na dan-unaprijed tržištu, podaci o broju registrovanih učesnika, te specifikacija produkata koji su karakteristični za trgovinu na pomenutim berzama električne energije biće predstavljeni u radu.

Ključne riječi: Berza električne energije, Dan-unaprijed tržište, Tržište električne energije

1. UVOD

Proces deregulacije elektroenergetskog sektora doprinio je uvođenju tržišnih principa i konkurentnosti u elektroprivrednoj djelatnosti. Proces deregulacije započinje razdvajanjem djelatnosti elektroprivrednih kompanija, koje su poslovale po principima monopola. Proizvodnja i snabdijevanje, kao potencijalno tržišne djelatnosti se razdvajaju od djelatnosti prenosa i distribucije električne energije, za koje se smatra da predstavljaju prirodne monopole.

Tržište električne energije je tržište na kojem se odvija organizovana razmjena ponuda za prodaju i ponuda za kupovinu električne energije u različitim vremenskim okvirima. Tržište električne energije se može najjednostavnije klasifikovati kao bilateralno i organizovano, pri čemu se na ovim tržištima električna energija može trgovati sa fizičkom isporukom (robno tržište) ili bez fizičke isporuke (finansijsko tržište). Na bilateralnom tržištu električne energije trgovina se zasniva na bilateralnim ugovorima između učesnika na tržištu električne energije direktno ili preko brokerskih platformi, pri čemu detalji ugovora su poznati isključivo ugovorenim stranama. Organizovano tržište električne energije predstavlja tržišni mehanizam, koji karakteriše procedura trgovanja i uslovi za rad koji su definisani uspostavljenim tržišnim pravilima. Nasuprot bilateralnom tržištu, na berzama električne energije zainteresovane strane dostavljaju ponude za kupovinu i prodaju električne energije, pri čemu kao rezultat se dobija jedinstvena transparentna cijena, koja je poznata svim učesnicima na tržištu električne energije. Na berzama se trguje standardnim profilima, pri čemu se ne nudi veliki izbor ugovora, dok na bilateralnom tržištu električne energije postoji veliki broj različitih ugovora.

Na nivou Evropske unije teži se uspostavljanju jedinstvenog evropskog tržišta električne energije. Proces povezivanja dan-unaprijed tržišta električne energije započeo je 2006. godine, povezivanjem dan-unaprijed tržišta Belgije, Francuske i Holandije, s ciljem optimalnog korišćenja prekograničnih prenosnih kapaciteta i povećanjem likvidnosti nacionalnih berzi električne energije [1]. Od država članica se zahtijeva imenovanje jednog ili više nominovanih operatora tržišta („Nominated Electricity Market Operator“ - NEMO), čija je obaveza povezivanje dan-unaprijed i unutardnevnih tržišta u jedinstvena panevropska tržišta električne energije [2]. Regionalna integracija organizovanih tržišta dan-unaprijed vrši se putem SDAC („Single Day-ahead Coupling“) platforme, dok se za organizovana unutardnevna tržišta vrši putem SIDC („Single Intraday Coupling“) platforme [3,4].

Elektroprivreda Crne Gore A.D. Nikšić (EPCG A.D.) je nacionalna energetska kompanija u Crnoj Gori, čije su djelatnosti proizvodnja i snabdijevanje električnom energijom, kupoprodaja električne energije, izgradnja i održavanje elektroenergetskih objekata, projektovanje i nadzor i druge djelatnosti, kako je definisano Statutom EPCG A.D. [5]. U EPCG A.D. u Sektoru za kratkoročno planiranje i trgovinu, u okviru Direkcije za upravljanje energijom, obavljaju se poslovi izrade i optimizacije voznih redova elektrana i trgovina za dan-unaprijed i unutardnevna trgovina. Trenutno, EPCG A.D. svoje manjkove ili viškove nabavlja ili plasira na bilateralnom i organizovanom tržištu električne energije. EPCG A.D. je aktivni učesnik na organizovanim elektroenergetskim tržištima u Crnoj Gori, Srbiji, Hrvatskoj i Mađarskoj.

Cilj ovog rada je da se prikaže razvoj dan-unaprijed tržišta i trgovina na berzama električne energije u zemljama u okruženju i u Crnoj Gori, sa posebnim osvrtom na učešće nacionalne elektroprivredne kompanije u Crnoj Gori na dan-unaprijed tržištu električne energije, koja svoje poslovanje usklađuje sa procesom liberalizacije tržišta električne energije.

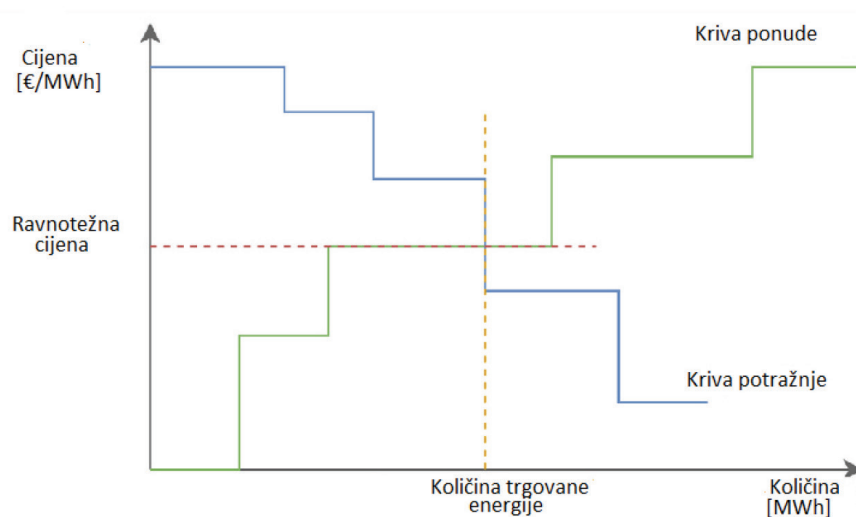
Rad je organizovan u četiri cjeline, uključujući zaključna razmatranja. U uvodnom dijelu dat je kratak osvrt na osnovne karakteristike tržišta električne energije sa prikazom razlika između bilateralnog i organizovanog tržišta. U drugoj cjelini predstavljeno je funkcionisanje berzi električne energije u zemljama u regionu i Crnoj Gori. Berze električne energije koje su u fokusu rada su OPCOM (Rumunija), HUPX (Mađarska), BSP (Slovenija), IBEX (Bugarska), CROPEX (Hrvatska), SEEPEX (Srbija), MEPX (Crna Gora), MEMO (Sjeverna Makedonija) i ALPEX (Albanija i Kosovo). Poslovanje EPCG A.D. na organizovanom dan-unaprijed tržištu električne energije prikazano je u trećoj cjelini. Četvrta cjelina sadrži zaključna razmatranja.

2. DAN-UNAPRIJED TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE

2.1. Trgovina na organizovanom dan-unaprijed tržištu električne energije

Dan-unaprijed trgovina na berzama električne energije odvija se kroz središnju aukciju, koja se održava svakog dana (dan D) za isporuku električne energije za sljedeći dan (dan D+1). Svaki učesnik, koji je registrovan kod berze, obavezuje se da poštuje pravila koja su ustanovljena od strane berze. Vrijeme podnošenja ponuda, kao i objavljivanje rezultata tačno su specificirani pravilima koje uspostavlja berza, pri čemu ta pravila mogu da variraju za različite berze. Takođe, specifikacija dostupnih produkata za trgovinu za određenu berzu, te maksimalne i minimalne cijene za trgovinu i korak sa kojim se trguje ustanovljeni su pravilima berze. Berza, odnosno klirinška kuća, preuzima rizik u slučaju da kupac nije izmirio svoju obavezu prema prodavcu. Berza električne energije se obavezuje se da će izmiriti dugovanje, pri čemu svoje poslovanje berza osigurava putem depozita koji se naziva margina.

Na dan-unaprijed tržištu pravilo jedinstvene cijene se koristi za proračun ravnotežne cijene za svaki sat za dan D+1. Cijena, za svaki sat za dan D+1 određuje se na osnovu svih naloga za kupovinu i prodaju od strane registrovanih članova berze električne energije, formiranjem sumarne krive ponude (sa ponuđenim cijenama u rastućem redosljedu) i sumarne krive potražnje (sa ponuđenim cijenama u opadajućem redosljedu). Tačka presjeka sumarnih krivih za određeni sat trgovanja za dan D+1 predstavlja ravnotežnu odnosno tržišnu cijenu. Drugi krug podnošenja ponuda se organizuje u slučaju da se sumarna kriva ponude i sumarna kriva potražnje ne sijeku. Na sljedećoj slici (Slika 1.) prikazano je formiranje ravnotežne cijene prema Pravilu jedinstvene cijene.



Slika 1. Formiranje ravnotežne cijene električne energije

Prilikom dostavljanja ponuda u unaprijed definisanom vremenu, potrebno je da učesnik precizira karakteristike ponude: tip ponude (kupovina/prodaja), sati na koje se ponuda odnosi, količina energije i minimalna/maksimalna cijena po kojoj učesnik želi da proda/kupi električnu energiju. Ponude su ograničene maksimalnom i minimalnom cijenom trgovanja, pri čemu ove cijene mogu da variraju u zavisnosti od berze na kojoj se trguje.

Regionalno povezivanje tržišta dan-unaprijed zasnovano je na projektu PCR („Price Coupling of Regions“) [6]. Ovim projektom razvijen je jedinstveni algoritam za upravljanje tržištem i određivanje cijena, poznat kao EUPHEMIA („Pan-European Hybrid Electricity Market Integration Algorithm“) [7]. Na sljedećoj slici (Slika 2.) prikazane su zemlje koje su dio SDAC projekta [1].

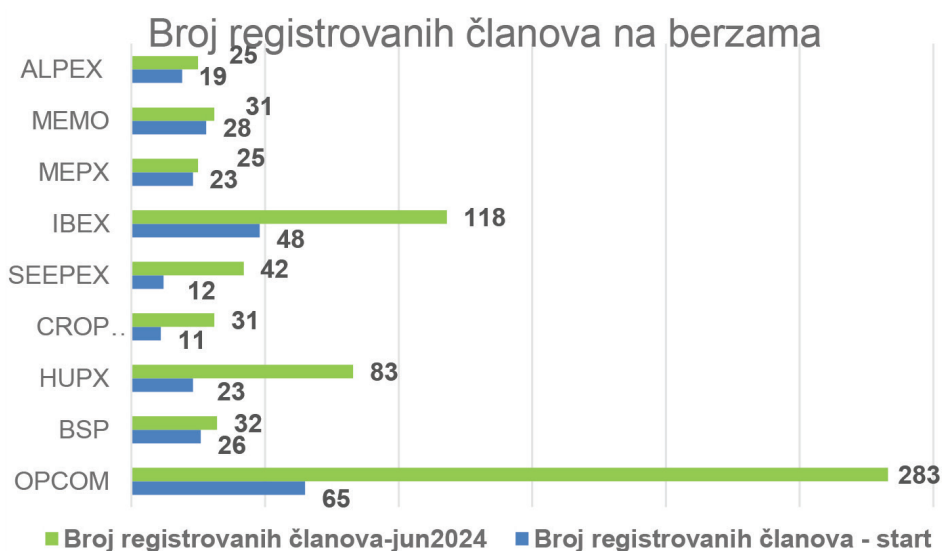


Slika 2. SDAC zemlje članice

Prema posljednjim informacijama, SDAC pokriva 27 evropskih zemalja, 40 operatora prenosnih sistema i 98,6 % potrošnje električne energije u Evropskoj uniji [1].

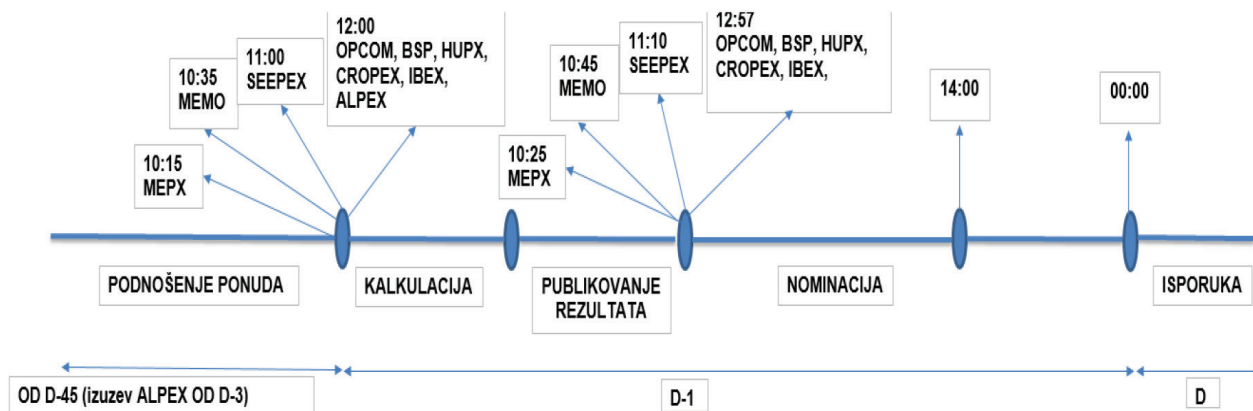
2.2. Trgovina na berzama koje su u fokusu u ovom radu

Za trgovinu na berzi potrebno je da učesnik uspješno završi proces registracije. Na sljedećoj slici (Slika 3.) za berze koje su u fokusu ovog rada, prikazani su podaci o broju registrovanih članova na kraju godine kada je uspješno pokrenuto dan-unaprijed tržište električne energije i podaci o broju registrovanih članova u junu 2024. godine [8-16].



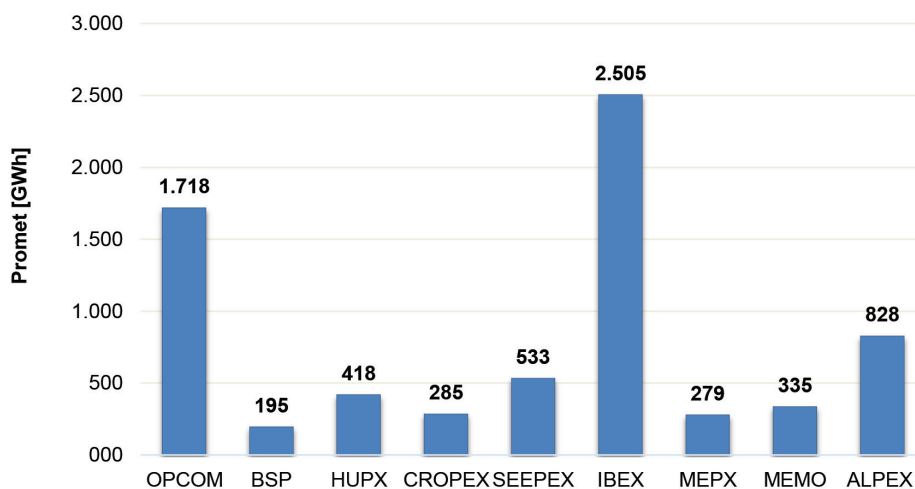
Slika 3. Broj registrovanih članova na berzama električne energije

Kao što je naglašeno u 2.1. vrijeme podnošenja ponuda, te objava rezultata variraju od berze do berze. Na sljedećoj slici (Slika 4.) prikazani su podaci o uspostavljenim vremenima dostavljanja ponuda, vremenu kalkulacija, objavljivanju rezultata, te nominaciji dan-unaprijed za isporuku električne energije za dan za koji se aukcija održava prema pravilima berzi.



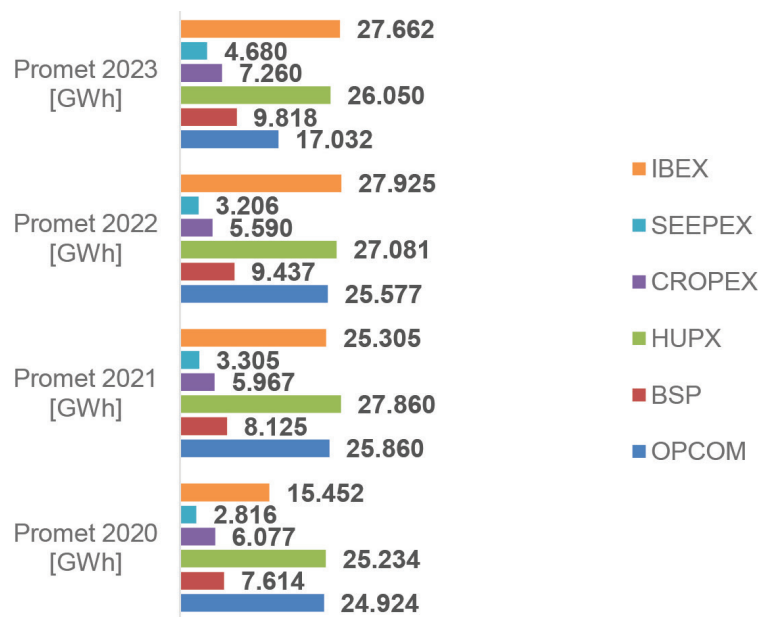
Slika 4. Ustanovljeni vremenski okvir prilikom učešća na berzama električne energije

Uspješno pokretanje dan-unaprijed tržišta električne energije praćeno je nesigurnošću za učesnike na tržištu, u smislu da li će uspjeti da kupe ili prodaju željene količine. Sve berze na početku svog operativnog rada suočavaju se sa problemom likvidnosti. Na sljedećoj slici (Slika 5.) prikazani su podaci o ostvarenom prometu za godinu u kojoj je uspješno pokrenuto dan-unaprijed tržište električne energije.

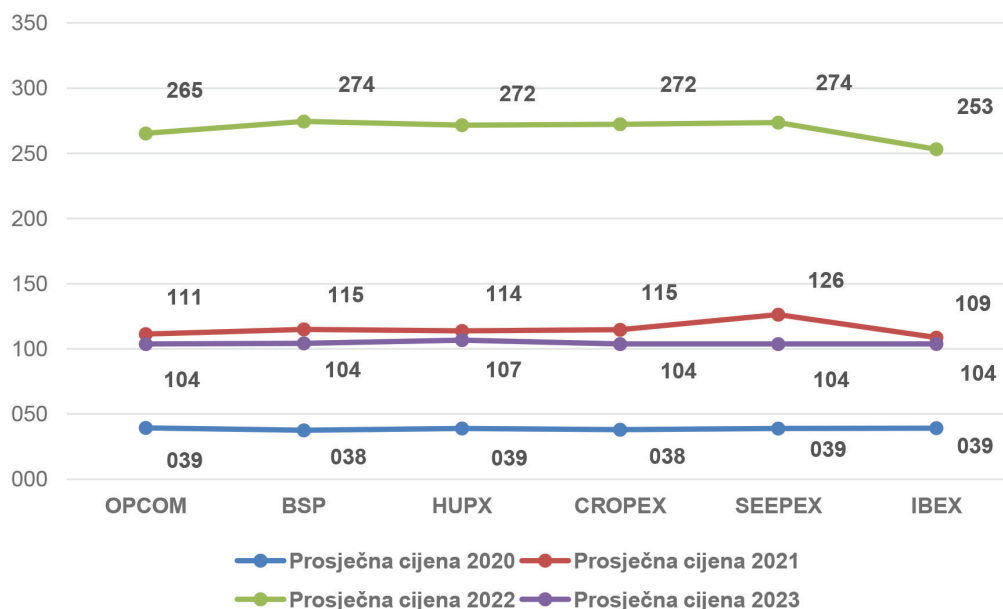


Slika 5. Ostvareni promet električne energije u godini pokretanja dan-unaprijed tržišta električne energije

Mogućnost povećavanja likvidnosti na dan-unaprijed tržištu ostvaruje se povezivanjem sa susjednim berzama, odnosno kroz projekat SDAC. Za berze koje su u fokusu ovog rada, na sljedećim slikama (Slika 6. i Slika 7.) predstavljeni su podaci o prometu i prosječnim godišnjim band cijenama električne energije respektivno, za period od 2020. do 2023. godine [8-13]. Berze koje su pokretanje dan-unaprijed tržišta uspješno realizovale u 2023. godini (ALPEX, MEPX i MEMO) izuzete su sa Slike 6. i Slike 7, jer su podaci prikazani na Slici 5.



Slika 6. Ostvareni promet električne energije za period od 2020. do 2023. godine



Slika 7. Prosječne godišnje cijene band energije za period od 2020. do 2023. godine

Tokom posljednje četiri godine tržište električne energije bilo je izloženo velikim turbulencijama, usljed globalnih poremećaja koji su izazvani pandemijom korona virusa i ratom u Ukrajini. Značajne varijacije u cijenama električne energije mogu se uočiti na Slici 7. Dodatno, na cijene električne energije značajan uticaj ima razvoj elektroenergetskog sektora tj. povećanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, povećanje prenosnih kapaciteta ili otvaranje novih tržišta. Pojava negativnih cijena, naročito tokom sati u kojima puni solarni potencijal dolazi do izražaja sve je češća pojava na tržištu električne energije.

U nastavku će biti opisane osnovne karakteristike berzi koje su u fokusu ovog rada.

2.2.1. OPCOM

Prva berza u regionu Jugoistočne Evrope koja je uspješno započela operativni rad je berza sa sjedištem u Bukureštu, u Rumuniji. U avgustu 2000. godine osnovana je berza OPCOM, kao podruž-

nica akcionarskog društva Transelectrica S.A. (Rumunski operator prenosnog sistema). Danas, u vlasničkoj strukturi osim Transelectrice, koja ima udio od 97.84%, udio od 2.16% ima država Rumunija, čiji je predstavnik Ministarstvo ekonomije [8].

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi OPCOM startovao je 30. juna 2005. godine, sa prvim danom isporuke za prvi jul 2005. godine. Na OPCOM berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je - 500€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000€/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.01 lei/MWh (korak trgovanja). Za svaki dan se na sajtu berze objavljuje odnos lei i €.

OPCOM ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Rumuniji i povezana je sa tržištem u Mađarskoj (2014) i Bugarskoj (2021).

2.2.2. BSP

U januaru 2008. godine osnovana je berza BSP Southpool, sa sjedištem u Ljubljani, u Sloveniji [9]. Osnivači ove berze su BORZEN sa udjelom od 51% i EUREX sa udjelom od 49%. Vlasnička struktura je izmijenjena od osnivanja, pa sada 100% udio u vlasničkoj strukturi ima Slovenački operator prenosnog sistema (ELES).

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi BSP Southpool startovao je 25. marta 2010. godine, sa prvim danom isporuke za 26. mart 2010. godine. Na BSP berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je - 500€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000€/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.1€/MWh (korak trgovanja).

BSP ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Sloveniji. BSP je povezana je na svim svojim granicama. BSP je povezana sa Italijom (2011), Austrijom (2016), Mađarskom (2018) i Hrvatskom (2022).

2.2.3. HUPX

Od strane Mađarskog operatora prenosnog sistema (MAVIR) 2010. godine, osnovana je HUPX berza sa sjedištem u Budimpešti [10]. Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi HUPX startovao je 20. jula 2010. godine, sa prvim danom isporuke za 21. jul 2010. godine. Na HUPX berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je - 500€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000€/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.1€/MWh (korak trgovanja).

HUPX ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Mađarskoj. Povezana je sa Slovačkom (2013), Rumunijom (2014), Slovenijom (2018), Austrijom (2021) i Hrvatskom (2022).

2.2.4. CROPEX

Hrvatska burza električne energije D.O.O. (CROPEX) osnovana je u maju 2014. godine od strane Hrvatskog operatora tržišta energije D.O.O. (HROTE) i Hrvatskog operatora prijenosnog sustava d.d. (HOPS), sa sjedištem u Zagrebu, u Hrvatskoj [11]. Skupštinu CROPEX-a čine HROTE 50% i HOPS 50%.

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi CROPEX startovao je 10. februara 2016. godine, sa prvim danom isporuke za 11. februar 2016. godine. Na CROPEX berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je - 500€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000€/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.01€/MWh (korak trgovanja).

CROPEX ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Hrvatskoj i povezana je sa Mađarskom (2022) i Slovenijom (2022).

2.2.5. SEEPEX

U julu 2015. godine osnovana je berza električne energije SEEPEX sa sjedištem u Beogradu, u Srbiji [12]. SEEPEX berza je registrovana kao akcionarsko društvo od strane JP EMS sa vlasničkim udjelom od 75% i EPEX SPOT sa vlasničkim udjelom od 25%.

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi SEEPEX startovao je 17. februara 2016. godine, sa prvim danom isporuke za 18. februar 2016. godine. Na SEEPEX berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je 0€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000 €/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.01€/MWh (korak trgovanja).

SEEPEX ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Srbiji. Spajanje sa susjednim granicama još uvijek nije realizovano.

Prva regionalna berza električne energije za Centralnu i Jugoistočnu Evropu, zvanično je uspostavljena u decembru 2022. godine, sa sjedištem u Ljubljani, u Sloveniji. Alpsko-jadransko dunavska berza električne energije (ADEX) osnovana je od strane kompanija ELES, EMS i EPEX SPOT. AD. Korporativnim spajanjem BSP Southpool-a i SEEPEX-a, formirana je ADEX berza. Dodatno, ADEX grupi u drugoj polovini 2024. godine pridružuje se HUPX berza. BSP, HUPX i SEEPEX ostaju operateri svojih tržišta, zadržavaju svoju licencu za berzu električne energije kao i NEMO licencu. Sjedište ADEX-a će biti Budimpešta. Očekuje se da će rezultat ovog ujedinjavanja berzi podstaći energetska tranziciju i imati pozitivan uticaj na spajanje tržišta.

2.2.6. IBEX

U januaru 2014. godine osnovana je Bugarska berza električne energije sa sjedištem u Sofiji, u Bugarskoj [13]. Osnovana je kao potpuno zavisna kompanija od strane Bugarskog energetskog holdinga (BEH). Vlasnička struktura je promijenjena u februaru 2018. godine, pa je vlasništvo preuzela Bugarska berza (BSE).

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi IBEX startovao je 19. januara 2016. godine, sa prvim danom isporuke za 20. januar 2016. godine. Na IBEX berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je - 500€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000€/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.01€/MWh (korak trgovanja).

IBEX ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Bugarskoj, i povezana je sa Rumunijom (2021) i Grčkom (2021).

2.2.7. MEPX

Privredno društvo Berza električne energije DOO (BELEN ili MEPX) osnovano je u junu. 2017. godine, od strane Crnogorskog operatora tržišta D.O.O. (COTEE), Crnogorskog elektroprenosnog sistema A.D. (CGES) i EPCG A.D. [14].

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi MEPX startovao je 26. maja 2023. godine, sa prvim danom isporuke za 27. maj 2023. godine. Na MEPX berzi moguće je dostavljati linearne ponude, dok blok ponude još uvijek nijesu ponuđene registrovanim korisnicima. Na MEPX berzi, minimalna ponuđena cijena je 0€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 2.000€/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.1 €/MWh (korak trgovanja).

MEPX ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Crnoj Gori. Spajanje sa susjednim tržištima još uvijek nije realizovano. Od strane MEPX berze, najavljuje se spajanje sa tržištem električne energije u Italiji.

2.2.8. MEMO

Za upravljanje berzanskim aktivnostima u Sjevernoj Makedoniji zadužen je Nacionalni operator tržišta električne energije – MEMO DOOEL-Skopje (MEMO), koji ima status nominovanog operatora tržišta električne energije Sjeverne Makedonije. MEMO je osnovan 2018. godine od strane Operatora prenosnog sistema Republike Sjeverne Makedonije (AD MEPSO) sa sjedištem u Skoplju, u Makedoniji [15]. Prije nego je postao nezavisna kompanija MEMO je poslovao kao podružnica koja je obavljala aktivnosti organizovanja i upravljanja tržištem električne energije. Od oktobra 2019. godine MEMO posluje nezavisno na teritoriji Republike Sjeverne Makedonije.

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi MEMO startovao je 10. maja 2023. godine, sa prvim danom isporuke za 11. maj 2023. godine.

Na MEMO berzi moguće je dostavljati linearne ponude. Minimalna ponuđena cijena je 0.1MKD/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 50.000MKD/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.1MKD/MWh (korak trgovanja).

Spajanje sa susjednim tržištima još uvijek nije realizovano.

2.2.9. ALPEX

U skladu sa ugovorom o osnivanju zajedničkog tržišta između Albanije i Kosova, u oktobru 2020. godine Operator prenosnog sistema Kosova (KOST) i Operator prenosnog sistema Albanije (OST) su popisali ugovor za osnivanje Albanske berze ALPEX sh.a. [16]. Sjedište ALPEX berze je u Tirani, u Albaniji.

Operativni rad „dan-unaprijed“ tržišta na berzi ALPEX startovao je 11. aprila 2023. godine, sa prvim danom isporuke za 12. april 2023. godine. Na ALPEX berzi moguće je dostavljati linearne i blok ponude. Minimalna ponuđena cijena je - 500€/MWh, maksimalna ponuđena cijena je 4.000 €/MWh. Jedinična cijena koja se koristi iznosi 0.01€/MWh (korak trgovanja).

ALPEX ima status nominovanog operatora tržišta električne energije u Albaniji i Kosovu, pri čemu povezivanje sa susjednim tržištima nije realizovano.

3. UČEŠĆE EPCG A.D. NA DAN-UNAPRIJED TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE

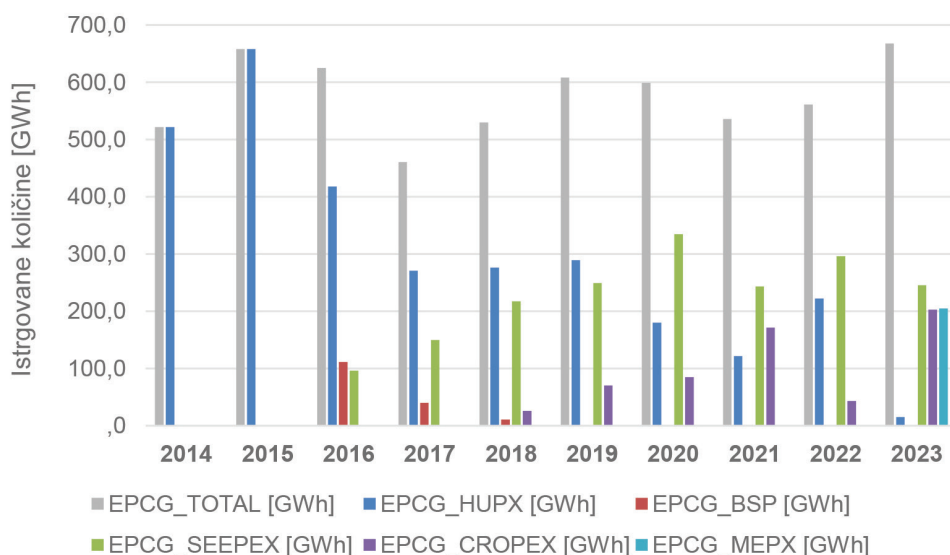
U Crnoj Gori je zvanično prvog januara 2009. godine otvoreno tržište električne energije [17]. COTEE je u decembru 2011. godine zvanično dobio licencu za vršenje djelatnosti operatora tržišta električne energije u Crnoj Gori.

EPCG A.D. je tržišno orijentisana kompanija, prisutna na više tržišta električne energije, koja pokušava optimizovati proizvodnju iz svojih elektrana maksimizujući ukupni profit. Aktivnosti EPCG A.D. na dan-unaprijed tržištima u Crnoj Gori, Srbiji, Hrvatskoj i Mađarskoj se realizuju direktno ili indirektno, koristeći „market access“ usluge od kompanija koje se bave trgovinom električne energije.

Trgovina na berzama električne energije u regionu u EPCG A.D. započela je u julu 2013. godine, kada je u proces trgovine uključena kćerka firma EPCG D.O.O. koja je registrovana u Srbiji, kako bi bila uspostavljena saradnja sa kompanijama koje pružaju market access uslugu za pristup HUPX berzi. Sve do 2016. godine trgovina električne energije na berzama u EPCG A.D. se odvijala isključivo na HUPX berzi. Slijedi indirektni pristup BSP berzi i SEEPEX berzi 2016. godine. Od 2018. godine EPCG A.D. je indirektno prisutna na CROPEX berzi.

Na osnovu instrukcija Direkcije za upravljanje energijom, kćerka firma EPCG D.O.O. je postala aktivni učesnik na dan-unaprijed tržištu na SEEPEX berzi od juna 2022. godine. EPCG A.D. je registrovana na MEPX berzi, za trgovinu na dugoročnom i dan-unaprijed tržištu električne energije.

Na sljedećoj slici (Slika 8.) prikazani su podaci o istrgovanim količinama EPCG A.D. na berzama električne energije za period od 2014. do 2023. godine.



Slika 8. Trgovina EPCG A.D. na berzama električne energije

U sljedećoj tabeli (Tabela 1.) prikazan je procentualni udio učešća kompanije EPCG A.D. u ukupnom prometu na dan-unaprijed tržištu električne energije na berzama električne energije za period od 2020. do 2023. godine.

Godina	HUPX	SEEPEX	CROPEX	MEPX
2020	0.71%	11.88%	1.39%	-
2021	0.44%	7.36%	2.87%	-
2022	0.82%	9.23%	0.77%	-
2023	0.06%	5.24%	2.79%	73.49%

Tabela 1. Procentualni udio EPCG A.D. u ukupnom prometu na berzama

Zaključak koji se može izvesti na osnovu podataka ilustrovanih u Tabeli 1 je taj da je udio EPCG A.D. dominantan u prometu na MEPX berzi, dok je na ostalim berzama značajno manji, čak i neznan što je slučaj sa HUPX berzom.

Dodatno, važno je napomenuti da u cilju optimizacije svoje proizvodnje i postizanja boljeg finansijskog efekta, EPCG A.D. je registrovana na SEEPEX intraday tržištu i ima read-only pristup CROPEX intraday tržištu.

Strategije za kupovinu i prodaju električne energije na berzama električne energije razvijale su se u skladu sa razvojem okolnih tržišta i tržišta u Crnoj Gori. U EPCG A.D. razmatrana je opcija registracije kćerke kompanije u nekoj od zemalja Evropske unije, čime bi bio omogućen pristup svim tržištima električne energije u Evropskoj uniji odnosno bila bi omogućena registracija na berzama električne energije. Dodatno, time bi se potencijalno omogućilo da EPCG A.D. učestvuje kao snabdjevač. Pokazatelji o kupovinama i nabavkama koje treba da se realizuju na godišnjem nivou, te garancije koje je potrebno položiti na berzi električne energije, aukcijskim kućama i operatorima prenosnih sistema ukazali su da u ovom periodu nije opravdano izvršiti registraciju kompanije u nekoj zemlji Evropske unije. Međutim, opcija ostaje na razmatranju s obzirom na to da se očekuju novi proizvodni pogoni u portfoliju EPCG A.D. Dodatno, razvoj prenosnog sistema tj. interkonektivnih dalekovoda imaće značajan uticaj na razvoj strategija za kupovinu i prodaju električne energije u kompaniji.

4. ZAKLJUČAK

Razvoj konkurentskog tržišta električne energije sa sobom nosi dobijanje pouzdanih cjenovnih signala i nastavak uspješnog procesa energetske tranzicije. Zemlje koje još uvijek nijesu dio povezanog evropskog tržišta električne energije, treba da se usaglase oko regulatornog okvira sa regulativom koja je važeća za zemlje Evropske unije, što predstavlja ključni faktor za nastavak razvoja u domenu tržišta električne energije, do konačnog povezivanja sa jedinstvenim evropskim tržištem (SDAC i SIDC). U radu su predstavljeni osnovni principi i karakteristike organizovanog tržišta električne energije, sa osvrtom na učešće nacionalne elektroprivredne kompanije u Crnoj Gori na tržištu električne energije.

Poslovanje EPCG A.D. u narednom periodu će biti usklađeno sa razvojem tržišta u Crnoj Gori i regionu. S obzirom na to da se očekuje povezivanje crnogorskog i italijanskog tržišta, za EPCG A.D. očekuju se nove mogućnosti. Razvoj elektroenergetskog sektora, te sve veći udio energije dobijene iz obnovljivih izvora, posebno vjetra i sunca, donose nove izazove za poslovanje elektroprivrednih kompanija. EPCG A.D. ima intencije da u svom proizvodnom portfelju poveća udio energije iz obnovljivih izvora. S tim u vezi, planiranje proizvodnje takvih izvora predstavljaće jedan od ozbiljnijih izazova, kome je potrebno posvetiti značajnu pažnju. Takođe, akcenat je potrebno staviti na planiranje potrošnje električne energije, s ciljem da se smanje potrebe za balansiranjem elektroenergetskog sistema.

LITERATURA

1. ENTSO-E, „ENTSO-E Market Report 2023“, Brussels, Belgium, 30 June 2023
2. Commission Regulation (EU) 2015/1222 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management, OJ L 197 25.7.2015, p. 24
3. ENTSO-E, https://www.entsoe.eu/network_codes/cacm/implementation/sdac/ (pristup: 15.07.2024.god.)
4. ENTSO-E, https://www.entsoe.eu/network_codes/cacm/implementation/sidc/ (pristup: 15.07.2024.god.)
5. EPCG, „Prečišćeni tekst Statuta Elektroprivrede bCrne Gore AD Nikšić“, 30.06.2021. god, https://www.epcg.com/sites/epcg.com/files/multimedia/main_pages/files/2020/06/pre-ciscen_tekst_statuta_29829_30.6.2021.pdf
6. PCR Project–Main features, <https://www.nordpoolgroup.com/492d7e/globalassets/download-center/single-day-ahead-coupling/pcr-standard-presentation.pdf> (pristup 15.07.2024.god.)
7. NEMO COMMITTEE, EUPHEMIA Public Description. Single Price Coupling Algorithm, 12th October 2020, <https://www.nemo-committee.eu/assets/files/euphemia-public-description.pdf> (pristup 15.07.2024.god.)
8. OPCOM, <https://www.opcom.ro/acasa/en>
9. BSP, <https://www.bsp-southpool.com/home.html>
10. HUPX, <https://hupx.hu/en/market-data/dam/mc-results>
11. CROPEX, <https://www.cropex.hr/hr/>
12. SEEPEX, <https://seepex-spot.rs/>
13. IBEX, <https://ibex.bg/en/>
14. MEPX, <https://belen-spot.me/>
15. MEMO, <https://www.memo.mk/>
16. ALPEX, <https://alpex.al/>
17. “Pravila za osnivanje i rad tržišta električne energije”, “Službeni list CG”, br. 1 od 9. januara 2009, 54/09, http://www.podaci.net/_gCGO/propis/Pravila_za_osnivanje/P-orteen04v0901-0954.html (pristup 15.07.2024.god.)

NOVI PRISTUPI U MODELOVANJU KOMPONENTI SISTEMA ZA REGULACIJU POBUDE SINHRONE MAŠINE - PRIMJER SINERGIJE NAUKE I PRAKSE

Mihailo Micev, Martin Čalasan

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

KRATAK SADRŽAJ

Predmet istraživanja ovog rada jeste demonstracija novih pristupa u modelovanju i identifikaciji komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronne mašine. Pri tome, akcentat je na izraženoj sinergiji između prakse i nauke, odnosno na značaju posjedovanja eksperimentalno snimljenih rezultata prilikom razvoja novih metoda i pristupa u modelovanju. Preciznije, u radu je najprije pokazan modifikovani standardni pristup za estimaciju parametara sinhronne mašine koristeći ogled trofaznog kratkog spoja. Predloženi pristup je verifikovan koristeći eksperimentalno snimljene talasne oblike struje pobude i struje armature tokom trajanja trofaznog kratkog spoja na hidrogenatoru snage 109.6 MVA u hidroelektrani „Bajina Bašta“. Takođe, demonstriran je novi pristup za estimaciju parametara svih komponenti koje čine sistem za regulaciju pobude sinhronne mašine. Predloženi pristup je baziran na vrlo jednostavnoj testnoj proceduri, koja obezbjeđuje nesmetan i bezbjedan rad mašine. Finalno, u ovom radu su razvijeni modeli bazirani na neuralnim mrežama, pomoću kojih su modelovani najprije sinhroni generator, a zatim i kompletan sistem za regulaciju pobude. Prethodno predloženi pristupi su testirani koristeći eksperimentalno snimljene odzive napona hidrogenatora snage 120 MVA iz hidroelektrane „Piva“.

Ključne riječi: Eksperimentalna mjerenja, Estimacija, Parametri, Pobudni sistem, Sinhrona mašina

1. UVOD

Jedan od najvažnijih zadataka prilikom funkcionisanja elektroenergetskog sistema jeste regulacija napona i tokova reaktivnih snaga. Sinhroni generator, kao najveći proizvođač električne energije u elektroenergetskom sistemu, predstavlja najvažnije naponsko-reaktivno regulaciono sredstvo [1]. Stoga, sistem za automatsku regulaciju pobude, kojim se napon generatora održava

na željenoj vrijednosti, veoma je interesantna i aktuelna tema naučnih istraživanja. U ovom radu posvećena je pažnja prikazu novih razvijenih pristupa za identifikaciju i optimizaciju parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora.

Sinhroni generatori su najvažniji i najveći proizvođači električne energije u elektroenergetskim sistemima. Poznavanje preciznih modela svih komponenti sistema, uključujući i generatora, vrlo je važno prilikom izvođenja studija stabilnosti elektroenergetskog sistema, kao i studija koje se bave planiranjem i radom elektroenergetskog sistema. Uzimajući u obzir veliku važnost poznavanja što preciznijeg modela sinhronog generatora, najprije je neophodno pomenuti standardizovane procedure za određivanje parametara sinhronog generatora – IEEE standard [2] i IEC standard [3]. Takođe, brojni naučni radovi su posvećeni rješavanju problema estimacije parametara sinhronog generatora. U radovima [4] i [5] predložen je unaprijeđen testni metod koji se pominje u standardima i koji je baziran na naglom uklanjanju opterećenja generatora, tzv. *load rejection* metod. Korišćenjem sinhrofazorskih jedinica, odnosno tzv. PMU-a (*Phasor Measurement Unit*), mogu se dobiti podaci o amplitudi i faznom stavu napona u pojedineim čvorovima elektroenergetskog sistema. Na bazi tako dobijenih podataka, razvijene su brojne metode za estimaciju parametara sinhronog generatora [6]-[13]. Nadalje, interesantno je spomenuti i tzv. *standstill* metode, koje su specifične po tome što se rotor generatora ne okreće, već je namotaj pobude kratkospojen, a na stator se dovode specifični signali: *chirp* signali u [14], odnosno *sine cardinal* signali u [15]. Još jedan unaprijeđeni standardizovani ogled, test trofaznog kratkog spoja neopterećenog generatora, predložen je u [16] i [17]. Estimacija parametara generatora korišćenjem mjerenih podataka tokom nesimetričnih radnih uslova predložena je u [18], dok je u [19] demonstriran numerički metod za estimaciju parametara generatora na osnovu talasnog oblika pobudne struje snimljene tokom trofaznog kratkog spoja. Na osnovu podataka dobijenih pomoću prikazanih metoda, primjenom raznih algoritama vrši se estimacija parametara generatora. U ovom radu biće pokazana primjena modifikovanih standardnih testnih procedura za estimaciju parametara sinhronne mašine. Eksperimentalna testna procedura se sastoji od izvođenja trofaznog kratkog spoja na neopterećenom sinhronom generatoru, pri čemu je neophodno snimiti talasne oblike struje pobude i struje armature. Nakon toga, primjenom metaheurističkih algoritama, a na bazi snimljenih talasnih oblika, izvršena je estimacija parametara mašine. Predloženi pristup je eksperimentalno verifikovan na generatoru snage 109.6 MVA u hidroelektrani (HE) „Bajina Bašta“.

Posmatrajući kompletan sistem za automatsku regulaciju napona sinhronne mašine (*AVR – Automatic Voltage Regulation*), u dostupnoj literaturi najčešće se koristi uprošćena šema, prema kojoj AVR sistem čine regulator, pojačavač, pobudnica, generator i senzor [20]-[23]. Pojačavač, pobudnica i senzor su modelovani prenosnom funkcijom prvog reda, dok generator može biti modelovan takođe funkcijom prenosa prvog reda [20]-[22], ali i prenosnom funkcijom trećeg reda, pri čemu se dobija tzv. *Heffron-Phillips* model sinhronog generatora [23]. Značajna prednost primjene *Heffron-Phillips*-ovog modela sinhronog generatora je ta što u pomenutom modelu figurišu realni parametri sinhronne mašine (reaktanse i vremenske konstante), za razliku od modela prvog reda. Stoga, u ovom radu će biti pokazan novi pristup za estimaciju parametara komponenti sistema za automatsku regulaciju napona i to za slučaj kada je generator modelovan prenosnom funkcijom trećeg reda. Takođe, biće izvršena i estimacija realnih parametara sinhronne mašine. Predloženi pristup baziran je na vrlo jednostavnoj testnoj proceduri, koja podrazumijeva eksperimentalno snimanje talasnog oblika napona na izlazu generatora i to u radnom režimu kada se na referentnu vrijednost napona doda step smetnja male amplitude. Eksperimentalna verifikacija će biti pokazana na generatoru snage 120 MVA iz HE „Piva“.

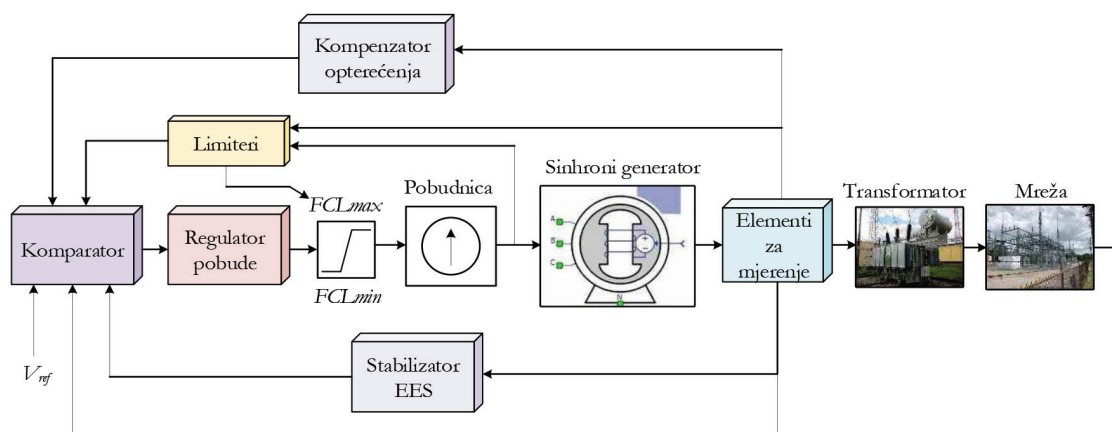
Različiti pristupi za modelovanje kompletnog sistema za automatsku regulaciju napona sinhronne mašine prikazani su u [24]-[28]. Najprije je u [24] pokazana primjena različitih tehnika redukcije sistema u cilju dobijanja prenosne funkcije AVR sistema. Simultana identifikacija parametara sinhronne mašine i njenog pobudnog sistema primjenom genetičkog algoritma pokazana je

u [25]. Prenosna funkcija koja povezuje aktivnu snagu generatora i referentnu vrijednost napona određena je pomoću vještačkih neuralnih mreža u [26]. Takođe, Takagi-Sugeno fuzzy model AVR sistema razvijen je u [27]. U ovom radu će biti pokazana primjena vještačkih neuralnih mreža u cilju modelovanja najprije sinhronog generatora, a zatim kompletnog sistema za regulaciju napona. Setovi podataka za obučavanje i validaciju neuralnih mreža dobijaju se koristeći već opisanu testnu proceduru, koja je eksperimentalno verifikovana na 120 MVA generatoru u HE „Piva“.

Ovaj rad je organizovan na sljedeći način: u drugom poglavlju prikazane su korišćene strukture sistema za regulaciju napona, kao i odgovarajući detalji o eksperimentalnim postavkama, dok je u trećem poglavlju prikazana modifikovana testna procedura za estimaciju parametara generatora na bazi ogleđa trofaznog kratkog spoja. U četvrtom poglavlju demonstriran je novi pristup za određivanje parametara svih komponenti uprošćene šeme sistema za automatsku regulaciju napona, dok je primjenom identične testne procedure u petom poglavlju pokazana primjena vještačkih neuralnih mreža u modelovanju sistema za automatsku regulaciju napona. Na kraju, u zaključku su sumirani prikazani rezultati.

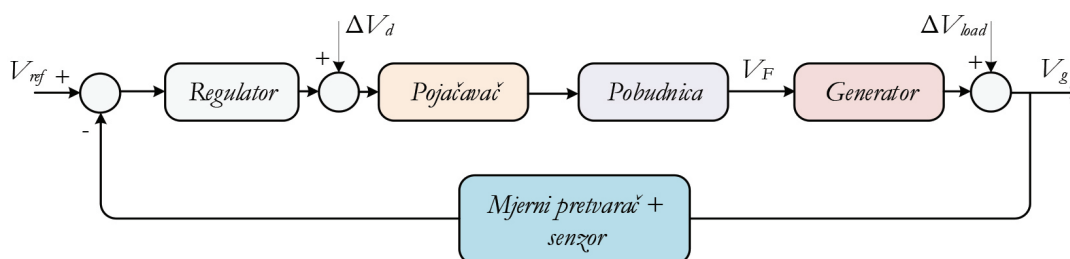
2. SISTEM ZA AUTOMATSKU REGULACIJU POBUDE SINHRONE MAŠINE

Shodno definiciji datoj u [1], sistem za regulaciju pobude sinhronne mašine obuhvata pobudni sistem i sinhronu mašinu, pri čemu pobudni sistem predstavlja izvor struje pobude koja je potrebna u cilju održavanja napona na krajevima mašine na željenoj vrijednosti. Osnovni element pobudnog sistema je pobudnica, koja predstavlja izvor struje pobude. Regulator napona ili regulator pobude je standardni industrijski regulator, sa elementima stabilizacije, mjernim elementom, pomoćnim ulazima, pomoćnim blokovima za formiranje referentnog signala i različitim limiterima. Na slici 1 prikazana je detaljna struktura sistema za regulaciju pobude sinhronne mašine.



Slika 1. Detaljna struktura sistema za regulaciju pobude sinhronne mašine

U ovom radu biće korišćena pojednostavljena šema sistema za automatsku regulaciju pobude, koja je prikazana na slici 2.



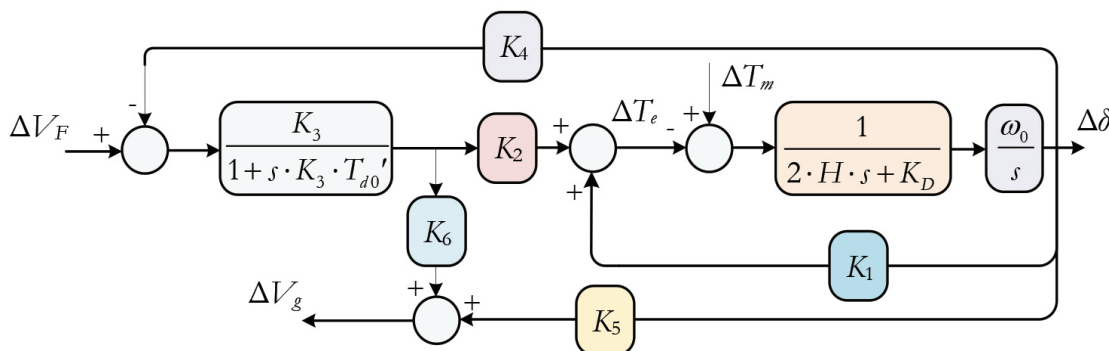
Slika 2. Pojednostavljena šema sistema za regulaciju pobude sinhronne mašine

Kod ovakve reprezentacije sistema za regulaciju pobude, kao što se vidi sa prethodne slike, zanemaren je uticaj svih prethodno opisanih limitera i dodatnih funkcionalnih blokova, kao i dodatnih povratnih sprega. Shodno ovakvoj šemi, signal greške predstavlja razliku između referentne vrijednosti napona i izmjerene vrijednosti napona na krajevima generatora. Takođe, na slici se mogu uočiti i signali poremećaja na upravljački signal ΔV_d i poremećaja opterećenja generatora ΔV_{load} . U normalnom, stacionarnom radnom režimu ovi signali su jednaki 0. Ovako uprošćena struktura se sastoji iz regulatora, pojačavača signala, pobudnice, sinhronog generatora i mjernog pretvarača i senzora koji su objedinjeni u jedan funkcionalni blok. Dodatno pojednostavljenje se odnosi na modelovanje samih komponenti ovako predstavljenog sistema za regulaciju pobude. Naime, u dostupnoj literaturi, svaka komponenta ovog sistema je modelovana sistemom prvog reda, tj. prenosnom funkcijom $W(s)$ koja sadrži pojačanje K i vremensku konstantu T . Ukoliko se za pojačavač usvoji indeks A (*amplifier*), za pobudnicu E (*exciter*), za generator G i za senzorski blok S , tada se pojedine funkcije prenosa za svaku komponentu definišu na sljedeći način [20]-[22]:

$$\begin{aligned} W_A(s) &= \frac{K_A}{1+T_A \cdot s}, & W_E(s) &= \frac{K_E}{1+T_E \cdot s}, \\ W_G(s) &= \frac{K_G}{1+T_G \cdot s}, & W_S(s) &= \frac{K_S}{1+T_S \cdot s}. \end{aligned} \quad (1)$$

U pomenutim radovima u kojima se koristi ovako predstavljena šema sistema za regulaciju pobude, date su i tipične vrijednosti za pojačanja i vremenske konstante: $K_A=10$, $T_A=0.1$, $K_E=1$, $T_E=0.4$, $K_G=1$, $T_G=1$, $K_S=1$ i $T_S=0.01$.

Međutim, u [23] je primijenjen model generatora trećeg reda, odnosno tzv. *Heffron-Phillips-ov* model, koji će biti korišćen u ovom radu. Blok dijagram ovakvog modela generatora dat je na slici 3.



Slika 3. Blok dijagram Heffron-Phillips-ovog modela sinhronog generatora

Naime, ovaj model je izveden linearizacijom u okolini neke radne tačke, pa se stoga može primijetiti da na dijagramu figurišu priraštaji određenih veličina, ispred kojih stoji znak Δ . Takođe, prikazani model generatora ima dva ulaza, ΔV_F (priraštaj napona pobude) i ΔT_m (priraštaj mehaničkog momenta). Kao što je sugerisano u [23], pretpostavlja se da nema promjene mehaničkog momenta generatora, tj. da ΔT_m iznosi 0. Navedena pretpostavka je u potpunosti opravdana uzimajući u obzir činjenicu da se dvije regulacione konture kod sinhronog generatora (aktivna snaga-frekvencija i reaktivna snaga-napon) mogu posmatrati odvojeno. Drugim riječima, promjena momenta na turbini, tj. promjene aktivne snage, imaju zanemarljivo mali uticaj na napon generatora. Na prethodno prikazanom dijagramu, T_{d0}' predstavlja tranzijentnu vremensku konstantu otvorenog kola generatora po d -osi, K_D je faktor prigušenja, H je inerciona konstanta, ω_0 je sinhrona brzina, ΔT_e je priraštaj elektromagnetnog momenta, $\Delta \delta$ je priraštaj ugla rotora, dok su $K_1 - K_6$ konstante *Heffron-Phillips* modela, čije izvođenje je dato u [23].

3. MODIFIKOVANE STANDARDNE TESTNE PROCEDURE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA SINHRONIH MAŠINA

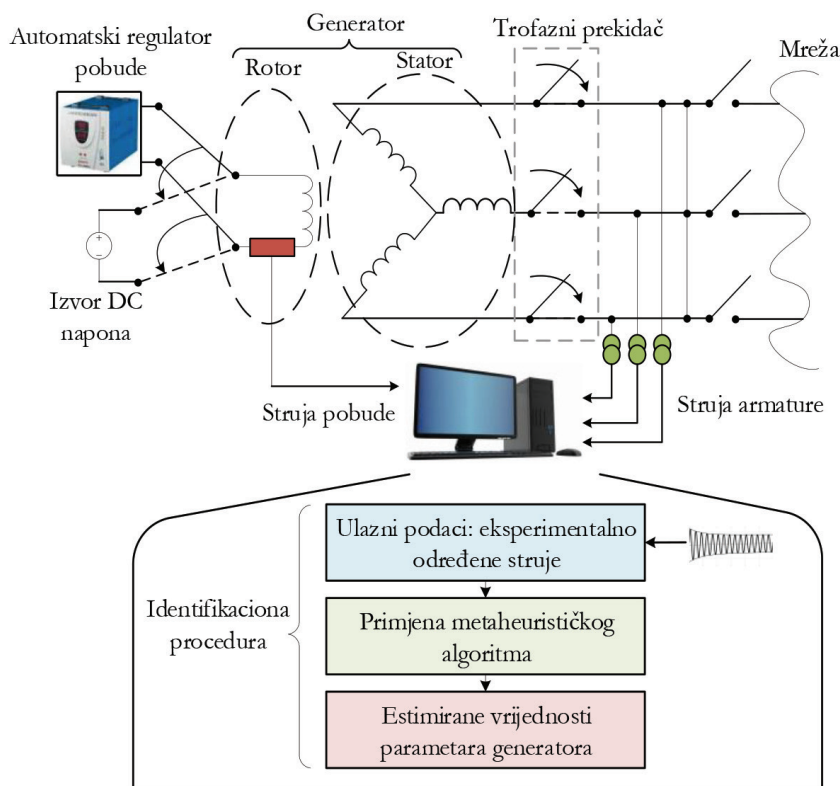
U ovom radu demonstrirani su metodi za određivanje parametara sinhronne mašine na osnovu eksperimentalno snimljenih talasnih oblika struje pobude i struje armature tokom kratkog spoja. U cilju ekstrakcije parametara mašine na osnovu snimljenih talasnih oblika korišćeni su metaheuristički algoritmi.

U cilju odgovarajuće eksperimentalne verifikacije sproveden je ogled kratkog spoja na sinhronom generatoru snage od 109.6 MVA koji se nalazi u HE „Bajina Bašta“. Na slici 4 prikazani su rotor i stator predmetnog sinhronog generatora.



Slika 4. Rotor i stator sinhronog generatora na kojem su vršeni eksperimenti

Prilikom izvođenja eksperimenata na realnom sinhronom generatoru, napon na krajevima generatora prije kratkog spoja je podešen na niže vrijednosti od nominalne-20%, 30% ili 50% nominalne vrijednosti. Blok dijagram eksperimentalne postavke i procedure za estimaciju parametara generatora prikazan je na slici 5.



Slika 5. Blok dijagram eksperimentalne postavke i procedure za estimaciju parametara generatora

Prije izvođenja oglada kratkog spoja, generator radi u praznom hodu, tj. odvojen je od mreže. Podešavajući pobudnu struju definiše se određena vrijednost napona na krajevima generatora. Istovremenim zatvaranjem trofaznog prekidača vrši se kratko spajanje trofaznog namotaja na statoru i na taj način se dovodi generator u kratak spoj. Za vrijeme trajanja ovog oglada, vrši se snimanje talasnih oblika struje pobude i struje armature. Nakon završetka oglada kratkog spoja, eksperimentalno snimljene struje pobude i armature predstavljaju ulazne podatke za identifikacionu proceduru, tj. ekstrakciju parametara sinhronog generatora.

Naime, u dostupnoj literaturi iz oblasti sinhronih mašina, mogu se naći matematički izrazi pomoću kojih se opisuju struja pobude i struja armature tokom kratkog spoja. Pomenuti izrazi u sebi sadrže parametre sinhronog generatora. Primjenom metaheurističkih algoritama vrši se tzv. *curve fitting*, tj. određivanje onih vrijednosti parametara generatora, tako da se talasni oblici struja koji su dobijeni računskim putem što bolje poklope sa eksperimentalno snimljenim talasnim oblicima struja.

Prvi predloženi pristup bazira se na primjeni približnog analitičkog izraza za struju pobude sinhrono mašine tokom trajanja opisanog oglada kratkog spoja. Naime, tokom trajanja oglada kratkog spoja, struja pobude se može približno odrediti na osnovu sljedećeg izraza:

$$i_F(t) = i_{F0} + i_{F0} \cdot \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cdot \left[e^{-\frac{t}{T_d'}} - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T_d''} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} - \frac{T_{kd}}{T_d''} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \right], \quad (2)$$

pri čemu pojedini članovi prethodne relacije imaju sljedeća značenja: i_{F0} je vrijednost pobudne struje uoči kratkog spoja i ovaj podatak se smatra poznatim, X_d je sinhrona reaktansa generatora po d -osi, X_d' je tranzijenta reaktansa generatora po d -osi, T_d' je tranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po d -osi, T_d'' je subtranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po d -osi, T_a je vremenska konstanta namotaja armature, T_{kd} je vremenska konstanta prigušnog namotaja po d -osi, ω_0 je brzina obrtanja rotora tokom kratkog spoja (smatra se da je konstantna i jednaka sinhronoj brzini). U cilju estimacije parametara sinhrono mašine, najprije je korišćen postojeći BWO (*Black Widow Optimization*) algoritam, a zatim je predložena njegova adaptivna modifikacija (A-BWO algoritam). Parametri generatora su estimirani sa ciljem da se postigne minimalno odstupanje talasnog oblika pobudne struje dobijene računskim putem od eksperimentalno izmjerene pobudne struje. U skladu sa tim, kriterijumska funkcija je data sljedećom relacijom:

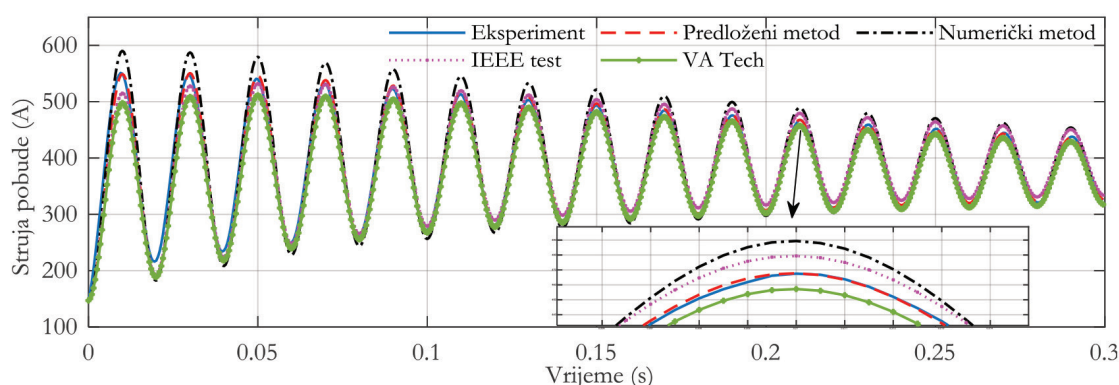
$$f = \frac{\sum_{k=1}^N (i_{F,eks}(k) - i_{F,rac}(k))^2}{\sum_{k=1}^N i_{F,eks}(k)^2}, \quad (3)$$

gdje N predstavlja broj mjerenja (broj mjernih tačaka), $i_{F,eks}$ je eksperimentalno dobijena pobudna struja, dok $i_{F,rac}$ označava pobudnu struju koja je proračunata korišćenjem relacije. Estimacija parametara je izvršena za slučaj kada napon na krajevima generatora uoči kratkog spoja iznosi 20% nominalnog napona, dok su preostala dva slučaja (30% i 50% nominalnog napona) iskorišćena za verifikaciju dobijenih parametara. Dobijeni rezultati su poređeni sa numeričkim metodom iz [19], kao i sa parametrima određenim primjenom standardnih IEEE testova i parametrima koji su dati u kataloškim podacima kompanije *VA Tech*. Dobijene vrijednosti parametara, kao i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije f , date su u Tabeli 1.

Tabela 1: Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

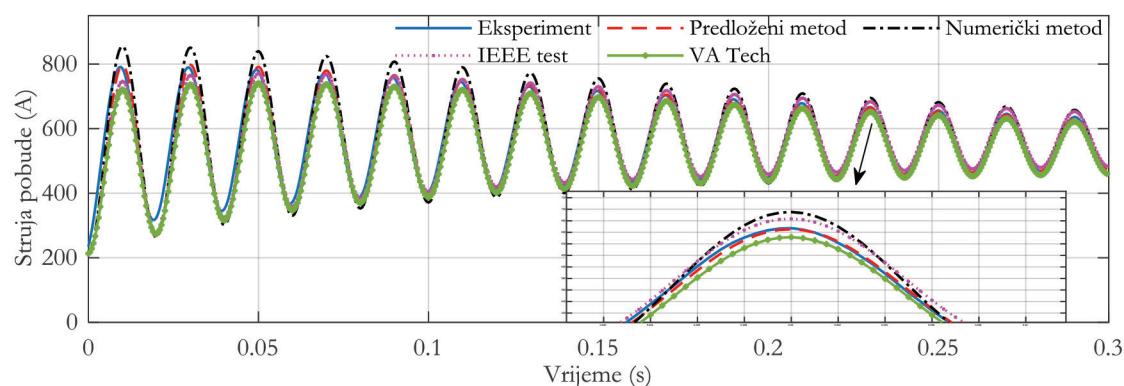
Metod	A-BWO	BWO	Numerički [71]	IEEE testovi	VA Tech
$X_d (\Omega)$	2.1518	2.1586	2.1474	2.1474	2.1005
$X_d' (\Omega)$	0.7652	0.7668	0.7489	0.7441	0.7597
$T_d' (s)$	2.199	2.1821	2.065	2.31	2.073
$T_d'' (s)$	0.0422	0.0419	0.041	0.0466	0.0457
$T_a (s)$	0.2279	0.2302	0.248	0.263	/
$T_{kd} (s)$	0.0315	0.031	0.033	0.03	/
f	$4.86 \cdot 10^{-4}$	$4.87 \cdot 10^{-4}$	$14.25 \cdot 10^{-4}$	$13.76 \cdot 10^{-4}$	$14.92 \cdot 10^{-4}$

Dodatno, na slici 6 dato je grafičko poređenje talasnih oblika eksperimentalno dobijene struje pobude sa talasnim oblicima struje pobude proračunate korišćenjem parametara iz prethodne tabele. Uzimajući u obzir to da u katalogima kompanije VA Tech nisu date vrijednosti za parametre T_a i T_{kd} , za svrhu simulacije iskorišćene su vrijednosti dobijene pomoću IEEE testova.

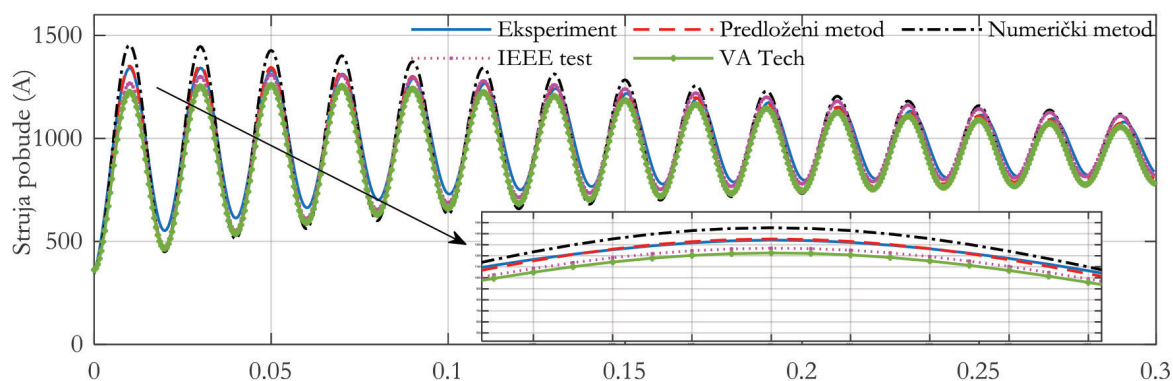


Slika 6. Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)

Kako bi se izvršila verifikacija tačnosti određenih parametara pri drugim radnim uslovima, iskorišćeni su eksperimentalno dobijeni talasni oblici struje pobude u slučajevima kada napon generatora uoči kratkog spoja iznosi 30% i 50% nominalnog napona. Preciznije, primjenom parametara iz prethodne tabele, izračunata je struja pobude za slučajeve kada je vrijednost napona generatora prije kratkog spoja 30% i 50% nominalne vrijednosti. Na slikama 7 i 8 prikazano je grafičko poređenje odgovarajućih talasnih oblika pobudnih struja.



Slika 7. Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)



Slika 8. Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

Na bazi prethodno prikazanih rezultata, jasno se može uočiti da se talasni oblik struje pobude koji je izračunat primjenom parametara određenih pomoću predloženog A-BWO algoritma najbolje poklapa sa eksperimentalno snimljenim talasnim oblikom pobudne struje. Takođe, vrijednost kriterijumske funkcije, koja ustvari predstavlja kvadrat greške, je najmanja kada se primljene parametri određeni predloženim algoritmom. Shodno tome, zaključuje se da je predloženi modifikovani metod za estimaciju parametara sinhronog generatora podesniji za primjenu u odnosu na ostala tri metoda korišćena za poređenje.

Drugi predloženi pristup za estimaciju parametara sinhronog generatora na osnovu oglada kratkog spoja baziran je na primjeni analitičkog izraza za struju armature tokom oglada kratkog spoja:

$$i_a(t) = U_m \cdot \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \lambda) - \frac{U_m}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(\lambda) - \frac{U_m}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 \cdot t + \lambda). \quad (4)$$

Parametri sinhronog generatora koji figurišu u prethodnoj relaciji, a koji nisu bili prethodno spomenuti, dati su u nastavku: U_m je amplituda faznog napona statora prije kratkog spoja, X_d'' je subtranzijentna reaktansa generatora po d -osi, X_q'' je subtranzijentna reaktansa generatora po q -osi, a λ je ugao između faze A i direktne ose u trenutku kada se dogodi kratak spoj. Kako bi se izvršila estimacija parametara generatora koji figurišu u prethodnoj relaciji, predložena je haotična modifikacija postojećeg EO (*Equilibrium Optimizer*) algoritma, koja je označena sa C-EO. Analogno kao kod prethodno opisanog pristupa, kriterijumska funkcija je definisana kao kvadrat odstupanja eksperimentalnog i računski određenog talasnog oblika ukupne struje armature tokom kratkog spoja:

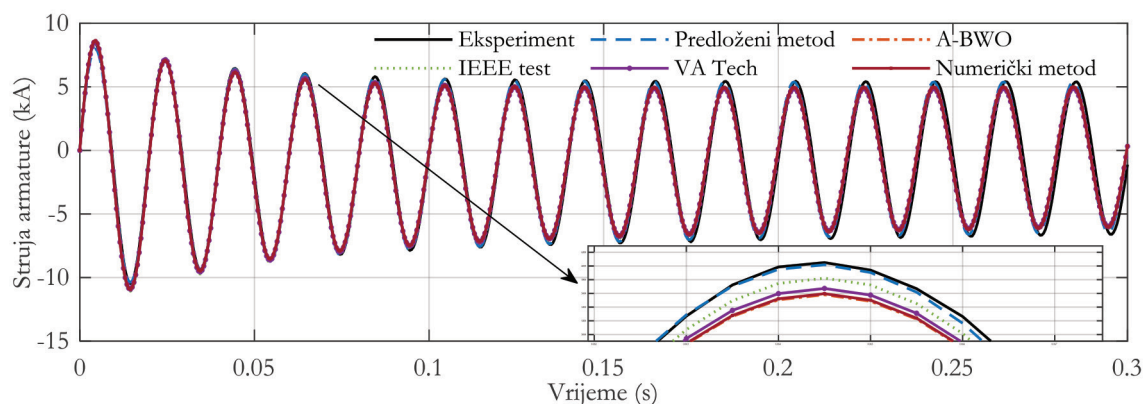
$$f_1 = \frac{\sum_{k=1}^N (i_{a,eks}(k) - i_{a,rac}(k))^2}{\sum_{k=1}^N i_{a,eks}(k)^2}, \quad (5)$$

gdje je $i_{a,eks}$ eksperimentalno dobijena struja armature generatora tokom kratkog spoja, dok je $i_{a,rac}$ odgovarajuća struja armature dobijena računskim putem. Za razliku od prethodnog pristupa, u ovom slučaju estimacija parametara je izvršena koristeći talasne oblike struje snimljene pri naponu generatora od 50% nominalnog napona. Preostala dva slučaja (kada je napon uoči oglada kratkog spoja 20% i 30% nominalnog) iskorišćena su za verifikaciju. U cilju poređenja predloženog metoda sa ostalim metodama iz literature, odabrani su rezultati dobijeni pomoću A-BWO algoritma (predstavljeni u prethodnom dijelu), numeričkog algoritma [19], IEEE testova i rezultati dobijeni iz kataloga kompanije *VA Tech*. U Tabeli 2 prikazane su vrijednosti parametara generatora i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije f_1 , za svaki od prethodno pomenutih metoda.

Tabela 2: Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

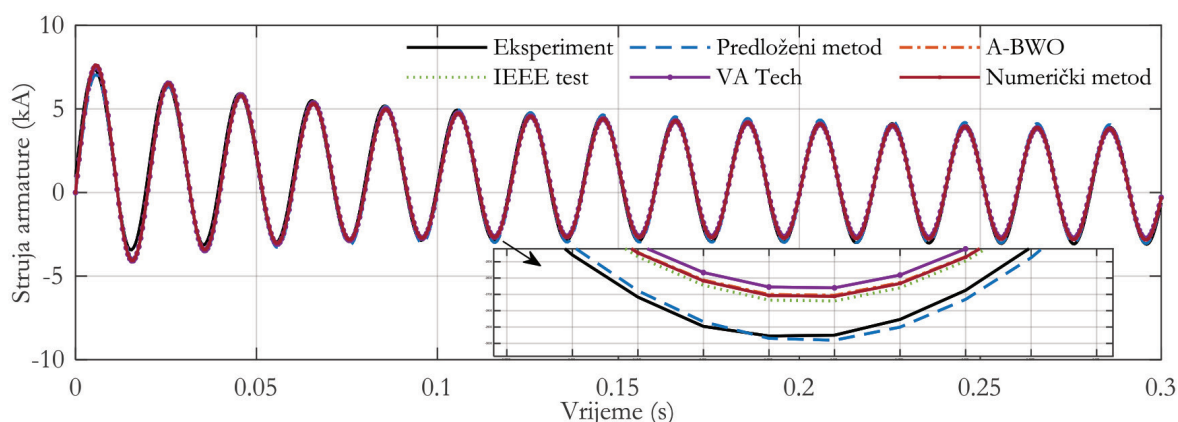
Metod	C-EO	A-BWO	Numerički [71]	IEEE testovi	VA Tech
$X_d (\Omega)$	2.1573	2.1518	2.1474	2.1474	2.1005
$X_d' (\Omega)$	0.6989	0.7652	0.7489	0.7441	0.7597
$X_d'' (\Omega)$	0.4605	/	/	0.4192	0.4246
$X_q'' (\Omega)$	0.4545	/	/	/	/
$T_d' (s)$	2.1649	2.1990	2.065	2.3100	2.0730
$T_d'' (s)$	0.0490	0.0422	0.041	0.0466	0.0457
$T_a (s)$	0.2767	0.2279	0.248	0.2630	/
f_1	0.0141	0.019	0.0177	0.0165	0.018

U narednom dijelu, nakon numeričkih dato je i poređenje grafičkih rezultata. S obzirom na to da u katalogima kompanije VA Tech nije data vrijednost parametra T_a , za svrhu simulacije iskorišćena je vrijednost dobijena pomoću IEEE testova. Identična napomena važi i za subtranzijentnu reaktansu X_d'' . Takođe, s obzirom na to da nijedan od metoda korišćenih za poređenje ne omogućava određivanje subtranzijentne reaktanse X_q'' , usvojeno je da je vrijednost ove reaktanse identična kao i X_d'' . Na slici 9 dato je grafičko poređenje struje armature dobijene eksperimentalnim putem, kao i računskim putem primjenom definisanog analitičkog izraza i parametara iz prethodne tabele.

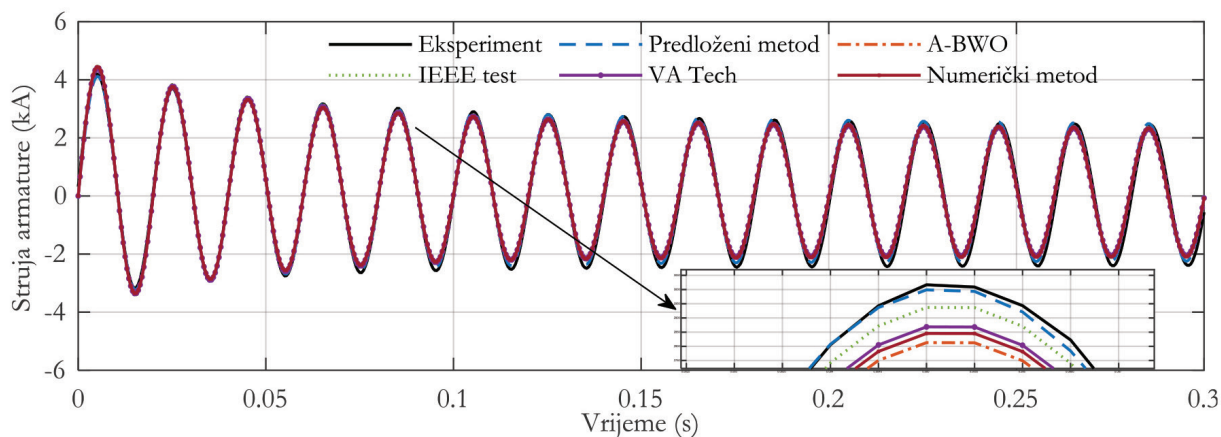


Slika 9. Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

Radi verifikacije dobijenih rezultata, talasni oblici struje armature tokom kratkog spoja su izračunati korišćenjem analitičkog izraza i primjenom parametara iz prethodne tabele, za preostala dva slučaja - kada je napon na krajevima generatora prije oglada kratkog spoja 20% i 30% nominalne vrijednosti. Na slikama 10 i 11 prikazano je odgovarajuće grafičko poređenje talasnih oblika struje.



Slika 10. Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)



Slika 11. Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)

Na osnovu dobijenih vrijednosti kriterijumske funkcije, kao i na osnovu grafičkih poređenja talasnih oblika struje armature, jasno se uočava da je najbolje poklapanje izračunatih i eksperimentalnih talasnih oblika struje armature dobijeno kada se primijene parametri određeni predloženim pristupom.

4. NOVI PRISTUP ZA ESTIMACIJU PARAMETARA KOMPONENTI UPROŠĆENE ŠEME SISTEMA ZA REGULACIJU NAPONA SINHRONOG GENERATORA

Cilj ovog poglavlja je demonstracija novog pristupa za estimaciju parametara komponenti sistema za regulaciju napona sinhronne mašine. U ovom poglavlju biće korišćena uprošćena struktura sistema sa slike 2, pri čemu je generator modelovan funkcijom prenosa trećeg reda, shodno slici 3. Predloženi pristup za estimaciju parametara je zasnovan na jednostavnoj testnoj proceduri, koja obuhvata snimanje odziva napona generatora u slučaju dodavanja step smetnje na referentnu vrijednost napona. Ovakva testna procedura je veoma jednostavna i praktična jer je step smetnja male amplitude.

Predloženi pristup je verifikovan sprovođenjem eksperimentalnih testova na realnom sinhronom generatoru snage od 120 MVA koji se nalazi u HE „Piva“. Pobudni sistem ovog generatora je *UNITROL 6000* i pripada grupi statičkih pobudnih sistema. Na slici 12 su prikazani izgled ovog generatora i njegovog pobudnog sistema.



Slika 12. Izgled sinhronog generatora i njegovog pobudnog sistema u HE „Piva“

Ekperimentalna testna procedura zasniva se na uvođenju step smetnje male amplitude na referentni napon. Preciznije, eksperiment započinje tako što se pobuda generatora podese na neku konstantnu vrijednost, zavisno od vrijednosti referentnog napona. Nakon toga, regulator pobude definiše ugao kašnjenja paljenja tiristorskog mosta, a samim tim i izlazni jednosmjerni napon mosta. Izlazni napon mosta je ujedno pobudni napon sinhronog generatora, koji reguliše da vrijednost izlaznog napona generatora bude jednaka podešenoj referentnoj vrijednosti. Nakon uspostavljanja stacionarnog stanja, uvodi se step smetnja na referentni napon. Stoga, signal greške sada ima veću vrijednost, što dalje dovodi do korekcije ugla okidanja tiristora, a samim tim i do definisanja nove vrijednosti napona na izlazu tiristorskog mosta, odnosno pobudnog napona sinhronog generatora. Tako definisana vrijednost napona pobude dovodi do nove vrijednosti izlaznog napona, koja je jednaka novoj referentnoj vrijednosti napona. U toku prelaznog procesa koji nastaje zbog step promjene referentne vrijednosti napona, snimaju se odzivi napona pobude i napona na izlazu generatora.

Konkretan eksperiment koji je sproveden na prikazanom generatoru opisan je u nastavku: referentni napon generatora je u početku podešen na vrijednost koja iznosi 1.012 pu, a zatim se nakon nekoliko sekundi dodaje step smetnja na referentnu vrijednost napona koja iznosi 0.02 pu. U ovom radnom režimu, aktivna snaga koju proizvodi generator je podešena na 0.06 pu.

U cilju estimacije parametara komponenti uprošćene šeme sistema za regulaciju napona primijenjen je već pomenuti metaheuristički EO algoritam. Kriterijum prilikom estimacije parametara je minimizacija greške između odziva napona generatora dobijenog primjenom uprošćene šeme i eksperimentalno snimljenog naponskog odziva. Rezultati estimacije parametara dati su u Tabeli 3.

Tabela 3: Rezultati estimacije parametara

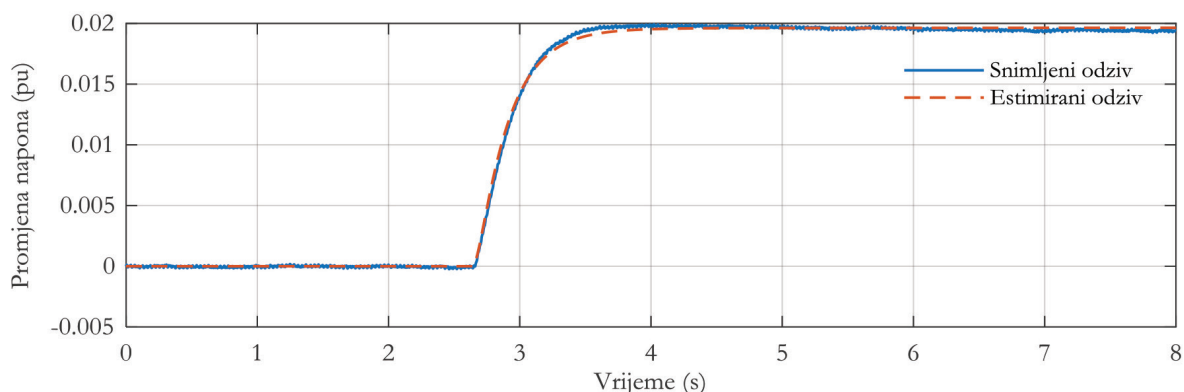
Parametar	K_A	T_A	K_S	T_S	R_e	X_d'	X_e	X_q	V_b	δ
Vrijednost	15.93	0.0299	0.9882	0.0349	0.0985	0.3997	0.1284	0.6543	0.9621	0.0105
Parametar	E_{q0}	I_{q0}	V_{d0}	V_{q0}	V_{g0}	X_d	T_{d0}'	H	K_D	
Vrijednost	1.3679	0.0002	0.3671	0.2493	1.0056	1	6.99	0.0036	$8.8587 \cdot 10^{-6}$	

Naredni korak, koji je vrlo važan, jeste upoređivanje određenih reaktansi i vremenskih konstanti generatora (X_d , X_d' , X_q i T_{d0}') koje su određene predloženim pristupom sa odgovarajućim kataloškim parametrima. Konkretno, u Tabeli 4 dato je poređenje estimiranih vrijednosti pomenutih parametara pomoću predloženog pristupa i kataloških vrijednosti parametara dobijenih na osnovu tehničke dokumentacije iz HE „Piva“.

Tabela 4: Poređenje estimiranih i kataloških vrijednosti parametara generatora

Parametar	X_d	X_d'	X_q	T_{d0}'
Estimirana vrijednost	1	0.3997	0.6543	6.99
Kataloška vrijednost	1.05	0.37	0.686	6.79

Takođe, veoma bitno je sprovesti komparativnu analizu između uprošćenog modela sistema za regulaciju napona i eksperimentalnih rezultata. Naime, primjenom uprošćenog modela sistema za regulaciju napona i parametara estimiranih predloženim pristupom, dobijen je odziv promjene napona generatora kada je ulaz u sistem već opisana promjena referentnog napona. Odgovarajuće grafičko poređenje sa eksperimentalno snimljenim odzivom dato je na slici 13. Takođe, bitno je primijetiti da je ne pomenutom grafiku prikazan odziv promjene napona generatora (priraštaja), uzrokovano primjenom već opisanog *Heffron-Phillips*-ovog modela generatora.



Slika 13. Grafičko poređenje dobijenih odziva promjene napona generatora

Na osnovu prethodno prikazanog grafičkog poređenja može se zaključiti da se odziv promjene napona generatora, koji je dobijen korišćenjem uprošćenog modela čiji su parametri estimirani predloženim pristupom, u velikoj mjeri poklapa sa odgovarajućim eksperimentalno snimljenim odzivom. Takođe, na bazi numeričkih rezultata iz Tabele 4, evidentno je da su vrijednosti parametara generatora, koje su dobijene predloženim pristupom, veoma bliske kataloškim vrijednostima parametara.

5. PRIMJERI BLACK-BOX MODELOVANJA U SISTEMIMA ZA REGULACIJU POBUDE SINHRONOG GENERATORA

U ovom poglavlju rada najprije je pokazana primjena vještačkih neuralnih mreža u cilju modelovanja relacije između napona pobude i napona na izlazu sinhronog generatora. Takođe, vještačke neuralne mreže su primijenjene u cilju modelovanja veze između referentnog napona i izlaznog napona sinhronog generatora, čime je obuhvaćen kompletan sistem za regulaciju napona.

Naime, vještačke neuralne mreže predstavljaju jedan od najčešćih oblika implementacije vještačke inteligencije i napravljene su koristeći analogiju sa ljudskim nervnim sistemom, čija je osnovna jedinica građe nervna ćelija – neuron. Neuralna mreža se sastoji od ulaznog sloja neurona, izlaznog sloja neurona i proizvoljnog broja skrivenih slojeva između njih.

Izlaz iz neuralne mreže se računa prema sljedećoj relaciji:

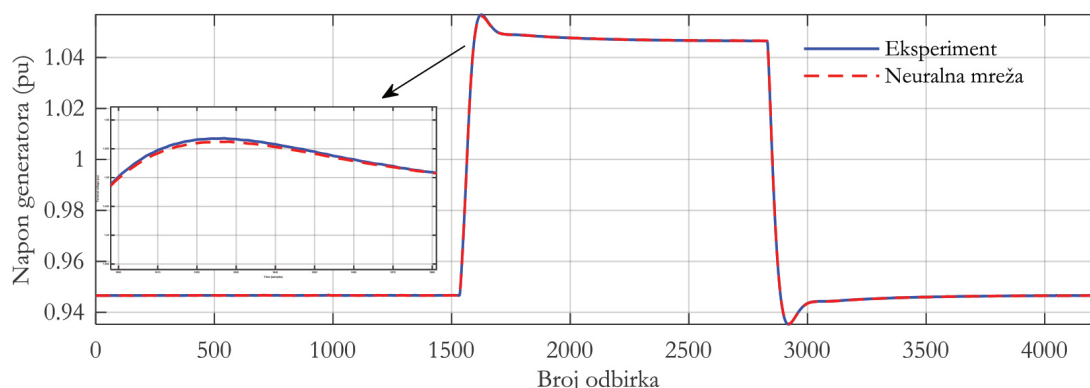
$$\hat{y}_i(\mathbf{w}, \mathbf{W}) = F_i \left(w_{i0} + \sum_{j=1}^q w_{ij} \cdot f_j \left(w_{k0} + \sum_{k=1}^m w_{jk} \cdot x_k \right) \right), \quad (6)$$

pri čemu \hat{y}_i predstavlja izlaz iz neuralne mreže, F i f su aktivacione funkcije izlaznog i skrivenog sloja, respektivno, q je broj neurona u skrivenom sloju, a m je broj neurona u ulaznom sloju, \mathbf{w} i \mathbf{W} su matrice težinskih koeficijenata neuralne mreže, koji predstavljaju podešive parametre vještačkih neuralnih mreža i određuju se u procesu koji se naziva obučavanje neuralne mreže. Takođe, veoma je važno pomenuti da proces obučavanja neuralnih mreža predstavlja podešavanje težinskih koeficijenata s ciljem da greška između izlaza iz neuralne mreže i izlaznog seta podataka za obučavanje bude minimizovana. Stoga, kriterijumska funkcija prilikom obučavanja neuralne mreže je definisana kao srednja vrijednost kvadrata odstupanja izlaza neuralne mreže od izlaznog signala koji se koristi za obučavanje. U cilju dobijanja ulaznih i izlaznih podataka za obučavanje neuralne mreže, sprovedeni su eksperimentalni testovi na sinhronom generatoru snage od 120 MVA, koji se nalazi u HE „Piva“. Detaljan opis eksperimentalnih testova dat je u prethodnom poglavlju.

Kao što je već rečeno, najprije je izvršeno modelovanje relacije između napona pobude i napona na izlazu sinhronog generatora koristeći vještačke neuralne mreže. Eksperimentalno snimljeni

napon pobude služi kao set ulaznih podataka, dok eksperimentalno snimljeni napon na krajevima generatora služi kao set izlaznih podataka. Preciznije, u cilju dobijanja podataka za obučavanje neuralne mreže, sproveden je sljedeći eksperiment: referentna vrijednost napona je u početku podešena na 0.95 pu, zatim se nakon određenog vremena poveća na 1.05 pu, da bi se nakon nekog vremena referentna vrijednost opet spustila na 0.95 pu. U toku rada generatora u opisanom radnom režimu, eksperimentalno su snimljeni napon pobude i napon na krajevima generatora, čime je dobijen ulazno-izlazni set podataka za obučavanje neuralne mreže. Takođe, kao algoritam za obučavanje je korišćen dobro poznati Levenberg-Marquardt algoritam.

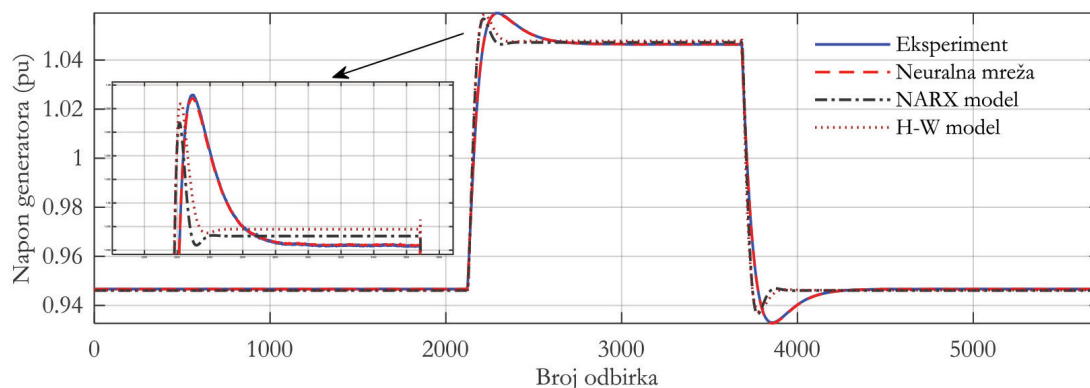
Kao rezultat procesa obučavanja neuralne mreže, dobijene su vrijednosti težinskih koeficijenata, koje neće biti prikazane u ovom dijelu usljed ograničenog prostora. Grafičko poređenje odziva obučene neuralne mreže i odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog napona, koji služi kao podatak neophodan za obučavanje mreže, dato je na slici 14.



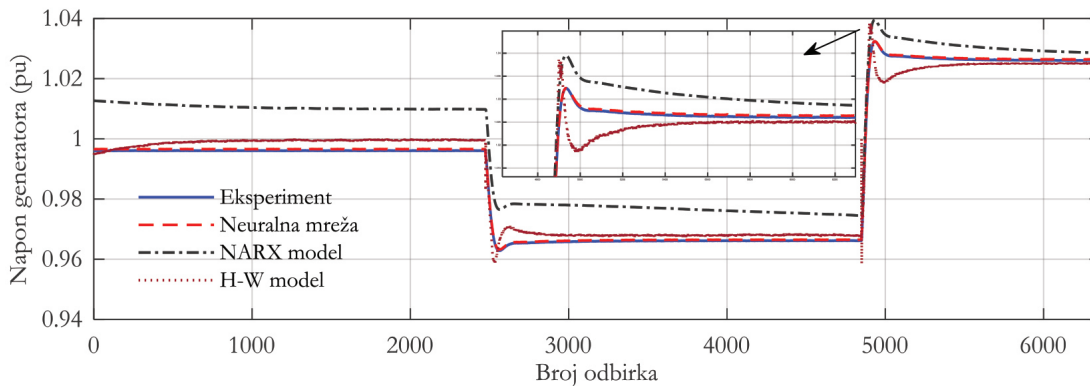
Slika 14. Blok dijagram predložene eksperimentalne procedure i procesa obučavanja neuralne mreže

Nakon obučavanja neuralne mreže, neophodno je izvršiti testiranje, tj. validaciju dobijene neuralne mreže. Podaci za validaciju dobijeni su eksperimentalnim testovima pri različitim radnim uslovima u sistemu, tj. pri različitim vrijednostima amplitude step smetnje i pri promijenjenim parametrima regulatora pobude.

Prethodno obučena neuralna mreža primijenjena je za računanje napona na krajevima generatora prilikom dva različita radna režima. Validacija neuralne mreže sprovedena je poređenjem eksperimentalno snimljenog napona generatora sa naponom koji je izračunat primjenom neuralne mreže. U cilju poređenja sa predloženim modelom neuralne mreže, odabrani su drugi poznati modeli iz literature, kao što su NARX (*Nonlinear AutoRegression model with exogenous input*) i H-W (*Hammerstein-Wiener*) modeli. Na slikama 15 i 16 prikazano je grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora sa odgovarajućim naponom koji je izračunat pomoću predloženog modela neuralne mreže, kao i pomoću pomenutih NARX i H-W modela.

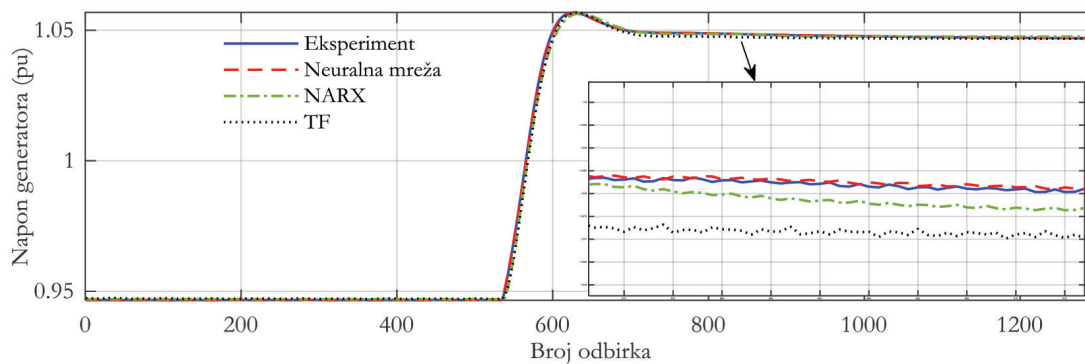


Slika 15. Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 1



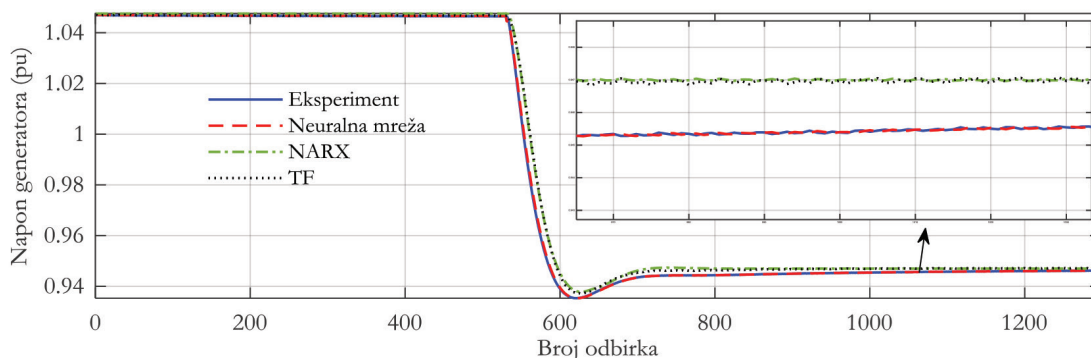
Slika 16. Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 2

Identičan pristup sproveden je u narednom dijelu, gdje je cilj predstavljanje veze između referentnog napona sistema za regulaciju pobude i napona na krajevima sinhronog generatora u praznom hodu primjenom neuralnih mreža. Za razliku od prethodnog pristupa, referentni napon služi kao set ulaznih podataka, dok eksperimentalno snimljeni napon na krajevima generatora služi kao set izlaznih podataka. U cilju poređenja performansi obučene neuralne mreže sa drugim modelima, odabrani su NARX model, koji pripada nelinearnim modelima, kao i model prenosne funkcije, tj. TF (*Transfer Function*) model, koji pripada linearnim modelima. Na slici 17 dato je grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora sa naponom generatora koji je dobijen primjenom sva tri razmatrana modela.

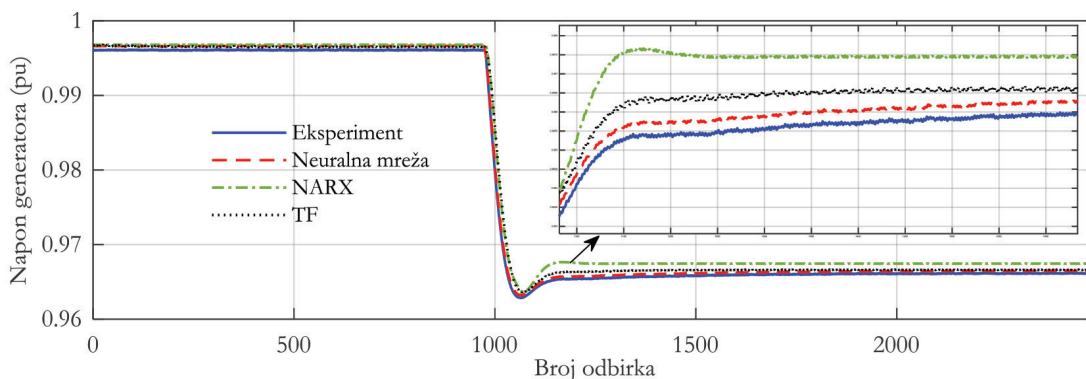


Slika 17. Grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora i odgovarajućeg napona dobijenog pomoću obučene neuralne mreže i ostalih modela

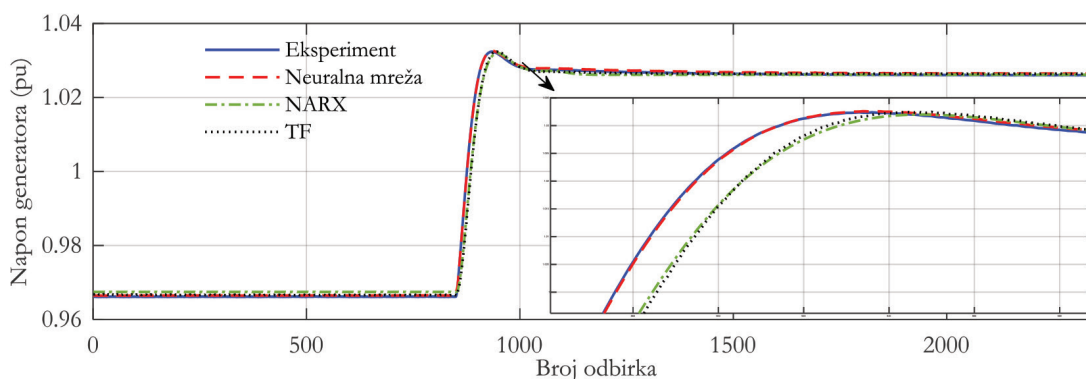
Takođe, izvršeno je poređenje obučene neuralne mreže i identifikovanih NARX i TF modela koristeći validacione testove, koji su sprovedeni pri različitim vrijednostima amplitude step smetnje na referentni napon. Za svaki radni režim, napon generatora je proračunat koristeći predloženi model neuralne mreže, kao i NARX i TF modele. Nakon toga, napon koji je izračunat primjenom sva tri modela upoređen je sa odgovarajućim eksperimentalno snimljenim naponom. Na slikama 18-20 dato je grafičko poređenje odziva napona generatora, za sva tri validaciona testa.



Slika 18. Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 1



Slika 19. Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 2



Slika 20. Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 3

Sa prikazanih grafika jasno se može zaključiti da se naponski odziv dobijen primjenom predloženog modela neuralne mreže najbolje poklapa sa eksperimentalno snimljenim odzivom. Takođe, evidentno je da, u pojedinim slučajevima, naponski odziv generatora, proračunat pomoću drugih modela, značajno odstupa od odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog odziva. Na osnovu prethodno rečenog, jasno se može zaključiti da je predloženi model neuralne mreže znatno precizniji, tačniji i pouzdaniji za primjenu kod modelovanja u sistemima za regulaciju pobude sinhronne mašine.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu demonstrirani su novi pristupi u modelovanju i identifikaciji komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronne mašine. Pri tome, veoma je važno bilo naglasiti značaj eksperimentalnih mjerenja u cilju verifikacije predloženih pristupa. Drugim riječima, cilj ovoga rada je bio pokazati značaj sinergije nauke i prakse. Važnost praktične realizacije eksperimenata pokazana je na primjerima razvoja novih pristupa za identifikaciju parametara klasičnog Parkovog modela

sinhrone mašine i identifikaciju parametara svih komponenti uprošćene šeme za regulaciju pobude sinhrone mašine, kao i na primjerima razvijanja *black-box* modela u sistemima za regulaciju pobude.

Budući rad će biti usmjeren ka razvoju modela baziranih na neuralnim mrežama, ali u režimu rada generatora pod opterećenjem. Konkretno, cilj je obučiti neuralne mreže za različite vrijednosti opterećenja generatora, tj. za različite vrijednosti aktivne i reaktivne snage na krajevima generatora. Na taj način bilo bi moguće estimirati odziv izlaznog napona generatora za proizvoljne vrijednosti aktivne i reaktivne snage.

LITERATURA

1. M. Čalović, „Regulacija elektroenergetskih sistema“, Tom 2, Elektrotehnički fakultet Beograd, 1997.
2. *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Standard 115-1995, 1995.
3. *Rotating Electrical Machines—Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Tests*, IEC Standard, IEC-60034-4 2008, 2008.
4. R. Wamkeue, C. Jolette, A. B. M. Mabwe, I. Kamwa, “Cross-identification of synchronous generator parameters from RTDR test time-domain analytical responses,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 776–786, 2011, doi: 10.1109/TEC.2011.2140320.
5. B. Zaker, G. B. Gharehpetian, M. Karrari, “Improving synchronous generator parameters estimation using d - q axes tests and considering saturation effect,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 14, no. 5, pp. 1898–1908, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2759502.
6. M. A. González-Cagigal, J. A. Rosendo-Macías, A. Gómez-Expósito, “Parameter estimation of fully regulated synchronous generators using unscented Kalman filters,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 168, 2019, pp. 210–217, doi: 10.1016/j.epsr.2018.11.018.
7. J. Huang, K. A. Corzine, M. Belkhat, “Online synchronous machine parameter extraction from small-signal injection techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 43–51, 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2008953.
8. A. Rouhani, A. Abur, “Constrained iterated unscented Kalman filter for dynamic state and parameter estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 2404–2414, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2764005.
9. B. Ahmadzadeh-Shoostari, R. Torkzadeh, M. Kordi, H. Marzooghi, F. Eghtedarnia, “SG parameters estimation based on synchrophasor data,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 12, pp. 2958–2967, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1989.
10. B. Zaker, G. B. Gharehpetian, M. Karrari, N. Moaddabi, “Simultaneous parameter identification of synchronous generator and excitation system using online measurements,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1230–1238, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2478971.
11. Y. Xu, L. Mili, M. Korkali, X. Chen, “An adaptive Bayesian parameter estimation of a synchronous generator under gross errors,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 16, no. 8, pp. 5088–5098, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2950238.
12. V. Zimmer, I. C. Decker, A. S. e Silva, “A robust approach for the identification of synchronous machine parameters and dynamic states based on PMU data,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 165, no. September, pp. 167–178, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.09.008.
13. Y. Li, J. Li, J. Qi, L. Chen, “Robust cubature Kalman filter for dynamic state estimation of synchronous machines under unknown measurement noise statistics,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 29139–29148, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900228.
14. M. Cisneros-González, C. Hernandez, R. Morales-Caporal, E. Bonilla-Huerta, M. A. Arjona, “Parameter estimation of a synchronous generator two-axis model based on the standstill chirp test,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 44–51, 2013, doi: 10.1109/

- TEC.2012.2236433.
15. M. A. Arjona, M. Cisneros-Gonzalez, C. Hernandez, "Parameter estimation of a synchronous generator using a sine cardinal perturbation and mixed stochasticdeterministic algorithms," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 486–493, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2047833.
 16. V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, E. C. Bortoni, "Parameter estimation of synchronous machines considering field voltage variation during the sudden short-circuit test," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 114, no. July 2019, p. 105421, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105421.
 17. J. Lidenholm, U. Lundin, "Estimation of hydropower generator parameters through field simulations of standard tests," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 4, pp. 931–939, 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2064776.
 18. E. L. Geraldi, T. C. C. Fernandes, A. B. Piardi, A. P. Grilo, R. A. Ramos, "Parameter estimation of a synchronous generator model under unbalanced operating conditions," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 187, no. June, p. 106487, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106487.
 19. B. Brkovic, D. Petrovic, R. Vasic, "Determination of synchronous generator parameters using the field current waveform," in *Proc. 18th Int. Symp. Power Electron.*, Novi Sad, Serbia, Oct. 2015, pp. 1–8.
 20. S. Ekinci, B. Hekimoglu, "Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 39935–39947, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906980.
 21. A. M. Mosaad, M. A. Attia, A. Y. Abdelaziz, "Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 4, pp. 755–767, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2019.07.004.
 22. E. Çelik, R. Durgut, "Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 1104–1111, 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.08.006.
 23. M. Zamani, M. Karimi-Ghartemani, N. Sadati, M. Parniani, "Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization," *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 12, pp. 1380–1387, 2009, doi: 10.1016/j.conengprac.2009.07.005.
 24. S. Biradar, S. Saxena, Y. V. Hote, "Simplified model identification of automatic voltage regulator using model-order reduction," *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Power Adv. Control Eng. ICPACE 2015*, pp. 423–428, 2015, doi: 10.1109/ICPACE.2015.7274985.
 25. J. Q. Puma, D. G. Colomé, "Parameters identification of excitation system models using genetic algorithms," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 3, pp. 456–467, 2008, doi: 10.1049/iet-gtd:20070170.
 26. D. M. Gillard, K. E. Bollinger, "Neural network identification of power system transfer functions," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 1, pp. 104–110, 1996, doi: 10.1109/60.486583.
 27. L. Ren, G. W. Irwin, D. Flynn, "Nonlinear identification of turbogenerator AVR loop dynamics using fuzzy clustering," *PowerCon 2002-2002 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc.*, vol. 3, pp. 1503–1508, 2002, doi: 10.1109/ICPST.2002.1067781.

REVITALIZACIJA POLOVA ROTORA GLAVNOG GENERATORA BR. 3 U HE ĐERDAP 1 NEOPHODNOST PROMENE MESTA IZVRŠENJA REVITALIZACIJE, DEFINISANJE OBIMA RADOVA, ISPITIVANJA I PLAN KONTROLE KVALITETA

Dragan Belonić

EPS AD, HE “Đerdap 1” Kladovo, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Početak septembra 2022. godine započela je revitalizacija i poslednjeg od šest agregata (Etapu 6) na HE “Đerdap 1”. Ugovorom o revitalizaciji predviđeno je bilo izvođenje revitalizacionih radova na polovima rotora glavnog generatora u fabrici proizvođača opreme što podrazumeva transport polova na revitalizaciju u Rusku Federaciju.

Predstavnici AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6 imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji. Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršiće se u domaćoj fabrici u Srbiji.

Tehničkim zadatkom i Planom kontrole kvaliteta definisani su svi neophodni sanacioni radovi, kontrolna merenja i ispitivanja na jezgrima polova, zatim kontrolna merenja i ispitivanja na isporučanim novim namotajima polova rotora i na kraju svi neophodni radovi i ispitivanja prilikom montaže namotaja na jezgro pola VPI metodom.

U ovom radu biće prezentovane specifičnosti postupka revitalizacije polova rotora VPI metodom, razlike u odnosu na izvorno stanje i potencijalni problemi u procesu revitalizacije polova.

Ključne riječi: Kontrolna ispitivanja, Revitalizacija, VPI metod

1. UVOD

1.1. Opšte informacije

HE "Đerdap 1", u svojoj mašinskoj zgradi poseduje šest hidrogeneratora. Generatori su trofazni, sinhroni, vertikalnog tipa, s nosećim ležištem na poklopcu turbine i jednim vodećim ležištem iznad generatora.



Slika 1. HE "Đerdap 1"

Ugovorom o revitalizaciji predviđeno je povećanje nominalne snage svakog od 6 (šest) postojećih hidrogeneratora (190MVA – pre revitalizacije) tako da snaga generatora odgovara snazi nove turbine. Prividna snaga revitalizovanih hidrogeneratora je sada 211,11MVA.

Revitalizacija hidrogeneratora na rumunskoj strani je završena 21. 3. 2007. godine, a radovi na revitalizaciji hidrogeneratora u HE "Đerdap 1" koji su otpočeli 1. 9. 2009. godine revitalizacijom hidrogeneratora br. 6 (Etapu 1 revitalizacije), završeni su 13. 11. 2023. godine revitalizacijom hidrogeneratora br. 3 (Etapu 6 revitalizacije).

Duži period revitalizacionih radova na HE "Đerdap 1" uslovljen je bio prekidom radova usled neispunjavanja ugovornih obaveza isporučioaca opreme, kao i pandemije Covid 19.

1.2. Obim revitalizacionih radova

Za potrebe ostavarivanja definisanih parametara hidrogeneratora Ugovorom o revitalizaciji HE "Đerdap 1" predviđena je:

- Montaža novih kućišta, jezgara i namotaja statora glavnog generatora (GC);
- Revitalizacija kućišta statora, montaža novih lim paketa i namotaja statora pomoćnog generatora;
- Revitalizacija obodnog prstena rotora glavnog generatora sa montažom novih/revitalizovanih polova;
- Izrada i isporuka kompleta novih polova rotora glavnog generatora za generatore br. 4-6 (proizvodnje "Rade Končar");
- Revitalizacija jezgara polova, zamena namotaja polova rotora glavnog generatora za generatore br. 1-3 (proizvodnje "Elektrosila");
- Revitalizacija polova pomoćnog generatora (preizolovanje polova).

2. REVITALIZACIJA POLOVA ROTORA GLAVNOG GENERATORA

2.1. Uvodne napomene

Početak septembra 2022. godine započeta je revitalizacija i poslednjeg od šest agregata (Etapu 6) na HE "Đerdap 1". Ugovorom o revitalizaciji predviđeno je bilo izvođenje revitalizacionih radova na polovima rotora glavnog generatora u fabrici proizvođača opreme što podrazumeva transport polova na revitalizaciju u Rusku Federaciju.

Predstavnicima AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6 imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji. Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršiće se u domaćoj fabrici u Srbiji.

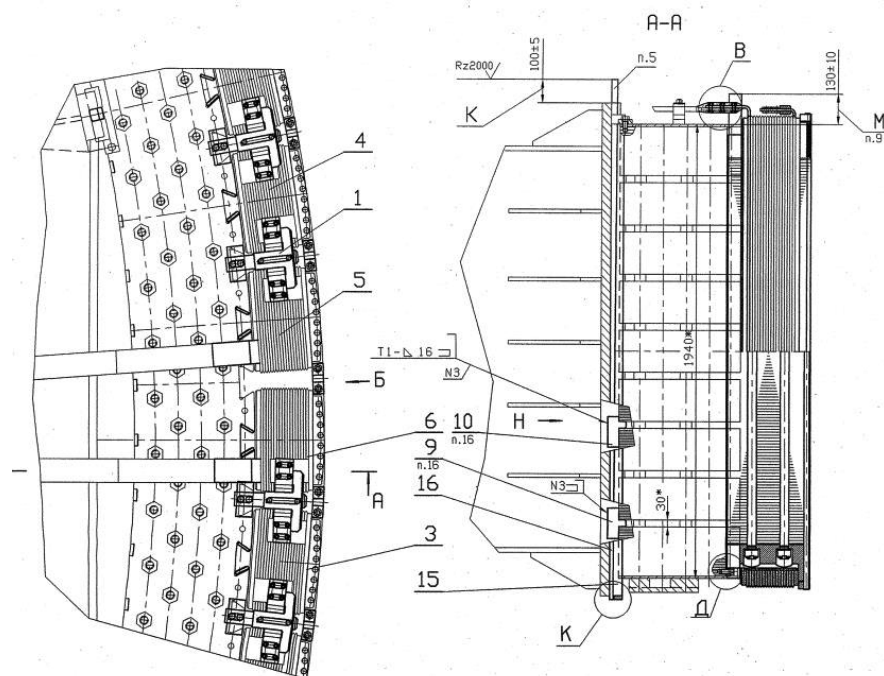
Tehničkim zadatkom i Planom kontrole kvaliteta definisani su svi neophodni sanacioni radovi, kontrolna merenja i ispitivanja na jezgrima polova, zatim kontrolna merenja i ispitivanja na isporučanim novim namotajima polova rotora i na kraju svi neophodni radovi i ispitivanja prilikom montaže namotaja na jezgro pola VPI metodom.

2.2. Polovi rotora glavnog generatora

Namotaji polova, nakon revitalizacije, biće isti za svih šest generatora.

Pri revitalizaciji generatora br. 1-3 koristiće se postojeća jezgra polova sa prigušnim namotajem. Za generatore br. 4-6 isporučeni su novi polovi.

Svaki pol rotora se sastoji od jezgra od presovanog čeličnog lima, čeonih pritisnih ploča, od namotaja pobude i uzdužno poprečnog prigušnog namotaja. Spojevi između polova su razdvojivi, izrađeni od paketa tankih elastičnih bakarnih limova i pričvršćivaće se za obod pomoću specijalnih držača i izolacionih stezača. Prigušni namotaji između polova spajaće se elastičnim bakarnim vezama.



Slika 2. Rotor glavnog generatora
(poz. 1. – međupolna veza; poz. 3. ÷ 6. – pol; poz. 15. ÷ 16. – klin oboda; poz. 9. ÷ 10. – graničnik)

2.3. Specifičnosti postupka revitalizacije polova rotora VPI metodom i razlike u odnosu na izvorno stanje

“Stari” polovi rotora glavnog generatora izrađeni su na način da je međuzavojna izolacija namotaja bila napravljena od odgovarajućih elektroizolacionih azbestnih podloški, dok je korpusna izolacija namotaja bila izrađena od odgovarajućih elemenata izrađenih od staklotekstolita. Namotaj pola na jezgro pola je fiksiran umetanjem odgovarajućih zaptivki/umetaka izrađenih od tekstolita. Namotaj i jezgro pola ne predstavljaju monolitnu celinu. Namotaj starih polova je moguće lako skinuti sa jezgra pola.

Impregnacija pod vakuumom (VPI) [1] je proces kojim se kompletan namotaj statora ili rotora potapa u smolu ili lak. Kombinacijom suvog i vlažnog vakuuma i ciklusa odgovarajućih pritiska, smola ili lak u potpunosti prodire u ceo izolacioni sistem i popunjava sve praznine i šupljine. Nakon odgovarajućeg termičkog tretmana, impregnirani namotaj postaje monolitna i homegena celina.

Postupak revitalizacije polova rotora glavnog generatora VPI (Vaccum Pressure Impregnation) metodom obezbeđuje značajano poboljšanje:

- Dielektričke čvrstoće namotaja pola;
- Mehaničke čvrstoće, smanjenje mogućnosti pomeranja/vibracije namotaja pola;
- Toplotne provodljivosti;
- Zaštite od prodora vode, hemikalija i kontaminanata.



Slika 3. Posuda za vakumiranje i impregnaciju

VPI metod/proces podrazumeva sledeće aktivnosti [2]:

- Pripremu kompletiranog pola za impregnaciju;
- Postavljanje alata za fiksiranje/pritiskanje namotaja pola;
- Predgrevanje pola u peći;
- Kontrolisano hlađenje pola pre ubacivanja u posudu za vakumiranje i impregnaciju.

Impregnacija namotaja pola:

- Ciklus “suvog” vakuuma – radi uklanjanja svog vazduha i vlage iz izolacije;
- Ciklus “vlažnog” vakuuma – ubacivanje smole u impregnacionu komoru pod vakuumom;
- Ciklus pod pritiskom - vakuum se oslobađa i dovodi se impregnaciona komora pod odgovarajući pritisak kako bi smola ili lak u potpunosti prodrli u sve praznine u izolaciji namotaja;
- Ciklus ukidanja pritiska – vraćanje neiskorišćene smole ili laka u rezervoar.

Čišćenje pola nakon impregnacije:

- Čišćenje izvoda namotaja i priključaka prigušnih segmenata od smole;

- Zaštita kontaktnih površina pre ubacivanja pola u peć.
Zagrevanje (pečenje) pola u peći.

2.4. Neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova

Početkom septembra 2022. godine započeta je revitalizacija poslednjeg od šest agregata (Etapu 6) na HE "Đerdap 1" shodno Ugovoru o revitalizaciji zaključenim sa firmom AO "Power Mashines" St. Peterburg, Ruska Federacija. Ugovorom je bila predviđeno izvođenje revitalizacionih radova na polovima rotora glavnog generatora u fabrici proizvođača opreme što podrazumeva transport polova na revitalizaciju u Rusku Federaciju.

Protokolom od 12. 8. 2022. godine, predstavnici AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6, a imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji (sankcije EU).

Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršiće se u domaćoj fabrici u Srbiji.

Kako je za potrebe izvođenja montažnih radova na higrogeneratoru br. 3 HE "Đerdap 1" već imao zaključen Ugovor sa odgovarajućom domaćom firmom, firmom koja ima tehničke mogućnosti za izvođenje predmetnih radova, to je izvršeno ugovaranje dodatnih radova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, a prema usvojenoj tehnologiji i uz nadzor ruskih stručnjaka.

Za potrebe realizacije ovih radova izvršena je hitna doprema namotaja polova rotora glavnog generatora sa pripadajućim izolacionim i montažnim materijalom iz fabrike isporučioća opreme, a u cilju očuvanja rokova revitalizacionih radova.

2.5. Varijante revitalizacije polova rotora glavnog generatora

2.5.1. Varijanta 1 - zadržavanje starih polova rotora GG (bez revitalizacije)

Nedostaci primenjenog rešenja:

- Nemogućnost kontrole stanja pritisnih ploča jezgara polova i kontrole stanja osiguravajućih varova na navrtkama i brezonima za stezanje jezgara polova;
- Nemogućnost otklanjanja uočenih nedostataka/odstupanja na elektrani;
- Korekcija dimenzija i oblika pojedinih polova koji ne zadovoljavaju norme;
- Izrada oštećenih delova koji su za zamenu (izolacioni pritisni prstenovi, delovi korpusne izolacije ...);
- Sanacija međuzavojne izolacije;
- Sanaciju labavosti prigušnih štapova i dopunsko lemljenje prigušnih segmenata moguće je izvesti tek nakon montaže polova na obod rotora jer okretanjem polova dolazi do spadanja namotaja sa jezgra;
- Prilikom izvođenja odgovarajućih električnih ispitivanja postoji velika verovatnoća da dođe do proboja međuzavojne i/ili korpusne izolacije namotaja polova;
- Na elektrani ne posedujemo aparaturu za ispitivanje međuzavojne izolacije namotaja polova;
- Potencijalno neostvarivanje definisanih parametara za revitalizovane agregate (smanjena trajno dozvoljena pobudna struja, prekoračenje porasta temperature delova generatora, neostvarivanje deklarisanog stepena korisnosti ...).

Ostaje stari način spajanja međupolnih veza (bočno spajanje lemljenjem).

Ukoliko se naknadno isporuču NOVI polovi potreban je novi zastoj od 100-120 dana za zamenu polova.

2.5.2. Varijanta 2 - revitalizacija polova rotora GG u domaćoj fabrici uz isporuku i zamenu namotaja

Predviđeni obim kontrolnih i sanacionih radova, u ovoj varijanti, bio bi isti kao i u fabrici proizvođača opreme, te bi ova varijanta odgovarala svim zahtevima definisanim Ugovorom i odgovarajućim specijalnim tehničkim uslovima (STU).

2.5.3. Varijanta 3 - zadržavanje starih polova rotora GG sa revitalizacijom u domaćoj fabrici bez isporuke novih namotaja

Nedostaci primenjenog rešenja:

- Upitna je mogućnost korekcije neostataka na jezgrima polova ili izrade novih jezgara ukoliko bude potrebe u domaćoj fabrici (nepostojanje odgovarajućih alata i opreme za izradu delova);
- Potencijalni problemi prilikom demontaže starih izvoda i montaže novih izvoda polova.

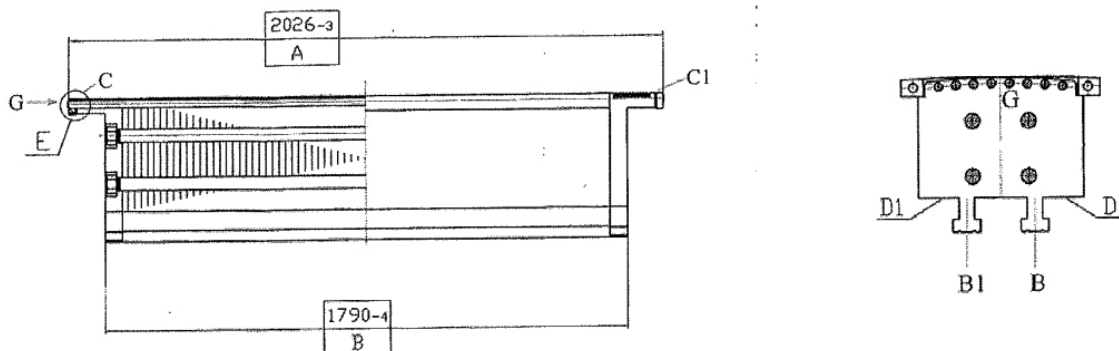
Predviđeni obim kontrolnih i sanacionih radova odgovara predviđenom obimu radova u fabrici proizvođača opreme, ali uz konstataciju da se zadržava stari namotaj uz korekciju položaja izvoda.

Poprečni presek namotaja polova rotora na starim i novim generatorima je približno isti ($q_a \approx 730\text{mm}^2$) te zamenom izolacije možemo očekivati da neće biti značajnih razlika u strujnoj opterećenosti i porastu temeperaure namotaja rotora u nominalnom režimu.

2.6. Revitalizacija polova GG (saglasno varijanti 2) – obim radova

Za potrebe izvođenja neophodnih radova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora br. 3 u HE "Đerdap 1" neophodno je bilo da Izvođač radova izradi neophodnu tehničku dokumentaciju za izvođenje predmetnih radova, u skladu sa tehničkim opisom i tehničkim zadacima proizvođača opreme, a koja podrazumeva izradu:

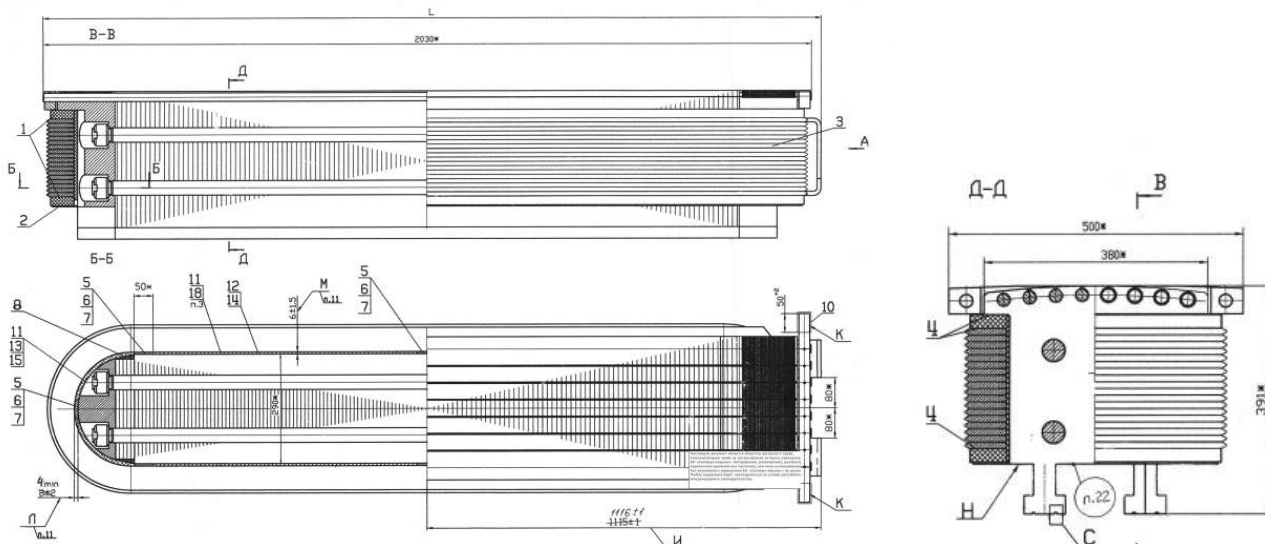
- Tehničkog zadatka/tehnološkog procesa za revitalizaciju polova rotora glavnog generatora VPI metodom;
- Plana kontrole kvaliteta;
- Izvrši odgovarajuće transportne aktivnosti sa predmetnom opremom, a koja podrazumeva:
 - Transport izrađenih namotaja polova rotora glavnog generatora, sa pripadajućim izolacionim materijalom, iz fabrike proizvođača opreme (Sankt Petersburg, Ruska Federacija) i transport u fabriku Izvođača radova – 84 kom;
 - Transport jezgara polova rotora glavnog generatora sa objekata HE Đerdap 1 Kladovo u fabriku Izvođača radova na revitalizaciju – 84 kom;
 - Transport revitalizovanih polova rotora glavnog generatora iz fabrike Izvođača radova na objekat HE Đerdap 1 Kladovo – 84 kom;
 - Izvrši revitalizaciju jezgara polova rotora glavnog genertora br. 3 koja podrazumeva sledeće aktivnosti: izvođenje kontrolnih radova na jezgrima polova, vizuelna kontrola jezgara polova, dimenziona kontrola jezgara polova, kontrola linearnosti jezgara polova, vizuelna kontrola varova i kontrola metodom "čekićanja" labavosti prigušnih štapova u jezgru pola, kontrola magnetnim fluksom ili obojenim penetrantima osnovnog materijala na spoljašnjoj površini steznih ploča.



Slika 4. Jezgro rotora glavnog generatora (sa definisanim kontrolnim tačkama)

Sanacioni radovi na jezgrima polova (saglasno usvojenoj tehnologiji definisanoj u Tehničkom zadatku):

- Uklanjanje ostataka korpusne izolacije sa jezgra pola;
- Čišćenje jezgra peskarenjem/bakarnom sačmom od korozije, premaza i ostataka izolacije;
- Sanacija uočenih nedostataka na zavarenim spojevima;
- Sanacija varova i labavosti prigušnih štapova u jezgru pola;
- Sanacija zavarenih spojeva na veznim delovima ("T četvrtke") jezgara polova saglasno zahtevima;
- Kalaisanje površine "K" lemom saglasno zahtevima na crtežu;
- Čišćenje površine jezgra pola pre nanošenja premaza;
- Farbanje jezgra pola;
- Izvrši revitalizaciju polova rotora glavnog generatora – izolovanje jezgra pola i montažu namotaja (saglasno usvojenoj tehnologiji definisanoj u Tehničkom zadatku) što podrazumeva sledeće aktivnosti:
 - Pripremu kompleta korpusne izolacije za montažu na jezgro pola;
 - Montažu korpusne izolacije saglasno definisanom tehnološkom procesu;
 - Montažu namotaja na jezgro pola;
 - Fiksiranje i zaptivanje namotaja u skladu sa zahtevima crteža;
 - Električna ispitivanja (do impregniranja) saglasno usvojenom Planu kontrole kvaliteta;
 - Pripremu pola za impregnaciju saglasno definisanom tehnološkom procesu;
 - Impregnaciju polova po VPI metodi;
 - Čišćenje polova nakon impregnacije;
 - Završne radove na polu;
 - Popuna praznina i pukotina između gornje izolacione podloške i jezgra saglasno zahtevima crteža;
 - Provera visinskog položaja metalne podloške u odnosu na jezgro pola i eventualna korekcija debljine izolacione podloške;
 - Farbanje kompletnog pola;
 - Električna ispitivanja (nakon impregniranja i nanošenja elektroizolacionih premaza) saglasno usvojenom Planu kontrole kvaliteta;
 - Merenje težine i markiranje polova u skladu sa crtežom.



Slika 5. Pol rotora glavnog generatora

- Izvrši sva neophodna međufazna i završna ispitivanja saglasno usvojenom Planu kontrole kvaliteta – što podrazumeva minimalno sledeće aktivnosti: proveru dimenzija jezgara polova, vizuelnu kontrolu stanja jezgara polova, proveru ravnosti jezgara polova, proveru labavosti i stanja zalemljenosti štapova prigušnog kaveza. Takođe i kontrolu magnetnim fluksom ili obojenim penetrantima osnovnog materijala na spoljašnjoj površini steznih ploča, proveru dimenzija namotaja, ispitivanje međuzavojne izolacije namotaja prilikom dopreme u fabriku Izvođača, ispitivanja na završenom polu, ispitivanje međuzavojne izolacije, merenje otpora izolacije pola pre i posle dielektričnih ispitivanja, kao i dielektrična ispitivanja izolacije polova i dimenzionu kontrola polova.

3. PROBLEMI U PROCESU REALIZACIJE REVITALIZACIJE POLOVA ROTORA

Za potrebe izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora HE “Đerdap 1” je, sa već angažovanim domaćom firmom za izvođenje radova na montaži statora i rotora glavnog i pomoćnog generatora agregata br. 3, zaključio odgovarajući Aneks osnovnog Ugovora kojim je povećan obim radova i usluga, na način da su ugovoreni dodatni radovi na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, prema usvojenoj tehnologiji i uz nadzor ruskih stručnjaka, kao i preuzimanje izrađenih namotaja iz fabrike proizvođača opreme (St. Peterburg, Ruska Federacija).

3.1. Transport namotaja i montažnog materijala

Za potrebe realizacije radova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, u domaćoj fabrici, neophodna je bila hitna doprema namotaja polova rotora glavnog generatora sa pripadajućim izolacionim i montažnim materijalom iz fabrike proizvođača opreme (St. Peterburg, Ruska Federacija), a u cilju očuvanja rokova revitalizacionih radova.

Novim paketom sankcija EU prema Ruskoj Federaciji, od 6. 10. 2022. godine, većina ovih proizvoda, koji su neophodni za nastavak radova na revitalizaciji opreme hidrogeneratora Etape 6, podležu sankcijama EU, te nije bilo moguće ovu opremu dopremiti kroz zemlje EU drumskim ili vodenim transportom.

Kao jedino moguće rešenje dopreme neophodne opreme, u novonastalim okolnostima, preostao je direktan avionski transport (St. Peterburg, Istanbul, Beograd).

3.2. Nabavka zamenskog montažnog materijala

Tokom ugovaranja obima isporuke opreme i montažnog materijala za potrebe revitalizacije polova rotora glavnog generatora, a shodno načinu transporta ove opreme (avionski transport) javio se problem za određeni broj komponenti koje nije moguće preneti bez dodatnih odobrenja i adekvatnih sertifikata o bezbednosti za transport. Iz tih razloga, nabavka dela montažnog materijala i opreme ugovorena je sa domaćom fabrikom u kojoj će se izvoditi revitalizacioni radovi, a uz saglasnost i odobrenje proizvođača ove opreme.

Iz fabrike proizvođača opreme nije bilo moguće dopremiti odgovarajući "srebrni lem" tipa "Пср 45", kao ni smolu za impregnaciju namotaja polova tipa "Компаунд ПК 11".

Sa proizvođačem opreme je usaglašeno da Izvođač radova u Srbiji nabavi adekvatne zamene.

3.2. Tehnička opremljenost Izvođača radova i izrada alata za potrebe revitalizacije polova rotora glavnog generatora

Osnovni uslovi za dodeljivanje predmetnog posla domaćoj fabrici je njena tehnička opremljenost i stručni kadar za izvođenje definisanih radova. Neophodna tehnička opremljenost je podrazumevala da fabrika mora imati:

- adekvatan uređaj za vakumiranje i impregnaciju namotaja polova, adekvatnu "presu" za montažu namotaja na jezgro pola,
- potrebne alate za montažu namotaja na jezgro pola,
- ispitnu laboratoriju.

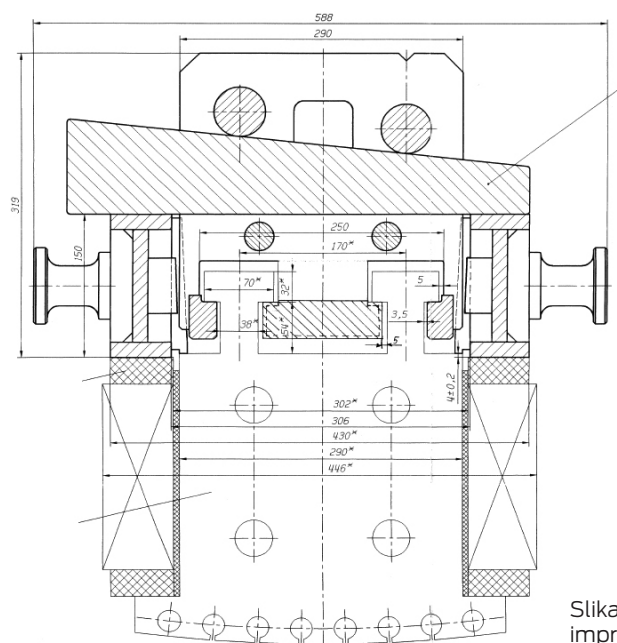
U trenutku ugovaranja ovog dopunskog posla Izvođač, naravno, nije imao adekvatne alate za potrebe montaže, ispitivanja i impregnacije namotaja polova.

Radi očuvanja rokova završetka revitalizacionih radova na Etapi 6 revitalizacije HE "Đerdap 1" bilo je neophodno hitno pristupiti izradi adekvatnih alata za potrebe definisanih električnih ispitivanja i impregnacije namotaja VPI metodom.

Izvođač radova je izradio odgovarajuće alate za montažu namotaja na jezgro pola i alat za potrebe električnih ispitivanja međuzavojne i korpusne izolacije namotaja pod pritiskom.

HE "Đerdap 1" je izradio odgovarajuće alate za presovanje namotaja na jezgru pola za potrebe impregnacije.

Svi alati su izrađeni na osnovu instrukcija proizvođača opreme.



Slika 6. Alat za presovanje i impregnaciju namotaja pola

3.3. Uočeni problemi u procesu revitalizacije polova

Nakon isporuke novih namotaja polova rotora glavnog generatora izvršeno je raspakivanje opreme i vizuelni pregled iste. Tom prilikom je konstatovano sledeće:

- Vizuelnim pregledom polnih namotaja zapaženo je mehaničko oštećenje na 13 namotaja sa unutrašnje strane navojaka. Izvršena su ispitivanja ovih namotaja u cilju provere ispravnosti, metodom merenja pada napona između navojaka. Ispitivanjem je konstatovano da namotaji br. 13, 21, 30 i 40 imaju odstupanja koja ukazuju na eventualno postojanje međuzavojnog spoja;
- Vizuelnim pregledom polnih namotaja na namotaju br. 37 uočeno je postojanje bakarnih opiljaka između navojaka, na namotaju br.11 uočeno je nagnječenje na donjem zavojku, dok je na namotajima br. 10 i 50 uočen neadekvatan položaj međuzavojne izolacije (uvučena izolacija). Izvršena su ispitivanja ovih namotaja u cilju provere ispravnosti, metodom merenja pada napona između navojaka. Ispitivanjem nisu konstatovana odstupanja koja ukazuju na postojanje međuzavojnog spoja na ovim namotajima.

Uočeni nedostaci su otklonjeni. Izvršeni su odgovarajući reparacioni radovi na ovim polovima koji su podrazumevali određenu mehaničku obradu, dopunsko čišćenje uočenih zona između navojaka, a po potrebi i zamenu dela međuzavojne izolacije.

Na polu br. 22 bilo je neophodno izvršiti brušenje donje izolacione podloške radi obezbeđivanja zahtevanog položaja namotaja u odnosu na jezgro pola.

U toku završnih električnih ispitivanja na revitalizovanom polu br. 11 i 82 došlo je do proboja međuzavojne izolacije. Izvršena je odgovarajuća sanacija u fabrici.

Na jednom polu je došlo do proboja međuzavojne izolacije nakon sprovedenih električnih ispitivanja, nakon montaže istog na obod rotora. Pol je vraćen u fabriku na reparaciju.

4. ZAKLJUČAK

Ugovorom o revitalizaciji hidroagregata u HE Đerdap 1, za hidrogeneratore br. 4, br. 5 i br. 6 izvršena je isporuka NOVIH polova rotora glavnog generatora, dok je za hidrogeneratore

br. 1, br. 2 i br. 3 definisana revitalizacija postojećih polova koja je podrazumevala zadržavanje starih jezgara polova uz odgovarajuću sanaciju i montažu novih namotaja u fabrici proizvođača opreme u St. Peterburgu, Ruska Federacija.

Uzimajući u obzir tadašnju, situaciju u svetu konstatovan je ozbiljan rizik da se polovi rotora glavnog generatora pošalju u Rusku Federaciju na revitalizaciju.

Predstavnici AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6 imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji. Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršena je u domaćoj fabrici u Srbiji.

Dogovrena je i realizovana, tada jedino moguća solucija transporta neophodne opreme za završetak reavitalizacije agregata br. 3 (isporuka novih namotaja i montažnog materijala) – avionski transport (St. Peterburg, Istanbul, Beograd).

Izvršeno je usaglašavanje Tehničkog zadatka i Plana kontrole kvaliteta kojim su definisani svi neophodni sanacioni radovi, kontrolna merenja i ispitivanja na jezgrima polova, zatim kontrolna merenja i ispitivanja na isporučenim novim namotajima polova rotora i na kraju svi neophodni radovi i ispitivanja prilikom montaže namotaja na jezgro pola VPI metodom. Kontrolu ovih radova u domaćoj fabrici vršili su kontinuirano predstavnici proizvođača opreme, a radi očuvanja svih ugovorenih garancija na predmetnoj opremi nakon izvršene revitalizacije.

Revitalizacija polova rotora glavnog generatora u domaćoj fabrici, saglasno usaglašenoj teh-

nologiji sa proizvođačem opreme, predstavljala je značajan izazov kako za domaćeg Izvođača radova, tako i za HE Đerdap 1.

Izrada odgovarajućih alata za potrebe revitalizacije polova rotora glavnog generatora, u veoma kratkom roku, predstavljao je jedan značajan izazov u realizaciji ovog posla. HE Đerdap 1 je sopstvenim resursima izradio neohodan broj alata za presovanja namotaja na jezgru pola za potrebe impregnacije istih (slika 6.).

U toku izvođenja revitalizacionih radova na polovima nije bilo značajnijih problema. Neophodno je bilo sanirati manja oštećenja nastala na isporučenim namotajima, najverovatnije u procesu skladištenja i pakovanja za transport istih iz fabrike proizvođača opreme. Tokom revitalizacije polova došlo je do proboja međuzavojne izolacije na tri pola, što i nije neuobičajeno.

Glavne brige u pripremi i realizaciji ovog posla su bile sledeće:

- Nije izvršena predhodna kontrola i ispitivanje namotaja pre isporuke;
- Isporučen je tačan broj namotaja, bez rezerve;
- Nije bila predviđena isporuka rezervnih jezgara polova;
- Obezbeđivanje potrebnog tehničkog osoblja za realizaciju ovog posla;
- Poštovanje veoma kratkih rokova;
- Tehnički kapacitet domaće fabrike.

Na kraju, može se konstatovati da je domaća fabrika izvršila posao revitalizacije polova rotora glavnog generatora kvalitetno i u roku. Domaća fabrika je obezbedila neophodnu ispitnu i montažnu opremu i angažovala dodatni tehnički i stručni kadar kako bi svi radovi bili izvedeni shodno usvojenom Tehničkom zadatku i Planu kontrole kvaliteta. Nadzor isporučioća opreme nije imao primedbe na kvalitet i dinamiku izvedenih radova, što potvrđuje da je domaća fabrika posedovala odgovarajući kapacitet za izvođenje ovih revitalizacionih radova.

LITERATURA

1. Avonmore Electrical, <https://www.avonmore-electrical.com/workshop/our-equipment-processes/vpi/>
2. Godfrey & Wing, <https://www.godfreywing.com/blog/understanding-how-vacuum-pressure-impregnation-vpi-works>

PRIMJENA MEEC SOFTVERA U CILJU POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI OBJEKATA

Vidosava Babić
MTEL DOO Podgorica

Sandra Ivanović
S.A.R.D. DOO Budva

Đorđe Nedeljkov
Pomorski fakultet Kotor

KRATAK SADRŽAJ

Primjena energetske efikasnosti (EE) ima veliki značaj, s jedne strane u smanjenju potrošnje električne energije što direktno utiče na smanjenja emisije gasova staklene bašte koja imaju ogroman uticaj na klimatske promjene i nepredvidljive vremenske uslove, a s druge strane utiče na poboljšanje uslova života za korisnike. Jedan od načina postizanja EE kod objekata je i korišćenje fotonaponskih (FN) sistema koji u našoj elektrodistributivnoj (ED) mreži imaju sve veću primjenu kao obnovljivi izvori električne energije.

Cilj ovog rada je da prikaže značaj EE i mogućnosti korišćenja nacionalnog softvera za proračun energetske karakteristike zgrada - MEEC (Montenegrin Energy Efficiency Certification). Na ovaj način doprinosi se smanjenju troškova snabdijevanja energijom iz ED mreže, ublažavaju se klimatske promjene, što se pozitivno odražava na zaštitu životne sredine i zdravlje građana.

U ovom radu će biti prikazana analiza primjene FN na rezidencijalnom objektu, koji se nalazi u prvoj klimatskoj zoni Crne Gore. Parametarske analize će biti sprovedene u MEEC softveru i pokažeće energetske karakteristike zgrade za referentni objekat pri ostvarenim propisanim uslovima komfora, kao i nakon primijenjene mjere EE. Po istom principu date su i vrijednosti izračunate primarne energije, kao i CO₂ ekvivalenti.

Ključne riječi: EE, ED, MEEC, FN sistemi

1. UVOD

Sve veća potražnja za električnom energijom, uslovljena razvojem industrije, dovodi do toga da potrošnja tradicionalnih fosilnih goriva ubrzano raste, što za posljedicu ima sve veće zagađenje životne sredine. S druge strane, sve veći broj dokaza o fenomenima globalnog zagrijavanja, doveo je do novih mjera "odgovornog" upravljanja energijom, odnosno "nerasipanja energije", gdje je na globalnom nivou energetska efikasnost prepoznata kao mjera za ekonomičan i brz način za

snabdijevanje energijom [1].

Direktiva o energetske karakteristika zgrada (Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings - EPBD), predstavlja osnovni instrument politike Evropske unije u oblasti energetske efikasnosti zgrada. Crna Gora kao članica Energetske zajednice, takođe je u obavezi da odredbe EPBD Direktive prenese u svoje nacionalne zakone, što je i urađeno kroz donošenje Zakona o efikasnom korišćenju energije i ostalih podzakonskih akata. Evropska unija je definisala zahtjevne ciljeve u oblasti energetske efikasnosti u cilju sprečavanja klimatskih promjena.

Posebni ciljevi su poznati pod nazivom "20-20-20", a odnose se na smanjenje emisije gasova staklene bašte za 20%; povećanje udijela potrošnje električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije za 20% i smanjenje korišćenja primarne energije do 20%, u odnosu na podatke iz 1990. godine. Granice ovih ciljeva se stalno "pooštavaju" radi stabilizacije globalnog zagrijavanja i očuvanja životne sredine [2]- [7].

Najveći potencijal za poboljšanje energetske efikasnosti u potrošnji finalne energije je u zgradama, zatim u industriji, a potom u saobraćaju.

Udio potrošnje električne energije u zgradama je 55,86%, od ukupne potrošnje energije u 2023. godini u Crnoj Gori. Ovaj podatak ukazuje na značaj primjene mjera energetske efikasnosti upravo u ovoj oblasti. Takođe, udio proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije je za 7% veći u 2023. nego u 2022, što ukazuje na porast primjene mjera energetske efikasnosti u Crnoj Gori [8].

Energetska efikasnost zgrada ima za cilj smanjenje potrošnje električne energije, što direktno utiče i na smanjene emisije CO₂ i drugih gasova staklene bašte u atmosferu, a s druge strane vodi do poboljšanja uslova za boravak korisnika u njima. Svaka intervencija koju preduzmemo na zgradi, kako bi stvorili uslove da ona troši manje energije, a da komfor života bude povećan, jeste mjera energetske efikasnosti. Prednost treba dati mjerama koje će značajno doprinijeti smanjenju zahtjeva za energijom [9]- [10].

Najčešće mjere energetske efikasnosti su:

- zamjena neobnovljivih energenata obnovljivim (FN sistemi, toplotne pumpe, vjetrogeneratori, sunčevi toplotni kolektori, geotermalna energija, itd.);
- toplotna izolacija objekta;
- zamjena dotrajale stolarije;
- zamjena energetske neefikasnih potrošača efikasnim (zamjena uređaja za grijanje, hlađenje, rasvjetu, itd.);
- ugradnja mjernih i regulacionih uređaja za potrošače energije;
- kontrola ulaska sunčeve svjetlosti i toplote u prostor.

Ovaj rad je organizovan u pet poglavlja. Poslije kratkog uvoda u prvom poglavlju, u poglavlju dva opisan je nacionalni softver- MEEC koji se koristi za proračun energetske karakteristika zgrada u Crnoj Gori. FN sistem priključen na ED mrežu preko kućne instalacije opisan je u poglavlju tri. U četvrtom poglavlju prikazana je primjena FN sistema na rezidencijalnom objektu koji se nalazi u Tivtu, korišćenjem MEEC softvera. Takođe je analizirana primjena i drugih mjera energetske efikasnosti. U poglavlju pet dati su zaključci rada.

2. MEEC SOFTVER

MEEC (Montenegrin Energy Efficiency Certification) je nacionalni softver za proračun energetske karakteristika zgrada u Crnoj Gori. Primjenom MEEC softvera, stvoreni su uslovi da se proračun energetske karakteristika zgrada u Crnoj Gori sprovodi prema važećem međunarodnom standardu DIN V 18599, što znači da se prilikom izračunavanja energetske bilansa zgrade primjenjuje integrativni pristup, tj. uzima se u obzir interakcija između omotača zgrade i tehničkih

sistema u zgradi [11].

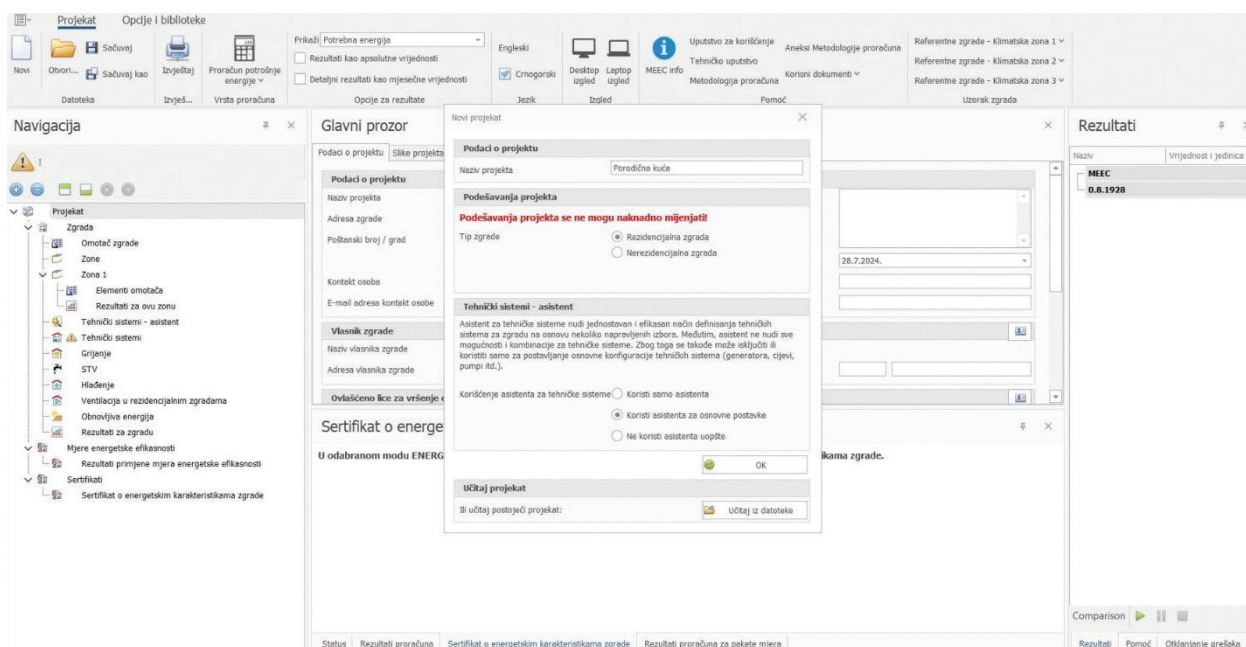
MEEC softver je besplatan. Prvenstveno je namijenjen energetske auditorima, ali je i na raspolaganju svim zainteresovanim stručnim licima (projektantima, inženjerima, studentima, itd.) Dostupne su verzije softvera na engleskom i crnogorskom jeziku. Softver se može preuzeti sa web sajta: www.meec.me. [12]. Softver je primjenljiv za rezidencijalne i nerezidencijalne zgrade, kao i za nove i postojeće zgrade.

MEEC softver podržava dva načina rada:

(i) proračun za sertifikovanje energetske karakteristika zgrada, koji podrazumijeva proračun pri standardizovanim uslovima, odnosno onemogućena je izmjena podataka koji su predefinisani u korisničkim profilima;

(ii) proračun potrošnje energije, koji podrazumijeva mogućnost izmjene podataka predefinisanih u korisničkim profilima u skladu sa stvarnim načinom korišćenja zgrade.

Proračun energetske bilansa uključuje energiju za grijanje, hlađenje, ventilaciju, pripremu sanitarnih tople vode (STV), rasvjetu i potrošnju ostalih uređaja i opreme. Pored konačnih rezultata, MEEC softver prikazuje i međurezultate tokom čitavog procesa unošenja podataka (Slika 1).



Slika 1. MEEC - Mogući načini korišćenja softvera

U ovom radu energetske karakteristike zgrade urađene su za porodični stambeni objekat, koji prema Pravilniku o minimalnim zahtjevima energetske efikasnosti zgrada i pripada I zoni [13].

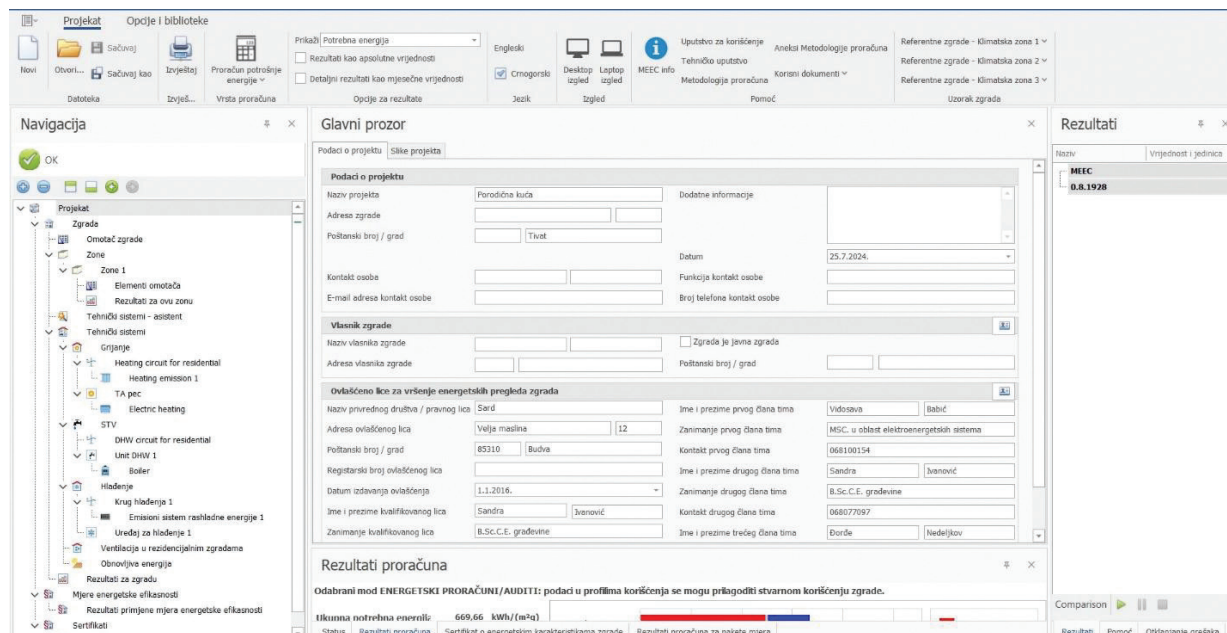
Proces modelovanja porodične kuće podrazumijeva definisanje određenih parametara koji su od uticaja na potrošnju energije, a koji se prije svega odnose na:

- definisanje elemenata omotača zgrade prema spoljašnjoj sredini ili prema drugom grijanom ili negrijanom prostoru;
- definisanje tehničkih sistema u zgradi koji su relevantni sa aspekta proizvodnje ili potrošnje energije u cilju zadovoljavanja potreba za grijanjem, hlađenjem, pripremom STV, osvjetljenjem i dr.

Za proračune rezidencijalnih objekata predviđen je pojednostavljeni pristup koji podrazumijeva da se čitava zgrada posmatra kao jedna zona, dok se u slučaju nerezidencijalnih objekata proračun primjenjuje prema standardu DIN V 18599 koji predviđa korišćenje različitih zona. Zone se definišu u zavisnosti od primijenjenih tehničkih sistema u zgradi, kao i različitih načina korišćenja prostora unutar objekta. Opcija izbora pojednostavljenog pristupa je moguća i za nerezidencijalne objekte za koje se smatra da ova simplifikacija neće bitnije uticati na rezultate (udio pojedinih

zona nije veliki, sistem grijanja/hlađenja je zajednički za cijeli objekat, itd.) [14].

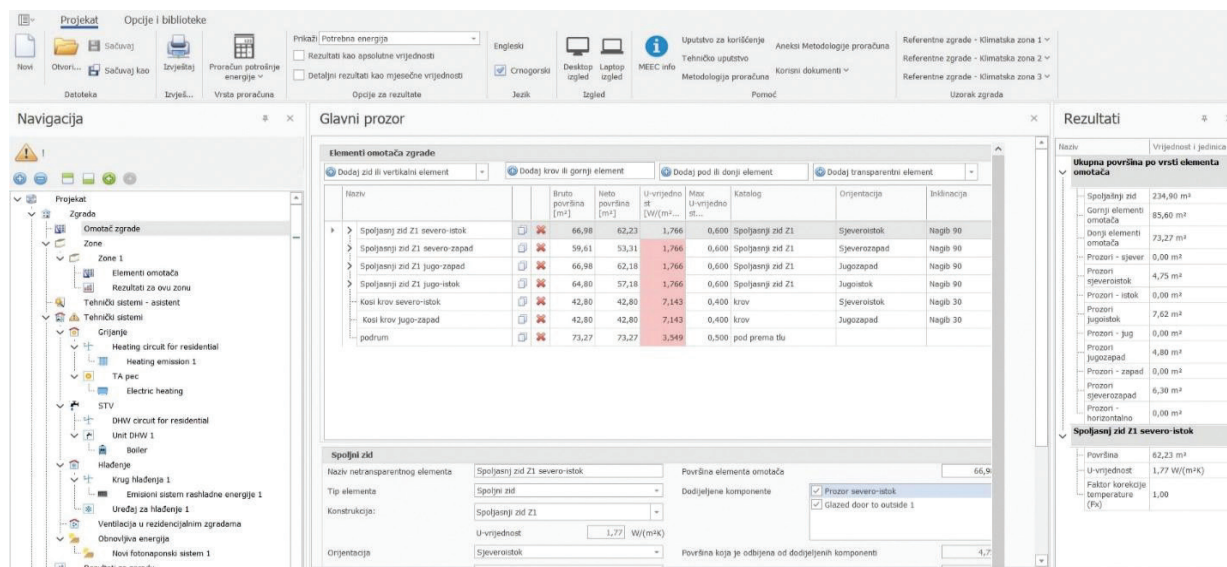
Prikaz korisničkog interfejsa MEEC softvera, gdje se u glavnom meniju vrši odabir opcija (moda korišćenja, jezika, prikaza ekrana, itd.), a na raspolaganju korisnicima je i različita dokumentacija koja se koristi u softverskim proračunima (pravilnici, metodologije, uputstva, itd.). Glavni prozor, u sredini, služi za unos podataka, dok rezultate unosa možemo pratiti u rezultatima proračuna koji se nalazi ispod. U navigacionom meniju, sa lijeve strane, vrši se odabir elemenata objekta koje definišemo, a sa desne strane je meni za prikaz rezultata (Slika 2).



Slika 2. MEEC - Unos podataka za rezidencijalni objekat

Modelovanje samog objekta u MEEC softveru podrazumijeva definisanje određenih parametara koji su od uticaja na potrošnju energije, a koji se prije svega odnose na:

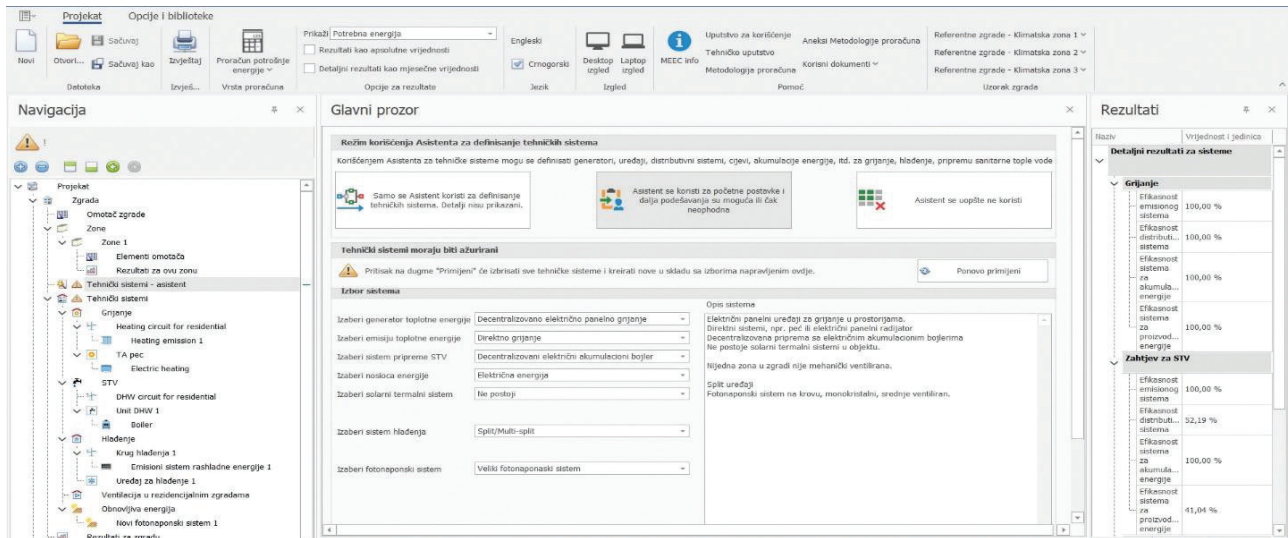
- definisanje elemenata omotača zgrade prema spoljašnjoj sredini ili prema drugom grijanom ili ne grijanom prostoru (Slika 3);
- definisanje tehničkih sistema u zgradi koji su relevantni sa aspekta proizvodnje ili potrošnje energije u cilju zadovoljavanja potreba za grijanjem, hlađenjem, pripremom STV, osvjetljenjem i dr.



Slika 3. MEEC - Unos elemenata omotača objekta

Kada su u pitanju tehnički sistemi, MEEC softver nudi tri mogućnosti: (i) korišćenje pomoći (HVAC wizard), što predstavlja pojednostavljeni pristup - vrši se brz i lak izbor ponuđenih opcija za sisteme u objektu (npr. izvor toplote, nosilac energije, tip emisionih tijela za sistem grijanja, itd.);

(ii) korišćenje pomoći (HVAC wizard) kako bi se otpočelo sa detaljnijim definisanjem parametara sistema; (iii) detaljan opis svih sistema u objektu (bez upotrebe HVAC wizarda), što zahtijeva dostupnost velike količine podataka o sistemima i unošenje većeg broja parametara (Slika 4).

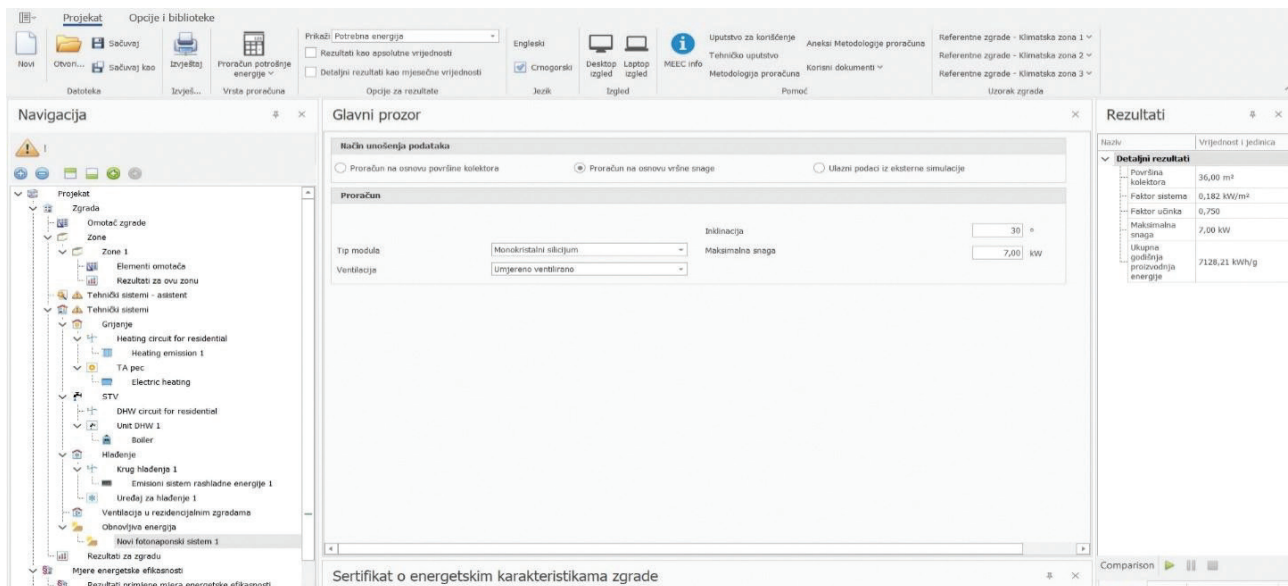


Slika 4. MEEC - Definisanje tehničkih sistema (HVAC wizard)

Dodatno MEEC omogućava i modelovanje sistema za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, kao što su FN sistemi (Slika 5).

Modelovanje FN sistema se može vršiti na dva načina:

- prema površini solarnih panela;
- prema snazi solarnih panela.



Slika 5. MEEC - Modelovanje FN sistema

3. FOTONAPONSKI SISTEMI

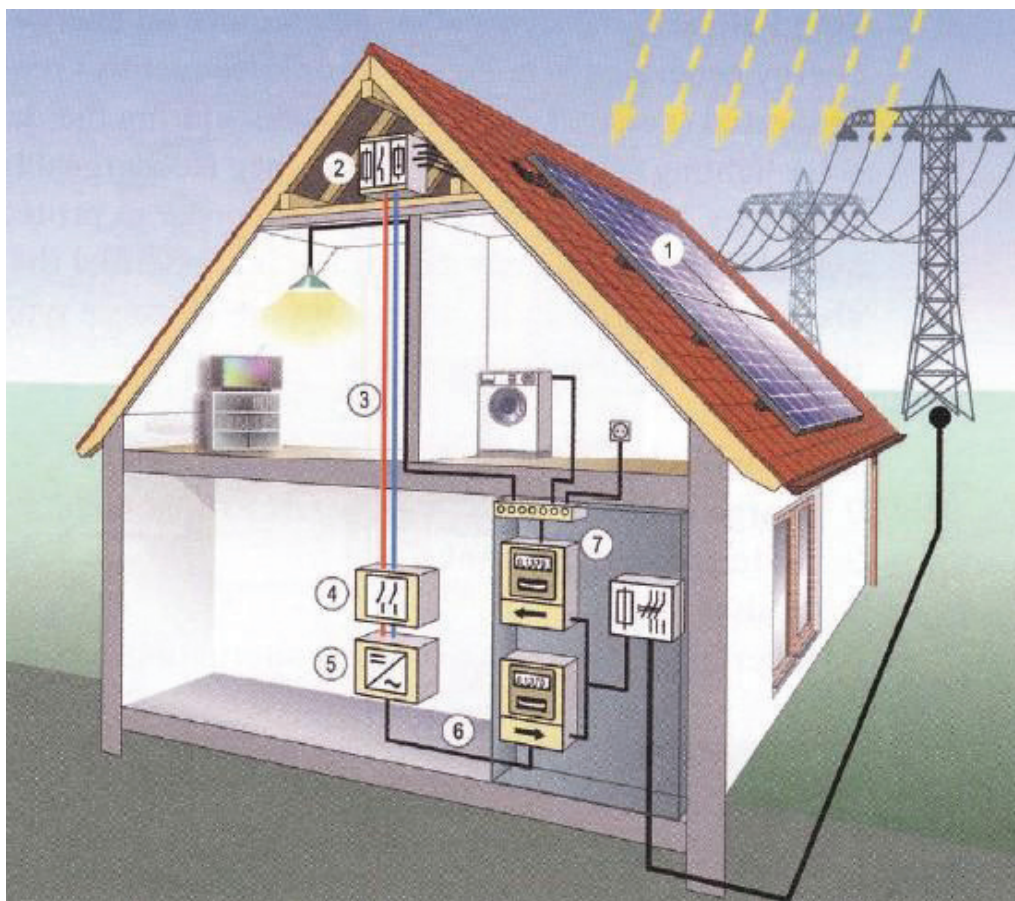
Energija proizvedena u FN panelima zavisi uglavnom od solarne energije dostupne na lokaciji. Faktori koji utiču na solarnu energiju koju prikuplja FN panel su: geografska lokacija, temperatura okoline, indeks čistoće, nagib i orijentacija FN panela i vrsta fotonaponske ćelije [15].

Najvažniji dio FN panela je fotonaponska ćelija u kojoj se odvija proces transformacije sunčeve u električnu energiju. Spajanjem solarnih panela u fotonaponske nizove, formiraju se solarni FN sistemi.

Fotonaponske sisteme dijelimo na dvije osnovne grupe: FN sistemi koji nisu priključeni na mrežu (engl. off-grid), a često se nazivaju i nezavisnim ili samostalnim sistemima (engl. stand-alone systems), i sistemi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (engl. on-grid) [16].

Sistemi priključeni na javnu ED mrežu mogu biti spojeni preko kućne instalacije ili spojeni direktno na ED mrežu. Solarne elektrane spojene na ED mrežu preko kućnih instalacija dijele se po snagama na elektrane do 30 kW, od 30 kW do 100 kW i elektrane preko 100 kW. FN sistem priključen na ED mrežu preko kućne instalacije je u paralelnom radu sa ED mrežom. Njegova primarna namjena je da napaja potrošače električnom energijom u objektu, a višak električne energije predaje u ED mrežu. Komponente ovog FN sistema čine sljedeći elementi (Slika 6):

1. fotonaponski paneli;
2. spojna kutija sa zaštitnom opremom;
3. kablovi DC razvoda;
4. glavna sklopka za odvajanje;
5. inverter DC/AC;
6. kablovi AC razvoda;
7. brojila predate i preuzete električne energije.



Slika 6. FN sistemi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije [17].

Priključenje FN sistema na ED mrežu može se razlikovati i prema broju invertera i to su sistemi sa: jednim inverterom (kod malih FN sistema), inverter za svaki fotonaponski niz (kod FN sistema srednjih snaga) i sistem sa više invertera (kod FN sistema većih snaga).

Način priključenja, procedure i tehničke karakteristike solarne elektrane koja je spojena na ED mrežu preko kućne instalacije snage do 30 kVA, definisano je kroz tehničke zahtjeve Crnogorskog elektrodistributivnog sistema [18].

4. PRIKAZ REZULTATA

Mjere energetske efikasnosti primijenjene su na rezidencijalnom objektu koji se nalazi na teritoriji opštine Tivat, koja pripada I klimatskoj zoni. Objekat je namijenjen porodičnom stanovanju i orjentisan je u pravcu jugoistok-sjeverozapad. Sastoji se od djelimično ukopanog suterena i dvije nadzemne etaže, prizemlja i sprata. Krov se sastoji od drvene konstrukcije pokrivena crijepom i prostire se na dvije vode pod nagibom od 30°. Godina izgradnje objekta je 1973. Objekat ne posjeduje termoizolaciju, a postojeća vrata i prozori su od drveta.

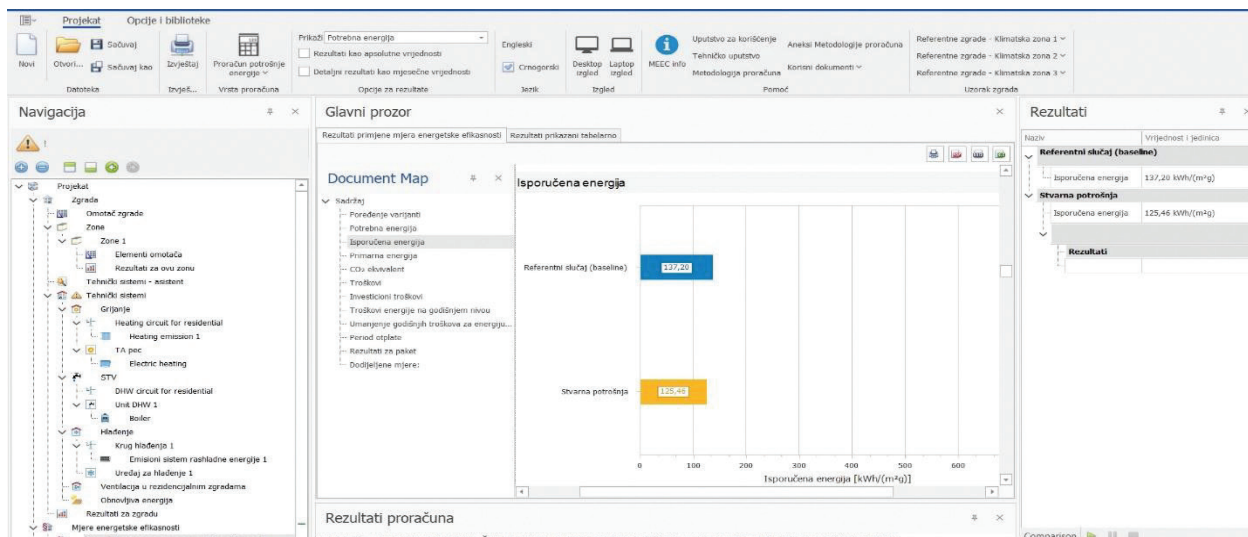
Prema podacima o potrošnji električne energije objekta, koja se zadnjih godina kretala oko 10000-11000kWh/g instaliran je FN sistem odnosno mala elektrana za sopstvene potrebe, prema Rješenju o saglasnosti na priključenje kapaciteta 8kW, a odobrena priključna snaga na postojećem priključnom mjestu je 16kW.

Unosom konkretnih podataka za dati rezidencijalni objekat, MEEC generiše energetski bilans cjelokupnog objekta iskazan preko potrebne energije, isporučene energije i primarne energije. Vrijednosti mogu biti prikazane kao apsolutne (u kWh), a mogu se iskazati i po jedinici referentne površine (u kWh/m²). U oba slučaja, sa grafikona se može očitati i udio pojedinih bilansnih stavki (grijanje, hlađenje, STV i pomoćna energija) u ukupnoj potrošnji energije (Slika 7).



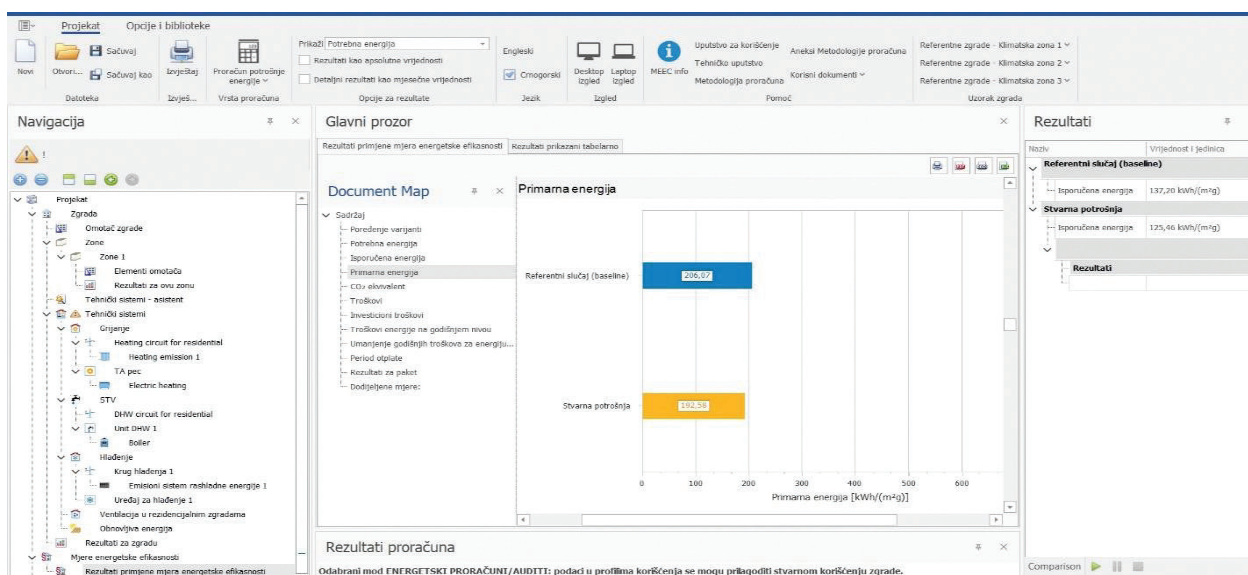
Slika 7. MEEC - Prikaz rezultata proračuna

U svim proračunima, poređenje rezultata vrši se u odnosu na referentni slučaj (base line), gdje su za unijete konkretno vrijednosti o objektu u njemu zadovoljeni propisani uslovi komfora (temperatura i vlažnost vazduha). Vrijednost isporučene energije za objekat prije primjene mjera energetske efikasnosti (Slika 8).



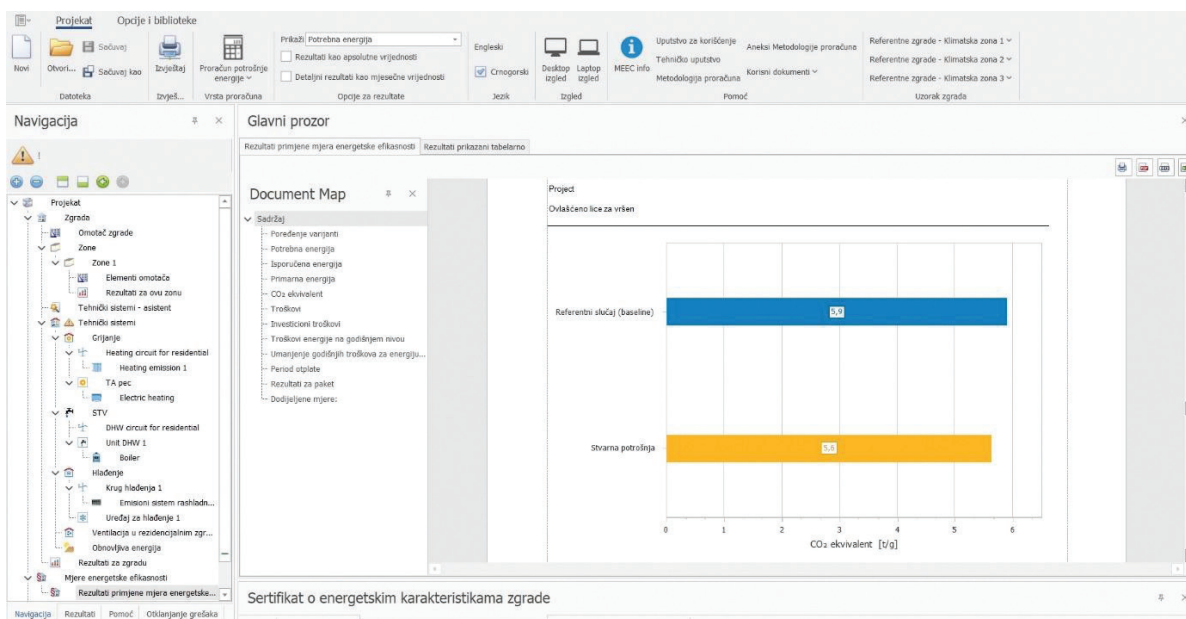
Slika 8. MEEC - Prikaz rezultata isporučene energije

Analogno tome, korišćenjem MEEC softvera dat je prikaz potrebne primarne energije odnosno izvornog oblika energije prije bilo koje konverzije za dati objekat (Slika9).



Slika 9. MEEC - Prikaz rezultata primarne energije

Za izračunatu referentnu i stvarnu potrošnju električne energije objekta, MEEC softver daje i prikaz njihovih CO2 ekvivalenata (Slika10).



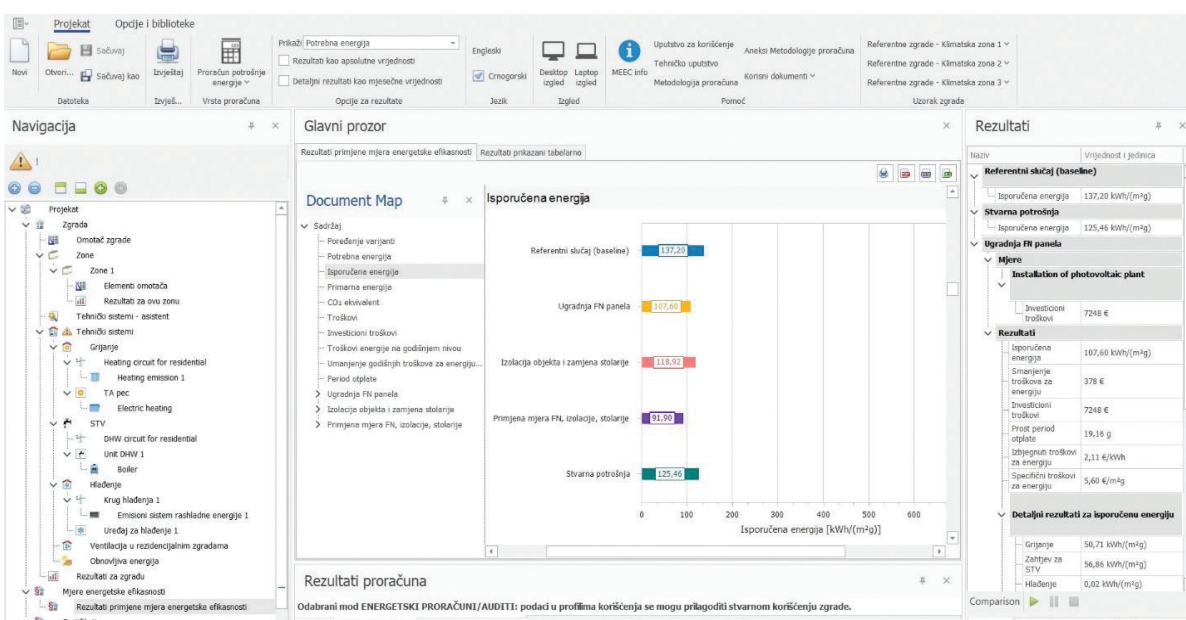
Slika 10. MEEC - CO₂ ekvivalent

U stvarnim uslovima na ovom rezidencijalnom objektu primijenjena je mjera instalacije FN elektrane kapaciteta 8kW koja se sastoji od 18 panela i jednog invertora tipa 8.8 KTLX - G3 [19] - [20]. Kroz MEEC program to je simulirano preko mjere energetske efikasnosti - ugradnja FN panela (Slika 5). Unošenjem podataka za: izbor tehnologije fotonaponskih panela (monokristalni moduli); nagiba panela (30°), načina ventilacije (umjereno ventilirani) i maksimalne snage invertora (8kW) dobijaju se podaci o ukupnoj godišnjoj proizvedenoj energiji u kWh/g.

Vrijednosti proizvedene energije pomoću ovih panela [19] na datom objektu podudaraju se sa podacima dobijenim preko MEEC programa, i oni iznose oko 8000 kWh/g.

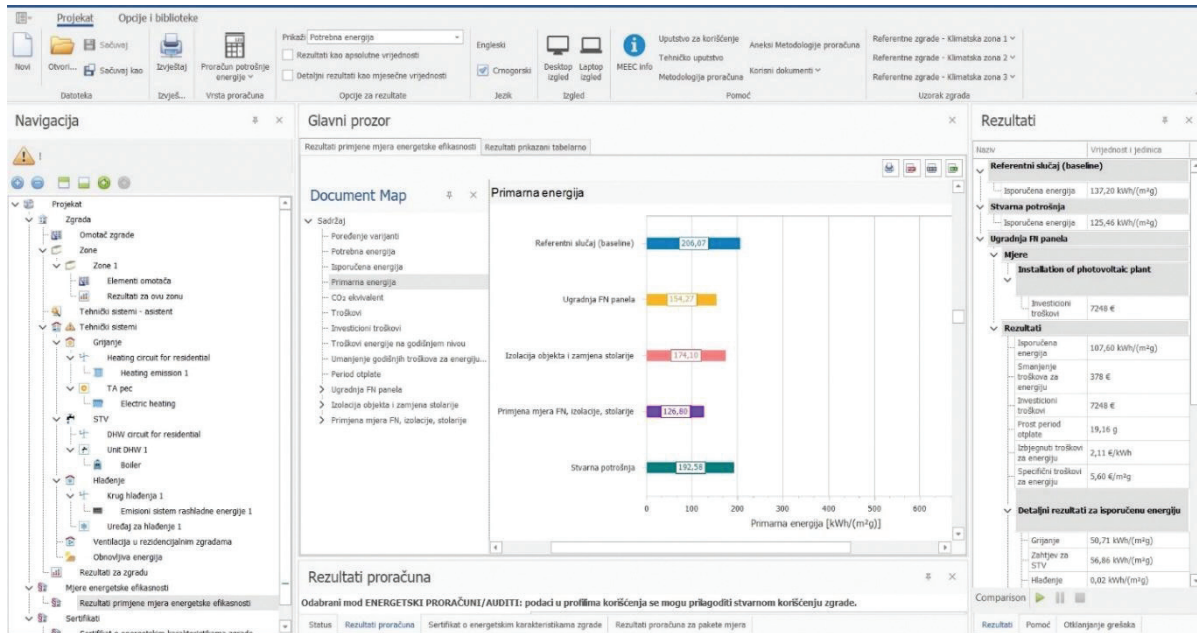
S ciljem daljeg poboljšanja energetskog stanja objekta, kroz program je simuliran dodatni paket mjera za poboljšanje EE, koji uključuje postavljanje termoizolacije u vidu ekspaniranog polistirena (EPS) debljine 8 cm, na do sada termo-neizolovanom objektu, zamjenu postojećih drvenih vrata i prozora sa energetski efikasnijim, upotrebom petokomornog PVC profila sa dvoslojnim staklom.

Vrijednost isporučene energije za objekat nakon primijenjenih mjera EE (Slika 11).



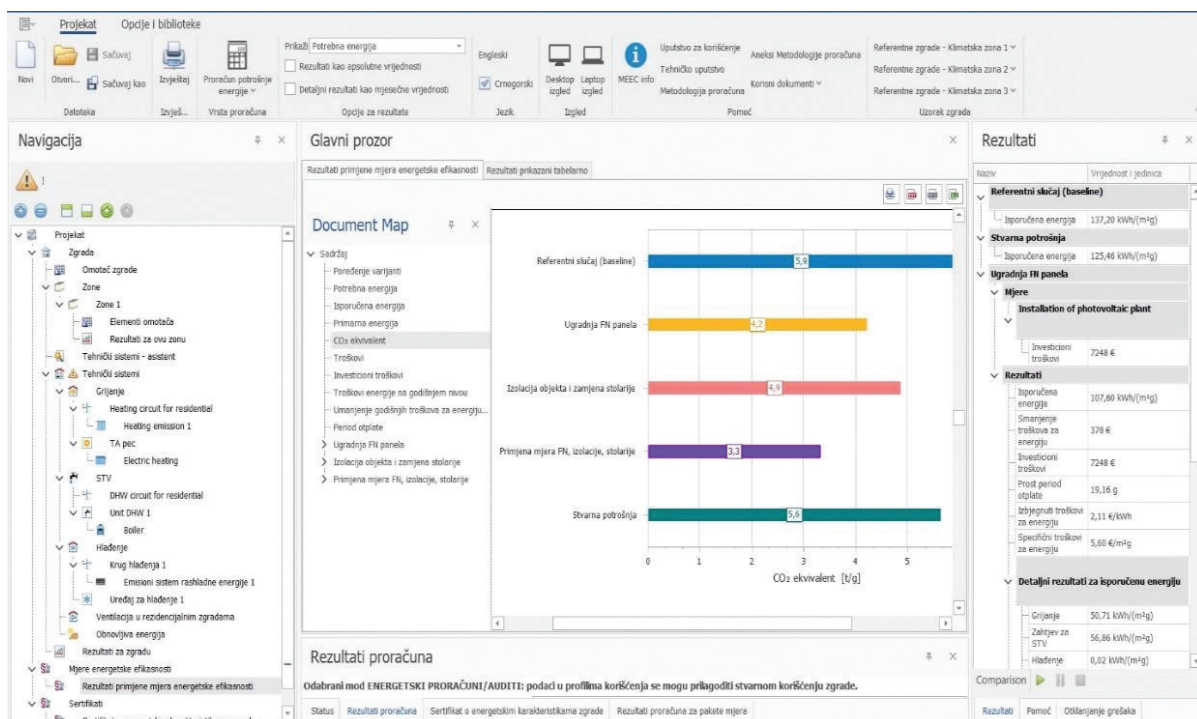
Slika 11. MEEC - Prikaz rezultata isporučene energije nakon primijenjenih mjera EE

Potrebna primarna energija za dati objekat nakon primijenjenih mjera EE (Slika 12).



Slika 12. MEEC - Prikaz rezultata primarne energije nakon primijenjenih mjera EE

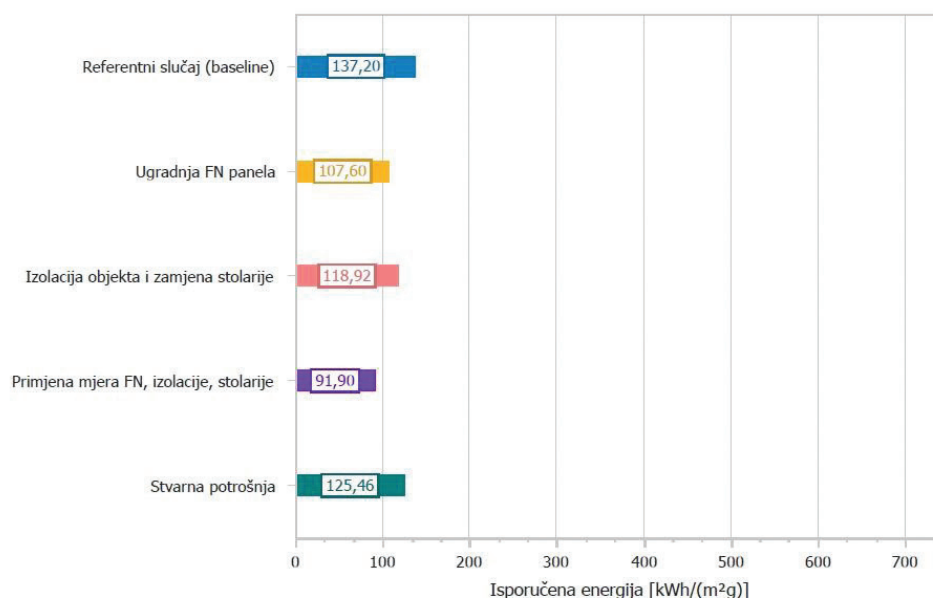
Prikaz odgovarajućeg ekvivalenta CO₂ nakon primijenjenih mjera EE (Slika13).



Slika 13. MEEC - CO₂ ekvivalent nakon primijenjenih mjera EE

MEEC softver omogućava nam eksportovanje rezultata primijenjenih mjera EE u pdfu, wordu i excelu. Eksportom podataka u excelu dobijamo grafikon sa prikazima vrijednosti isporučene energije (Slika14).

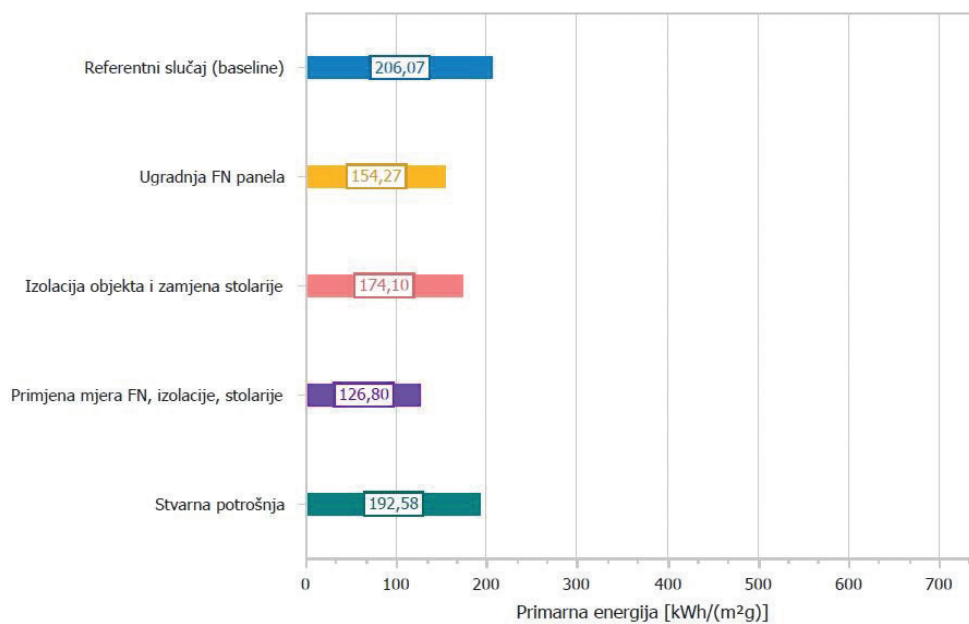
Isporučena energija



Slika 14. Prikaz rezultata isporučene energije nakon primijenjenih mjera EE

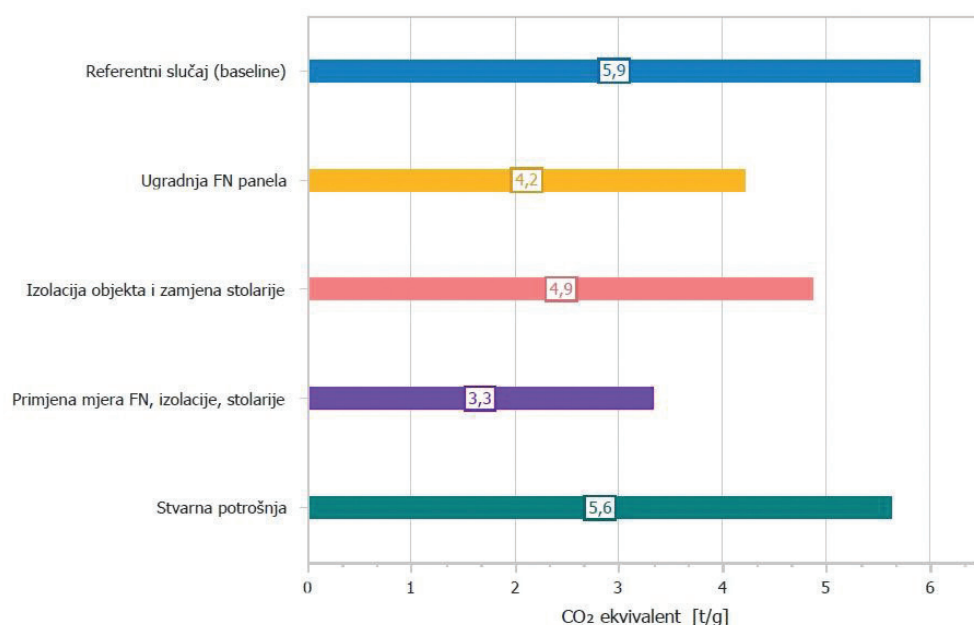
Grafikon sa podacima o primarnim energijama nakon primijenjenih mjera EE (Slika 15).

Primarna energija



Slika 15. Prikaz rezultata primarne energije nakon primijenjenih mjera EE

Grafički prikaz odgovarajućeg ekvivalent CO₂ nakon primijenjenih mjera EE (Slika16).



Slika 16. CO₂ ekvivalent nakon primijenjenih mjera EE

Primjenom prve mjere EE na ovom objektu tj. ugradnjom FN panela isporučena električna energija objektu smanjena je za 17,86kWh/m²g, a njemu odgovarajući ekvivalent CO₂ za 1.4t/g. Ukoliko bi se na objektu primijenio novi paket mjera EE koji uključuje termoizolaciju spoljašnjih zidova sa ekspaniranim polistirenom, ugradnju novih PVC vrata i prozora, na godišnjem nivou isporučena energija bi se smanjila ukupno za 33,56kwh/m²g, a njemu odgovarajući ekvivalent CO₂ za 2.3t/g. Prikazani podaci odnose se na realne uslove korišćenja objekta gdje je pokazano da se i količina primarne energije potrebna za dati objekat poslije primjene FN sistema smanjuje za 38,31kWh/m²g odnosno primjenom dodatog paketa mjera za 65,78kWh/m²g.

5. ZAKLJUČAK

Dobijanje električne energije iz fosilnih goriva kao primarnog energenta, sa sobom nosi niz negativnih posljedica, posebno ekoloških, što je podstaklo istraživanja o mogućnostima dobijanja električne energije iz obnovljivih izvora.

U ovom radu je kroz primjenu MEEC softvera analizirana primjena FN sistema na rezidencijalnom objektu, u cilju poboljšanja EE objekta. Koristeći MEEC softver uz realne podatke sa rezidencijalnog objekta, primjenom i realizacijom prve mjere EE ugradnjom FN elektrane, pokazano je da dolazi do uštede u potrošnji primarne energije, odnosno isporučene energije, a što za posledicu ima smanjenje emisije CO₂, umjesto nekadašnjih 5,9t/g na 4,2t/g. Pored ovog najznačajnijeg benefita u očuvanju životne sredine, ostvaruje se i benefit u ekonomskom smislu jer se data elektrana može koristiti i 15 godina nakon isplate uložениh sredstava.

LITERATURA

1. Mellit, A; Kalogirou, S.A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review, Prog. Energy Combust. Sci. 2008, 34, 574-632. [CrossRef]
2. B. Pavlović, M. Vujadinović Kulinović, "MEEC-Nacionalno softver za proračun energetske karakteristika zgrada u Crnoj Gori", IKCG Peti dani elektroinženjera IKCG, Zbornik radova, str. 47-57, Podgorica, mart 2022.
3. Direktiva 2002/91/EC o energetske svojstvima zgrada/ Direktiva 2002/91/EC Evropskog parlamenta i Saveta od 16. decembra 2002. o energetske karakteristika zgrada (Službeni list L 001,04/01/2003);
4. Direktiva 2010/31/EU Evropskog parlamenta i Evropskog savjeta od 19. maja 2010. o energetske karakteristika zgrada;
5. Direktiva o energetske efikasnosti 2012/27/EU (Energy Efficiency Directive - EED);
6. Direktiva 2018/844/EU Evropskog parlamenta i Evropskog savjeta od 30. maja 2018. o izmjeni Direktive 2010/31/EU o energetske karakteristika zgrada;
7. Zakon o efikasnom korišćenju energije ("Službeni list Crne Gore", br. 57/14, 29/10 i 140/22 140/22);
8. Izvještaj o realizaciji energetske bilansa za 2023. godinu, Ministarstvo energetike i rudarstva
9. Vukadinović, Radosavljević, Protić, Ristić, "Mere za poboljšanje energetske efikasnosti zgrada", Stručni rad, Fakultet zaštite na radu, Niš UDC: 697.7:620.92
10. Mašinski fakultet i Arhitektonski fakultet UCG, "Energetska efikasnost zgrada" - Metodologija energetske pregleda i proračuna indikatora EE", Podgorica, 2011.
11. DIN V 18599: 2018-09: Energy efficiency of buildings - Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting.
12. www.meec.me.
13. Pravilnik o minimalnim zahtjevima energetske efikasnosti zgrada ("Sl. list CG", br.47/2024.)
14. Pravilnik o sertifikovanju energetske karakteristika zgrada ("Sl. list CG", br.47/2024.)
15. Samer Alsadi, Tamer Khatib, Photovoltaic Power Systems Optimization Research, Published: 29 September 2018
16. Ljubomir Majdandžić, "Fotonaponski sustavi", Priručnik, Graphis, 2010.
17. D. Šljivac, D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, FERIT Osijek, 2018.
18. Tehnički zahtjevi Crnogorskog elektrodistributivnog sistema br.-10-10-28948-od-13.09.2021.
19. <https://www.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/51111> <https://drive.google.com/file/d/1jiH8Zo2dmEQMaaDl4fv8Q4hb8yFhQYZV/view>

IMPLEMENTACIJA SISTEMA ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNjom (MES) U MLJEKARI NIKA - NIKŠIĆ

Kosta Strunjaš

Deltahes d.o.o. Nikšić

KRATAK SADRŽAJ

Implementacija *Manufacturing Execution System*-a (u daljem tekstu MES) u industriji mliječnih proizvoda unosi revoluciju u proizvodne procese integriranjem podataka u realnom vremenu i korišćenjem naprednih tehnologija. Ovaj MES sistem koristi podatke iz mreže senzora, uključujući senzore nivoa, senzore pritiska, stanja mašina, pogona i slično, kako bi nadgledao i upravljao cjelokupnom proizvodnom linijom. Upotrebom najnovijih tehnologija kao što su *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) za efikasan prenos podataka, PLC-ova (*Programmable Logic Controller*) za automatsku kontrolu i SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) za nadzor sistema, MES osigurava neometano funkcionisanje i optimalno korišćenje resursa.

Sistem podržava kreiranje radnih naloga, pružajući strukturisan pristup proizvodnim zadacima i osiguravajući dosljednost i kvalitet. Alati za vizualizaciju unutar MES-a nude uvid u realnom vremenu u proizvodni proces, omogućavajući operaterima da prate performanse i brzo rješavaju eventualne probleme. Dodatno, funkcionalnost zasnovana na receptima omogućava preciznu kontrolu nad formulacijama proizvoda, poboljšavajući kvalitet i dosljednost proizvoda.

Sve u svemu, ovaj napredni MES sistem ne samo da poboljšava operativnu efikasnost, već pruža i robusnu platformu za donošenje odluka zasnovanih na podacima. Korišćenjem najnovijih *Industrial Internet of things* (IIoT) tehnologija, industrija mliječnih proizvoda može postići veću transparentnost, sledljivost i fleksibilnost u svojim proizvodnim procesima, što na kraju vodi do proizvoda višeg kvaliteta i povećanog zadovoljstva kupaca.

Ključne riječi: MQTT, Industrija 4.0, Cloud, MES, IIoT, CDS – *Common Data Stack*

1. UVOD U MES

Manufacturing Execution System (MES) je suštinski dio modernih proizvodnih sistema, koji omogućava sinhronizaciju i kontrolu proizvodnih operacija. MES služi kao posrednik između proizvodnih pogona i korporativnih sistema kao što su ERP (*Enterprise Resource Planning*) i SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Njegova glavna uloga je da obezbijedi pravovremene informacije i kontrolu nad proizvodnim procesima, omogućavajući efikasno upravljanje resursima, praćenje performansi i postizanje visokih standarda kvaliteta [1].

U mlječnoj industriji, primjena MES sistema je posebno značajna zbog kompleksnosti proizvodnih procesa i visokih standarda kvaliteta koje je potrebno održavati. Procesi kao što su pasterizacija, homogenizacija, skladištenje i pakovanje mlječnih proizvoda zahtijevaju precizno praćenje i visok stepen kontrole. MES omogućava praćenje ključnih parametara kao što su temperatura, pritisak, nivo i protok, osiguravajući da svaki korak proizvodnje ispunjava stroge regulative i standarde kvaliteta.

Funkcije MES sistema u mlječnoj industriji:

- Kontrola procesa i sledljivost: MES omogućava praćenje svih faza proizvodnje u realnom vremenu, prikupljajući podatke sa senzora i opreme. Na primjer, u procesu pasterizacije, MES prati temperature i trajanje pasterizacije, obezbjeđujući da proizvod prođe kroz pravilan tretman i ispunjava sigurnosne zahtjeve.
- Upravljanje resursima: MES koordinira rad mašina, opreme i ljudstva, optimizujući upotrebu resursa. Ovo uključuje planiranje radnih naloga, kontrolu zaliha sirovina i materijala, kao i upravljanje energijom.
- Automatizacija i kontrola kvaliteta: Kroz integraciju sa postojećim kontrolnim sistemima (kao što su PLC-ovi), MES omogućava automatsku kontrolu i podešavanje proizvodnih parametara. Ovo smanjuje rizik od ljudskih grešaka i poboljšava dosljednost proizvoda.
- Praćenje performansi i efikasnosti: MES prikuplja podatke o performansama opreme, produktivnosti i kvalitetu proizvoda. Ovi podaci se koriste za izračunavanje ključnih indikatora performansi (KPI) i ukupne efikasnosti opreme (OEE), što pomaže u identifikaciji i otklanjanju uskih grla i poboljšanju efikasnosti proizvodnje.

Implementacija MES sistema u mljekarama donosi niz prednosti, uključujući smanjenje otpada, povećanje produktivnosti, bolju kontrolu kvaliteta i poboljšanje sledljivosti proizvoda. MES sistem postavlja temelje za uvođenje principa Industrije 4.0, omogućavajući integraciju pametnih uređaja, analitike podataka i automatizacije u jedan kohezivan sistem.

2. PREGLED KORIŠĆENIH TEHNOLOGIJA

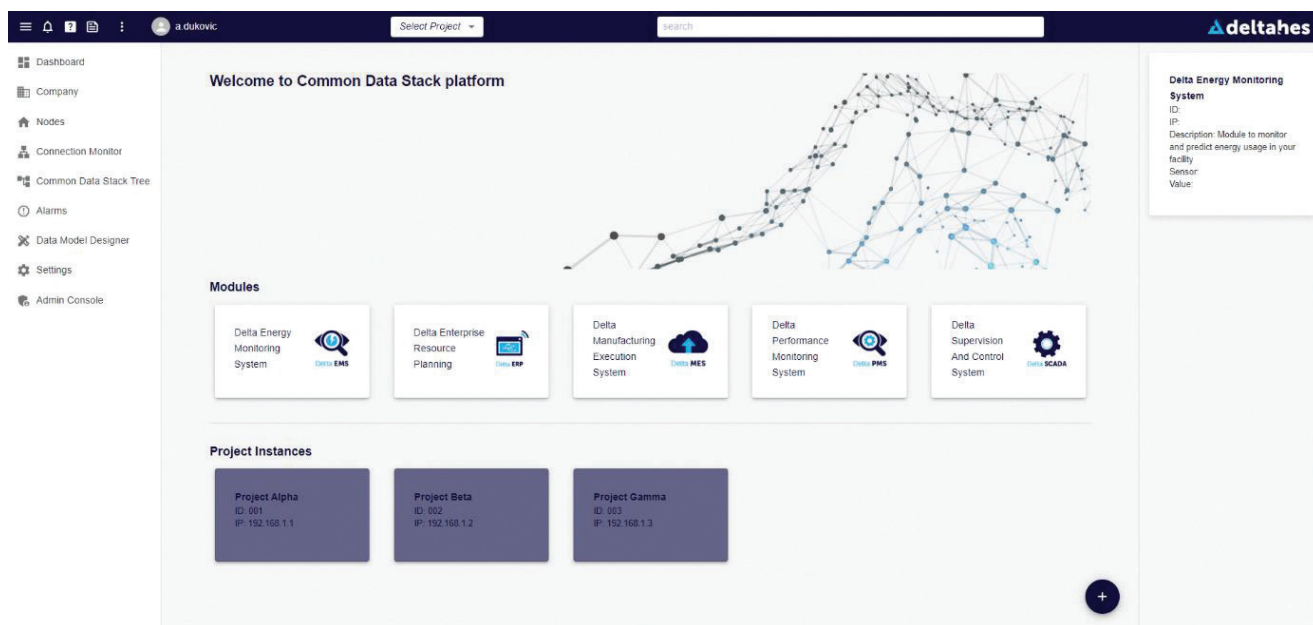
U mljekarama, tradicionalno se koriste različiti sistemi i uređaji za kontrolu i praćenje procesa, ali često rade izolovano, bez mogućnosti međusobne komunikacije i integracije podataka. Platforma koja je korišćena za izradu ovog MES sistema, *Common Data Stack* (CDS), rješava ovaj problem pružajući centralizovan i integrisan pristup za prikupljanje, obradu i analizu podataka iz različitih izvora.

Karakteristike CDS platforme:

- *Data Pipeline Connector*: Ovo je ključni element za povezivanje IIoT uređaja i senzora sa centralnim sistemom. Korišćenjem alata kao što su Node-RED i Benthos, CDS omogućava fleksibilnu i prilagodljivu obradu podataka u različitim scenarijima integracije. Na primjer, Node-RED omogućava vizuelno programiranje toka podataka, olakšavajući povezivanje senzora, mašina i aplikacija.
- *Event-Driven Message Broker*: CDS koristi MQTT i Apache Kafka za prenos podataka u realnom vremenu. Ovo omogućava brzu i pouzdanu komunikaciju između različitih djelova

sistema, osiguravajući da svi podaci budu odmah dostupni za analizu i akciju. Ovo je posebno važno u situacijama kada je potrebno odmah reagovati na promjene u proizvodnom procesu, kao što su prekidi rada opreme ili promjene u parametrima proizvodnje [2].

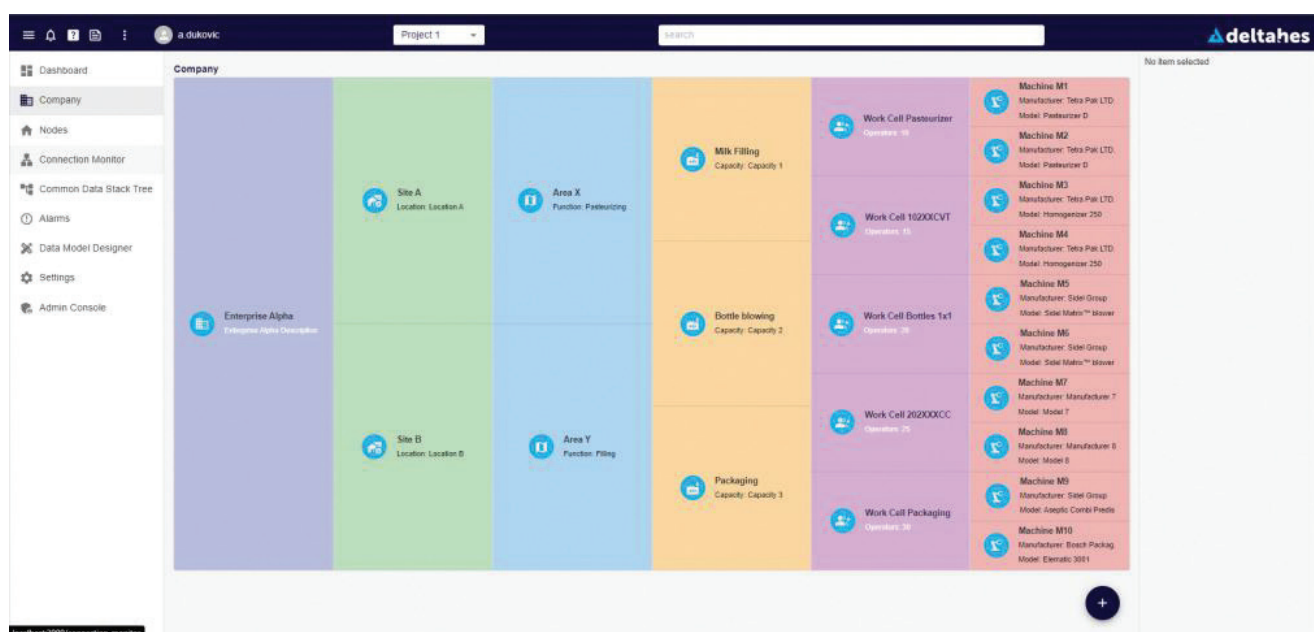
- **Data Model Designer:** Ovaj alat omogućava kreiranje modela koji predstavljaju različite aspekte proizvodnog procesa. Korisnici mogu definisati strukturu podataka, pravila i logiku koja se primjenjuje na podatke, omogućavajući prilagođavanje sistema specifičnim potrebama proizvodnje. Na primjer, može se kreirati model za praćenje protoka mlijeka kroz različite faze proizvodnje, od prijema sirovine do finalnog proizvoda.
- **User Tools Viewer:** CDS se integriše sa alatima za vizualizaciju podataka kao što je Grafana. Ovo omogućava kreiranje prilagođenih nadzornih ploča koje prikazuju ključne informacije o proizvodnji, kao što su OEE, KPI, potrošnja energije i status opreme. Korisnici mogu lako pristupiti ovim informacijama sa bilo kog uređaja, uključujući računare, tablete i pametne telefone.



Slika 1. Izgled CDS platforme

Jedna od ključnih prednosti CDS platforme je njena usklađenost sa međunarodnim standardima, posebno sa ISA-95 standardom. ISA-95 je međunarodni standard za integraciju sistema automatizacije i informacionih sistema na nivou preduzeća. On definiše model podataka i procesne tokove za povezivanje proizvodnih i poslovnih sistema, omogućavajući efikasnu razmjenu informacija i integraciju podataka.

Korisnici mogu brzo kreirati modele podataka koji prate ovaj standard, čime se obezbjeđuje dosljednost i interoperabilnost između različitih sistema i aplikacija. Na primjer, moguće je lako definisati proizvodne resurse, tokove rada, operativne jedinice i hijerarhiju postrojenja, što omogućava precizno i efikasno upravljanje proizvodnim procesima.



Slika 2. Izgled CDS platforme – arhitektura podataka

Dakle, CDS platforma je dizajnirana da podrži implementaciju MES sistema u bilo kom proizvodnom okruženju, pružajući fleksibilan i skalabilan okvir za prikupljanje, obradu i analizu podataka. Njena arhitektura omogućava integraciju sa postojećim sistemima i uređajima, pružajući sveobuhvatno rješenje za upravljanje proizvodnjom i optimizaciju procesa.

3. OPIS MES SISTEMA U MLJEKARI NIKA - NIKŠIĆ

Kao prvi ovakav sistem implementiran u Crnoj Gori, MES sistem u mljekari Nika je kompleksan i sveobuhvatan, pa tako omogućava integraciju sa postojećim i novim uređajima u fabrici. Sistem prikuplja podatke sa pet postojećih PLC-ova različitih proizvođača i četiri nova Siemens S7-1500 PLC-a, omogućavajući praćenje i kontrolu svih aspekata proizvodnje.

3.1. Opis procesa proizvodnje u Mljekari Nika

Mljekara Nika sastoji se od jedinstvene proizvodne jedinice koja se može podijeliti u tri oblasti proizvodnje:

1. Energetika: priprema energenata u mljekari odnosi se prevashodno na pripremu hladne vode (optimalna temperatura 4°C, maksimalna 6°C), priprema tople vode (optimalna 98 °C), priprema komprimovanog amonijaka za rashladu i komprimovanog vazduha za pneumatske pogone u fabrici.
2. Proizvodnja: odnosi se na dio pasterizacije i obrade mlijeka (separacija masti, homogenizacija mlijeka, priprema jogurta, kisjelog mlijeka, pavlake, sira i kajmaka). Sirovo mlijeko se doprema u dva prijemna tanka zapremine 10m³, dok se pasterizovano mlijeko čuva u pet čistijerni zapremine 5m³. Pavlaka, jogurt, kisjelo mlijeko kao i mlijeko za sir i kajmak čuvaju se u posebnim sudovima koji se nazivaju duplikatori. Mljekara trenutno koristi jedanaest duplikatora.
3. Pakovanje: pakovanje gotovih proizvoda obavlja se pomoću pet linija i to: linija punjenja jogurta - flaše, linija punjenja jogurta – čašice, linija punjenja pavlake, linija punjenja pasterizovanog mlijeka – kese i linija pakovanja kajmaka i sira.

Kao poseban dio mljekare, može se izdvojiti sirara. U sirari postoji poseban paster, jedna cisti-jerna i tri duplikatora. Međutim, trenutno proces pasterizacije se obavlja na zajedničkom pasteru, kao jedna od mjera uštede. Kako je u narednom periodu planirana aktivacija malog pastera u sirari, MES sistem je obuhvatio i ovaj dio mljekare kao posebnu stavku jedinstvenog sistema.

3.2. Tehnički detalji projekta

Prije implementacije softverskog dijela MES sistema, potrebno je prevashodno pripremiti fabriku, što uključuje: distribuciju signala, povezivanje senzora i integraciju sa opremom.

Distribucija energije: osigurači, prenaponske zaštite i napajanja PLC-ova, čime se obezbjeđuje stabilan i siguran rad sistema, sa odgovarajućom zaštitom od prenapona i preopterećenja.

Prikupljanje signala: Digitalni i analogni ulazi se koriste za prikupljanje signala sa senzora i uređaja. Na primjer, digitalni ulazi bilježe stanja kao što su "kompresor u radu" ili "pasterizator alarm," dok analogni ulazi obrađuju signale sa termo-elementa, senzora pritiska, nivoa i protoka. Konkretno, ugrađeno je: dvadeset i dva temperaturna senzora, šesnaest senzora za kontinualno praćenje nivoa, dva senzora pritiska i dva mjerača protoka

Integracija sa PLC-ovima: PLC-ovi su ključni dio sistema, obavljaju funkcije prikupljanja podataka, izvršavanja kontrolne logike i komunikacije sa MES serverom. Na primjer, PLC može kontrolisati temperaturu pasterizacije tako što prima podatke sa senzora temperature i prilagođava rad grijača kako bi održavao željeni nivo temperature na pasteru.

Tako je projektom obuhvaćena ugradnja četiri elektro ormara sa pratećom komandno zaštitnom opremom kao i PLC-ovima za prikupljanje i obradu podataka.

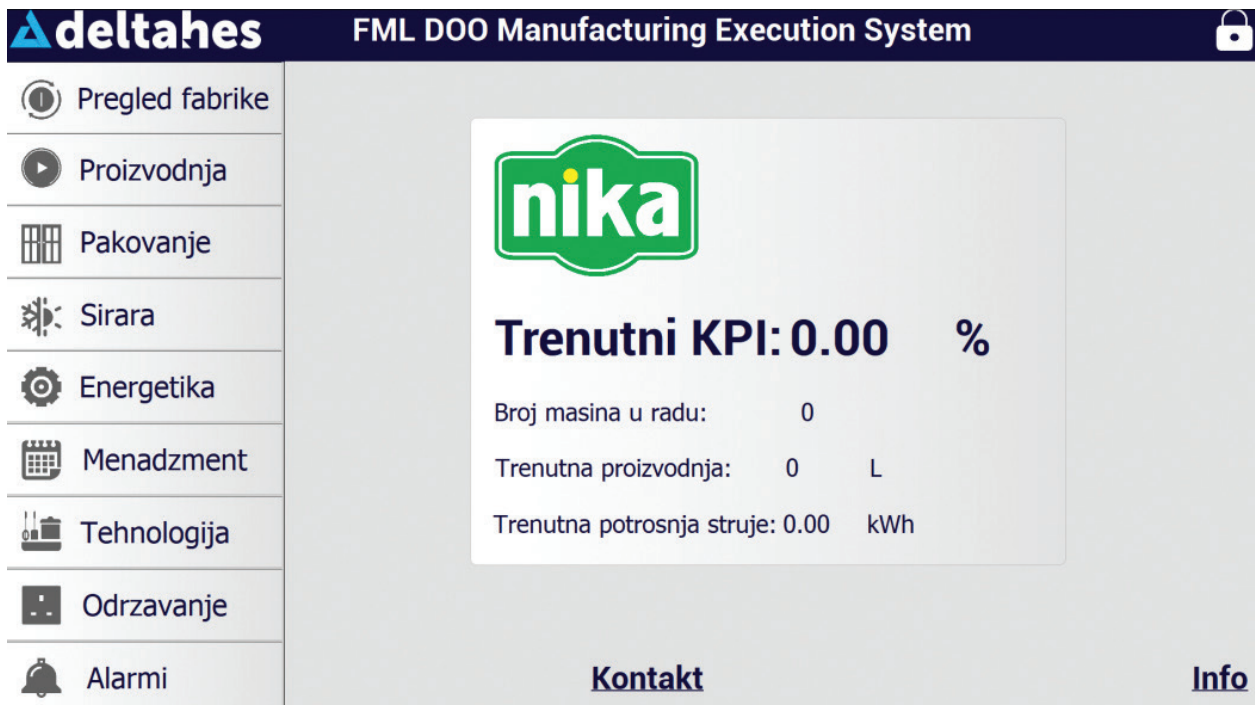
3.3. Arhitektura sistema i integracija

Digitalni i analogni signali: Sistem prikuplja raznovrsne podatke, uključujući digitalne signale kao što su stanja motora, pumpi, kompresora i ventila, kao i analogne signale kao što su temperatura, nivo i protok mlijeka. Ovi podaci se koriste za praćenje i kontrolu ključnih parametara proizvodnog procesa.

Konkretno, MES sistem prikuplja podatke i prati:

- Četrdeset i pet motornih pogona (temperatura, alarm, rad);
- Svih linija pakovanja (status, alarm, nivo balansnog suda, takt i broj zapakovanih proizvoda);
- Temperature i količine mlijeka u svim cistijernama, duplikatorima i prijemnim tankovima;
- Protok ulaznog mlijeka;
- Protok pasterizovanog mlijeka;
- Protok obrađenog mlijeka;
- Pritisak zraka;
- Nivo i temperaturu hladne vode;
- Temperaturu tople vode;
- Temperature pasterizacije;
- Temperature hemikalija CIP sistema;
- Količine hemijskih rastvora u CIP sistemu.

Centralizacija podataka: Svi podaci se prikupljaju i skladište na centralnom CDS serveru, gdje se analiziraju i obrađuju. Na serveru su kreirane baze za skladištenje istorijskih podataka, kao i aplikacije za nadzor i kontrolu procesa. Sistem takođe omogućava povezivanje sa drugim poslovnim sistemima, kao što su ERP i SCADA, omogućavajući jedinstven pristup svim relevantnim informacijama.



Slika 3. Izgled početnog ekrana MES sistema

Kao što se može vidjeti na prethodnoj slici, početna strana MES sistema daje korisniku osnovni pregled pojedinih parametara proizvodnje, dok se u lijevom dijelu aplikacije nalazi komandno stablo MES sistema.

MES sistemom je takođe obuhvaćena i kontrola pristupa aplikativnom dijelu softvera, što znači da nakon logovanja korisnika, samo će algoritmom predefinisane funkcionalnosti sistema biti dostupne pojedinim korisnicima. Tako na primjer, dijelu tehnologija mogu samo pristupiti radnici sa korisničkim imenom i šifrom tehnologa.

3.4. Prikupljanje i obrada podataka

Stanja opreme: MES prati radna stanja opreme kao što su motori, pumpe i ventili. Bilježe se podaci o radnom vremenu, broju pokretanja i kvarovima, što omogućava prediktivno održavanje i smanjenje zastoja. Pored stanja opreme, sistem prikuplja i kontinuirane podatke o ključnim parametrima proizvodnje, kao što su temperature pasterizacije, nivo mlijeka u tankovima, protok na ključnim mjestima i potrošnja hemikalija u *Clean in Place* (CIP) sistemu. Ovi podaci se analiziraju u realnom vremenu, omogućavajući optimizaciju procesa i smanjenje otpada.

Efikasnost proizvodnje: Kroz prikupljanje podataka o proizvodnji, MES omogućava praćenje efikasnosti i produktivnosti. Ovo uključuje mjerenje ukupne efikasnosti opreme i ključnih indikatora performansi.

Formula za OEE [3] koja je korišćena prilikom izrade MES sistema je:

$$OEE = (Availability * Performance * Quality) * 100$$

Gde je:

Availability je odnos stvarnog operativnog vremena prema planiranom vremenu proizvodnje:

$$Availability = \frac{Planirano\ vrijeme\ proizvodnje - Vrijeme\ zastoja}{Planirano\ vrijeme\ proizvodnje}$$

Performance Mjeri koliko efikasno oprema radi kada je dostupna, u poređenju sa maksimalnom

moogućom brzinom:

$$Performance = \frac{Idealno\ vrijeme\ ciklusa * Ukupni\ izlaz\ proizvoda}{Maksimalni\ izlaz\ (kapacitet\ fabrike)}$$

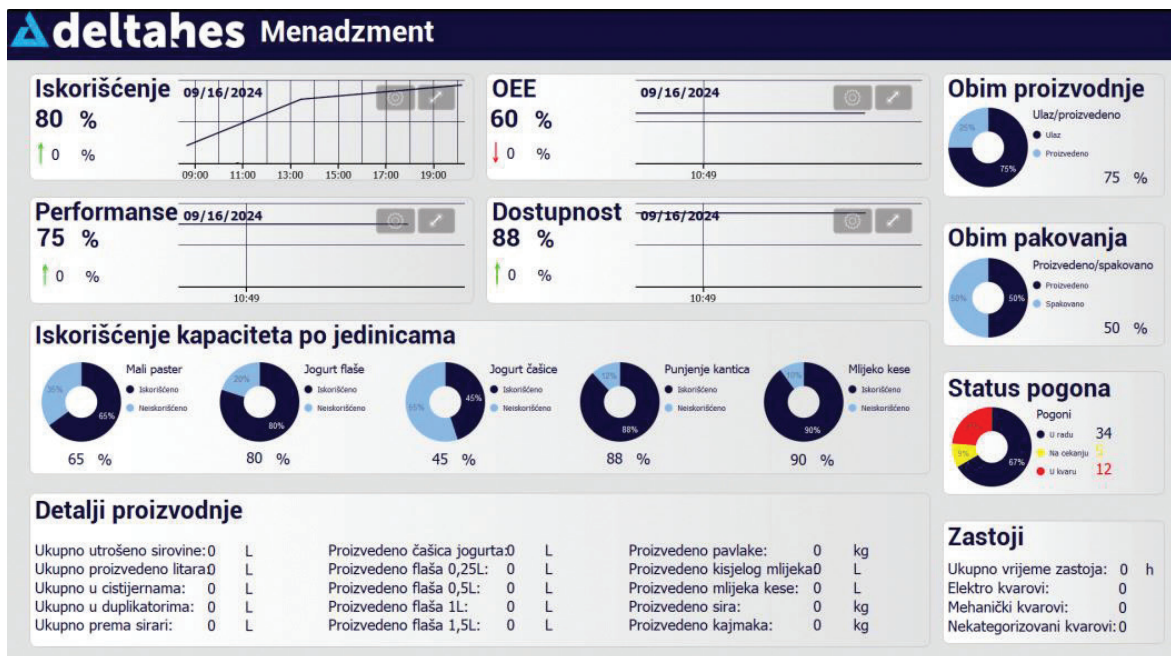
Quality je odnos dobrih proizvedenih jedinica prema ukupnim proizvedenim jedinicama:

$$Quality = \frac{Broj\ dobro\ proizvedenih\ jedinice}{Broj\ ukupno\ proizvedenih\ jedinica}$$

Sa druge strane formula korišćena za izračunavanje KPI [4] je:

$$KPI = \frac{Količina\ obrađenog\ mlijeka - Količina\ otpada}{Količina\ mlijeka\ na\ prijemu} * 100$$

Sve količine mlijeka mjere se u litrima, dok se sam KPI izražava u procentima. Takođe, KPI je moguće mjeriti u svakom trenutku (u realnom vremenu), međutim, precizniji podatak o ključnim indikatorima performansi dobija se ukoliko se prati njegovo izračunavanje po završetku proizvodnog dana. Dodatno, KPI je moguće proračunati na nedjeljnom, mjesečnom i godišnjem nivou.



Slika 4. Izgled ekrana za praćenje informacija o proizvodnji

Kao što se sa prethodne slike može vidjeti, pored ključnih parametara proizvodnje, MES sistem prati i ostale parametre kao što su:

- Dostupnost: odnosno Availability parametar u računanju OEE.
- Performanse: odnosno Performance parametar u računanju OEE.
- Iskorišćenje: iskorišćenje kapaciteta fabrike, koje je dato kao odnos trenutnog iskorišćenja pogona prema maksimalnom kapacitetu.
- Obim proizvodnje: dat kao odnos ukupne količine sirovine na ulazu prema ukupnoj količini proizvedenog mlijeka.
- Obim pakovanja: dat kao odnos ukupne količine proizvedenog mlijeka prema količini dobrih jedinica na pakovanju
- Status pogona: pregled trenutnog stanja pogona: U radu, Na čekanju i U kvaru.

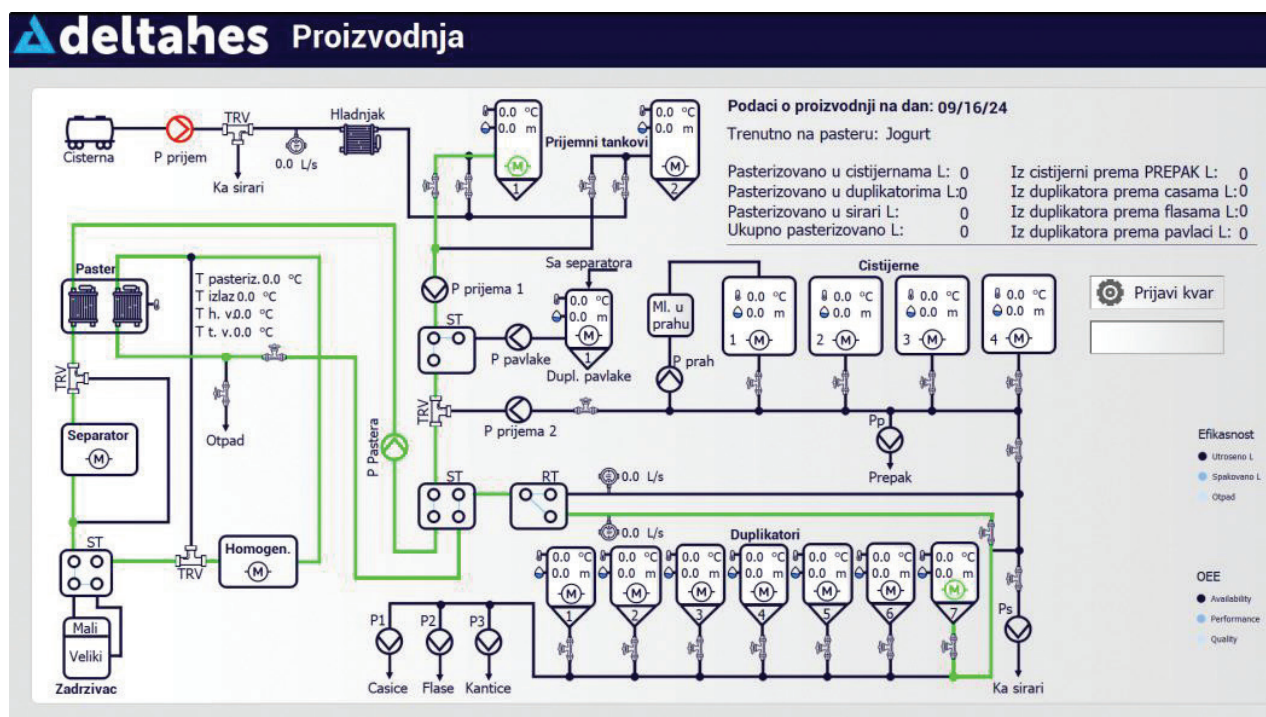
Na kraju MES sistem vodi evidenciju o proizvedenim količinama, te tako imamo praćenje ukupne proizvodnje u litrima, ali i praćenje proizvodnje na pojedinim pogonima i mašinama.

4. SCADA SISTEM I KONTROLA PROCESA

Integracija sa SCADA sistemom omogućava operatorima i menadžmentu da prate proizvodni proces u realnom vremenu. Vizuelni interfejsi pružaju detaljan prikaz svakog dijela proizvodnog procesa, omogućavajući operaterima da brzo identifikuju i riješe potencijalne probleme.

SCADA omogućava praćenje ključnih parametara kao što su temperature, protoci, stanja ventila i motora. Operateri mogu da podešavaju parametre procesa direktno sa interfejsa, kao što je promjena brzine protoka ili temperature pasterizacije. Takođe, sistem je programiran da automatski detektuje i signalizira odstupanja od normalnih operativnih uslova. Na primjer, ako temperatura u pasterizatoru padne ispod bezbjednog nivoa, sistem generiše alarm i šalje obavještenje operaterima.

Dodatno, SCADA omogućava operaterima zadavanje izvršnih komandi sa bilo kog pametnog uređaja. Ovo je naročito korisno prilikom upravljanja proizvodnjom, (paster, homogenizator, separator i sl.) gdje su do sada operateri morali da idu od jednog do drugog dijela pogona kako bi aktivirali neophodne djelove sistema u cilju obrade i pripreme mlijeka. Sada je operaterima omogućeno da čitavom proizvodnjom upravljaju sa jednog mjesta, što značajno doprinosi efikasnosti i brzini izvršenja radnih naloga.



Slika 5. Izgled ekrana SCADA modula

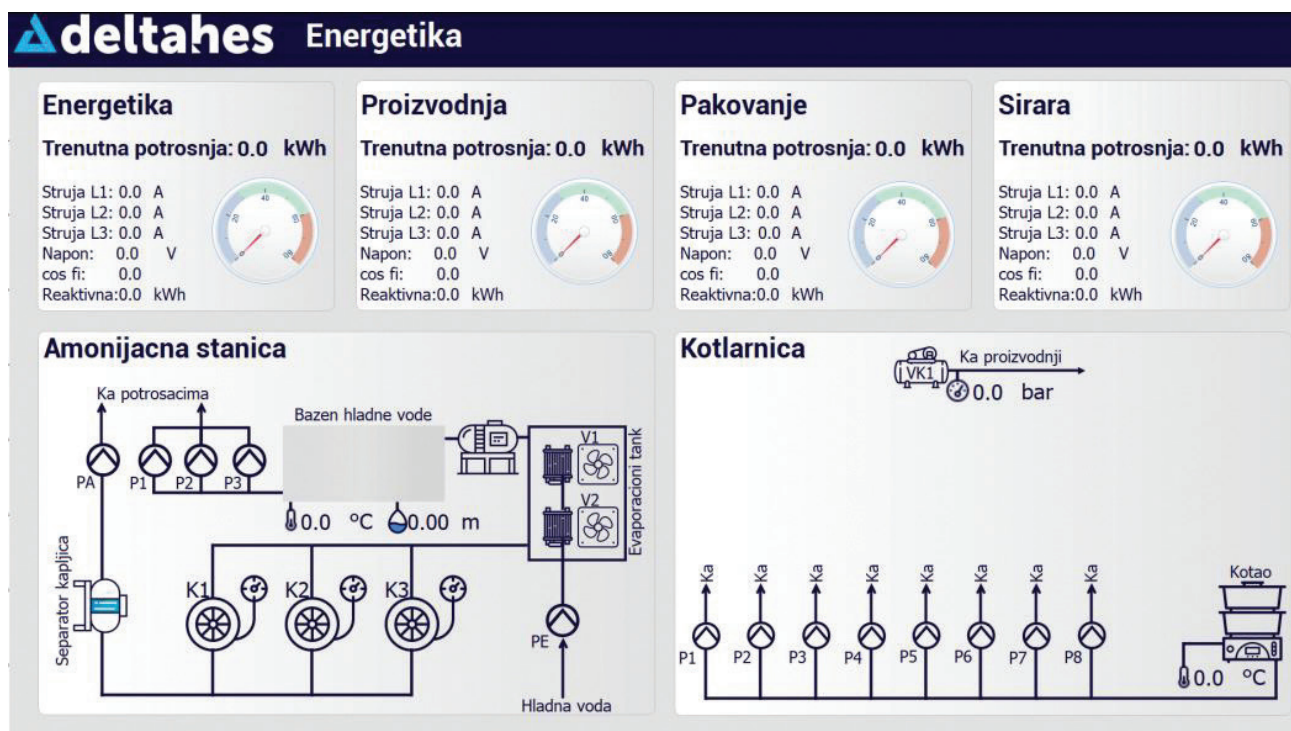
4.1. Energetski menadžment i optimizacija

MES sistem mjeri potrošnju energije u realnom vremenu na različitim mjestima u fabrici, uključujući jedinice za hlađenje, opremu u proizvodnji i linije za pakovanje. Ovi podaci se koriste za optimizaciju energetske efikasnosti i smanjenje troškova. Sistem takođe generiše izvještaje o potrošnji energije, omogućavajući menadžmentu da identifikuje oblasti sa visokim energetske gubicima i preduzme korake za optimizaciju. Na primjer, analiza može otkriti da određena mašina troši više energije od očekivanog, što može ukazivati na potrebu za održavanjem ili zamjenom opreme.

Kao što se do sada može vidjeti, MES značajno doprinosi energetskej efikasnosti optimizacijom različitih aspekata proizvodnih procesa. Putem praćenja u realnom vremenu, analize podataka

i kontrole opreme, MES identifikuje prilike za minimiziranje rasipanja energije. Prati potrošnju energije duž proizvodne linije, locira neefikasne prakse i predlaže poboljšanja. Na primjer, MES može da preporuči podešavanja na mašinama, optimizuje raspored proizvodnje kako bi se uskladio sa potražnjom energije ili čak predloži pauze tokom perioda niske potrošnje energije. Sinhronizacijom proizvodnje sa raspoloživošću energije, MES smanjuje vrijeme mirovanja, optimizuje operacije i promovise strategije štednje energije.

Sveukupno, MES omogućava kontinuirano poboljšanje praksi upravljanja energijom, smanjujući troškove i ublažavajući ekološki uticaj. Njegova integracija u proizvodne procese podstiče kulturu efikasnosti i održivosti, usklađujući se sa širim ekološkim ciljevima dok se optimizuje iskorišćenost resursa u proizvodnim postrojenjima.



Slika 6. Izgled ekrana za praćenje statusa energenata

4.2. Održavanje i praćenje opreme

Kroz praćenje operativnih parametara kao što su radni sati, broj pokretanja i temperature motora, MES omogućava prediktivno održavanje. Sistem generiše radne naloge za održavanje na osnovu stvarnog stanja opreme, čime se smanjuje rizik od neočekivanih kvarova i zastoja. MES takođe pruža vizualni prikaz stanja opreme kroz Gantt dijagrame, omogućavajući jednostavno planiranje i praćenje aktivnosti održavanja. Dakle, menadžeri održavanja mogu vidjeti kada je određena oprema posljednji put servisirana i za kada je planiran sljedeći pregled.

4.3. Kontrola procesa i kvaliteta

Kontrola procesa i kvaliteta obuhvata nekoliko ključnih parametara koje su implementirane u MES sistemu:

- Integracija sa CIP sistemom: MES prati i kontroliše proces CIP-a, uključujući mjerenje koncentracija hemikalija i temperatura. Ovo osigurava da su sve površine koje dolaze u kontakt sa mlijekom pravilno očišćene i da ispunjavaju standarde higijene.
- Automatsko kreiranje radnih naloga: Sistem automatski generiše radne naloge na osnovu podataka prikupljenih sa mašina. Na primjer, kada je proizvodna serija završena, sistem

kreira radni nalog za CIP ciklus, uključujući sve potrebne korake i mjerenja.

- Manualno kreiranje radnih naloga: Radni nalozi koji se odnose na planiranu proizvodnju kreiraju se ručno, to jest dežurni tehnolog upisuje očekivane količine na prijemu, a potom planiranu proizvodnju za svaku od jedinica ponaosob, u litrima. Ključna prednost MES sistema leži u činjenici da se radni nalozi za proizvodnju popunjavaju automatski, to jest direktno putem digitalnih informacija koje prosljeđuju mašine i pogoni.
- Nadzorni *dashboard*: MES nudi prilagodljive nadzorne *dashboard*-e koje prikazuju ključne informacije o proizvodnji. Korisnici mogu brzo i jednostavno pregledati podatke o OEE, KPI, potrošnji energije i statusima opreme.
- Izvještavanje i analiza: Sistem generiše detaljne izvještaje o performansama proizvodnje, uključujući analize trenda i poređenje sa prethodnim periodima. Na primjer, menadžment može pregledati mjesečni izveštaj o potrošnji mlijeka i identifikovati uzroke varijacija u produktivnosti.

The screenshot displays the DeltaHes Tehnologija control interface. It is divided into several sections:

- Radni nalog** (Production Order): Shows a table of planned quantities for various products like yogurt, milk, and cheese. The date is 16/09/24 PON 10:51:44.
- Tehnološki parametri** (Technological Parameters): Includes a search bar and a dropdown menu with 'NewItem'.
- CIP i paster** (CIP and Pasteurization): Shows the current CIP status, the current step (5. Linija od duplikatora prema sirari), and various temperature settings (pasteurization, outlet, cold water, hot water).
- Istorija CIP-ovanja** (CIP History): A table showing CIP cycles with columns for Br., Vr., Datum, and Temperatur.
- Istorija temperatura pasterizacije** (Pasteurization Temperature History): A table showing pasteurization temperature cycles with columns for Br., Vr., Datum, and Temperatur.

Slika 7. Izgled ekrana kontrole kvaliteta i tehnoloških parametara

5. ZAKLJUČAK

5.1. Finansijska opravdanost projekta

Kako je sistem nedavno pušten u rad, ne postoje precizne informacije o uštedama, međutim mogu se dati pojedine opšte prognoze.

Sa aspekta dugoročne finansijske opravdanosti, predviđa se da će povrat investicije (ROI) biti značajan. Ulaganje u MES sistem je u početku veliko zbog nabavke opreme, softvera i implementacije, ali se očekuje da će uštede kroz optimizaciju proizvodnih procesa, smanjenje otpada i troškova održavanja, kao i povećanje produktivnosti, omogućiti povraćaj investicije u roku od dvije do tri godine. Konkretno, ROI za mljekaru Nika bi trebao biti relativno kratak (do godinu dana), uzimajući u obzir činjenicu da je mljekara obezbijedila povraćaj sredstava od osamdeset posto za implementaciju MES sistema.

Finansijska opravdanost takođe leži u povećanju kapaciteta za donošenje odluka zasnovanih

na podacima. Uz naprednu analitiku, menadžment može precizno planirati proizvodne cikluse i efikasnije upravljati resursima, što dovodi do daljih ušteda i povećanja profitabilnosti. Na osnovu predviđanja za naredne godine, implementacija MES sistema omogućava mljekari Nika da ostvari stabilan rast, istovremeno zadržavajući konkurentsku prednost na tržištu mliječnih proizvoda.

Na kraju, investicija u ovakav sistem se ne može posmatrati samo kroz prizmu trenutnih troškova, već kroz dugoročnu perspektivu. MES sistem osigurava održivost poslovanja, omogućava brži odziv na tržišne promjene i pruža alatke za kontinualno unapređenje proizvodnje, što dugoročno vodi ka većim prihodima i smanjenju troškova.

5.2. Opšti zaključci

Implementacija MES sistema u mljekari Nika donijela je značajna unapređenja u proizvodnji. Sistem omogućava sveobuhvatno praćenje i kontrolu procesa, od prijema sirovog mlijeka do finalnog pakovanja. Korišćenjem CDS platforme, MES integriše podatke sa različitih senzora i uređaja, omogućavajući optimizaciju procesa, smanjenje otpada i povećanje efikasnosti.

Pored toga, sistem pruža alatke za praćenje i analizu KPI i OEE. Ovo omogućava menadžmentu da identifikuje oblasti za poboljšanje i donese informisane odluke koje vode ka kontinuiranom unapređenju proizvodnog procesa.

Uz ovakve alate, mljekara Nika sada ima mogućnost da odgovori na zahtjeve tržišta za visokokvalitetnim mliječnim proizvodima, istovremeno smanjujući troškove i povećavajući održivost proizvodnje.

LITERATURA

1. Jahangiri, M, & Hajimohammadi, S. (2018). Manufacturing Execution Systems (MES) Implementation in Industrial Environment
2. Roser, C, Nakano, M, & Tanaka, M. (2002). Comparison of Bottleneck Detection Methods for AGV Systems. Winter Simulation Conference, 1, 1192-1196Hive MQ, „MQTT Sparkplug Essentials“, 2020
3. Nakajima, Seiichi (1988) - *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*
4. ISO 22400-2:2014 - Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management
5. Kletti, J. (2007). *Manufacturing Execution System - MES: Optimal Design, Planning, and Deployment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
6. Bauer, J. E., & Ford, K. A. (2015). *KPI Mega Library: 36,000 Key Performance Indicators*. KPI Library
7. Van der Aalst, W. M. P. (2011). *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

VIŠEKANALNO OČITAVANJE SENZORSKIH 0-20 mA I ± 10 V SIGNALA ZASNOVANO NA AD4111 ČIPU I ESP8266 MIKROKONTROLERU

Nebojša Škerović

Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet Crne Gore

Amar Kapić

Fakultet za informacione
tehnologije,
Univerzitet Mediteran

Milovan Radulović

Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet Crne Gore

KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu je predstavljeno rješenje koje obuhvata razvoj višekanalnog sistema za akviziciju podataka, razvijenog oko ESP8266 mikrokontrolera i AD4111 analogno-digitalnog konvertora.

Sistem ima mogućnost očitavanja analognih strujnih i naponskih ulaznih signala u opsegu 0-20 mA i ± 10 V, što pruža široku industrijsku i komercijalnu primjenu. Svrha ovog dizajna je da se izbori sa značajnim izazovom u dizajniranju sistema za akviziciju podataka sa senzora, a koji se odnosi na fleksibilnost po pitanju tipova senzora. Relevantnost rada se ogleda u broju raspoloživih ulaza, sa do osam naponskih i četiri strujna ulaza, kao i u mogućnosti očitavanja širokog spektra tipova senzora.

Proces razvoja predloženog sistema uključivao je dizajn štampane ploče (PCB – Printed Circuit Board) i fabrikaciju iste. Nakon izrade štampane ploče, odrađeno je testiranje i verifikacija kojom su potvrđeni očekivani rezultati i performanse razvijenog sistema. Testiranje i evaluacija performansi predloženog rješenja su obavljena pri različitim brzinama odabiranja, od 1.25 do 31250 uzoraka po sekundi. Prilikom testiranja su korišćeni i interni i eksterni referentni napon, pri čemu je utvrđeno da sistem odlikuje veći stepen tačnosti ukoliko se koristi eksterni referentni napon.

Pokazano je da sistem posjeduje poboljšane performanse i fleksibilnost u odnosu na postojeća rješenja, što ga čini pogodnim kako za kontinuiranu primjenu tako i za brza testiranja.

Ključne riječi: AD4111 čip, A/D konvertor, Efektivni broj bitova, ESP8266 mikrokontroler, PCB, Senzor, Šum

1. UVOD

Potreba za većim brojem senzora eksponencijalno raste sa porastom stepena automatizacije, samim tim su i zahtjevi za adekvatnim očitavanjem što većeg broja senzora sve više izraženi [1]. Slijedi da je neophodno razvijati sisteme koji omogućavaju ekonomski isplativo i efikasno očitavanje mjerenja koja se ostvaruju posredstvom velikog broja senzora, uz nisku potrošnju energije.

Ovi sistemi nalaze primjenu u raznim domenima, od elektrotehnike [2,3], preko procjene kvaliteta vode [4], procjene performansi fotonaponskih sistema [5-7], agrikulture [8-10], medicine [11] do obnovljivih izvora energije [12]. Performanse ovako razvijenih sistema se mogu uporediti na osnovu preciznosti očitanih mjerenja, brzini odabiranja, broju ulaznih kanala, kao i fleksibilnosti sistema da očita različite vrste ulaznih signala.

U [13] je implementiran ekonomski isplativ sistem za kontrolu temperature vode koristeći Arduino razvojnu ploču. Razvijeni sistem posjeduje svega dva analogna ulaza, dok analogno-digitalni (A/D) konvertor raspolaže sa 10-bitnom rezolucijom. Na analognim ulazima su priključeni otpornički senzori temperature, čiji su naponski opsezi 0-3.5 V i 0-2.88 V, respektivno, za temperature u opsegu od 20 do 60°C.

U [14] je dato višekanalno rješenje sa tri ulazna kanala. Prvi kanal ima brzinu odabiranja od 8 hiljada uzoraka po sekundi (eng. samples per second; u daljem tekstu: SPS), raspolaže sa 8-bitnom rezolucijom i koristi se za praćenje temperature. Drugi kanal ima istu brzinu odabiranja i rezoluciju, i njegova primjena je za senzore pritiska, dok se treći kanal koristi za analizu signala u frekvencijskom domenu računanjem brze Furijeove transformacije (FFT). Treći kanal je namijenjen visoko-frekvencijskim signalima poput signala koji potiču od senzora za mjerenje nivoa vibracije. Ovaj sistem za mikroprocesor koristi SmartFusion sistem na čipu sa ugrađenim A/D konvertorom, memorijom, UART komunikacionim protokolom, multiplekserom. Sistem je odlikovan niskom potrošnjom, ekonomskom isplativošću, jednostavnošću i kompaktnim dizajnom.

Autori u [15] su predstavili rješenje koje posjeduje četiri ulazna kanala i 16-bitni AD konvertor. Sistem je testiran uz pomoć senzora koji se koriste u medicinske svrhe: senzor temperature, ručni dinamometar, senzor stiska šake i EKG senzor.

Sistem prezentovan u [16] predstavlja naprednije rješenje sa 5 ulaznih kanala za eksperimentalna aerodinamička istraživanja. Navedena primjena dodatno potvrđuje potrebu različitih inženjerskih oblasti za posjedovanjem adekvatnih sistema za akviziciju podataka. Opisani sistem je razvijen oko Arduino Mega 2560 sa pet ulaznih kanala i 10-bitnom rezolucijom, a sistem je odlikovan niskom potrošnjom, minimalnim odabiranjem od 500 Hz, minimalnim opsegom od 0-6 V i minimalnom preciznošću od 10 mV.

U ovom radu je predstavljeno rješenje koje pruža mogućnost očitavanja do osam naponskih i do četiri strujna signala, uz 24-bitnu rezoluciju A/D konvertora. Pored mogućnosti povezivanja velikog broja senzora, ovo rješenje karakteriše i fleksibilnost po pitanju tipova priključenih senzora. Naime, mogućnost očitavanja ± 10 V i 0-20 mA pokriva veliki broj senzora koji se danas koriste u industriji i u automatici generalno.

Cilj ovog rada je razvoj naprednijeg rješenja od gotovih proizvoda koji se koriste za akviziciju podataka sa senzora po pitanju: maksimalnog broja istovremeno priključenih senzora, kompatibilnosti sa različitim tipovima senzora, mjerenja pri visokoj rezoluciji, jednostavnosti korišćenja, kao i po pitanju ekonomske isplativosti i niskoj potrošnji električne energije.

Rad je organizovan u pet poglavlja. Nakon uvodnog dijela, u poglavlju 2 su date specifikacije izabranog A/D konvertora i mikrokontrolera. U poglavlju 3 je prikazana električna šema i dizajnirana štampana ploča sa korišćenim komponentama, dok su u četvrtom poglavlju analizirane i diskutovane performanse razvijenog sistema. U poglavlju 5 je dat osvrt na cjelokupan rad, uz komentare koji se bave potencijalnim daljim unaprjeđenjima, i budućem naučnom istraživanju.

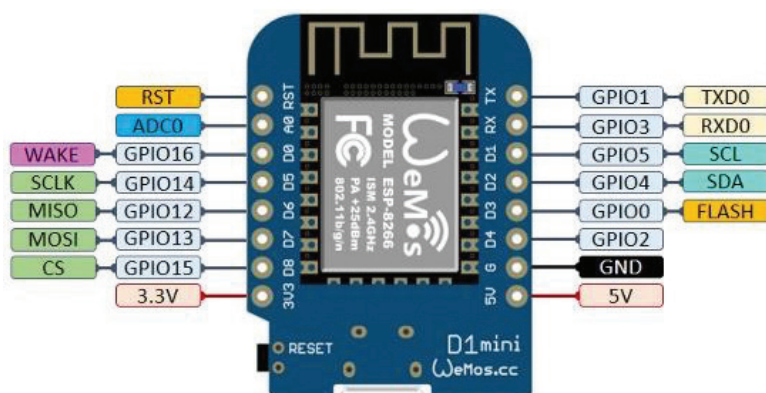
2. TEHNIČKI OPIS KOMPONENTI SISTEMA ZA VIŠEKANALNO OČITAVANJE SENZORA

Predloženi sistem za višekanalno očitavanje analognih senzora je zasnovan na ESP8266 mikrokontroleru i na AD4111 čipu, koji u sebi ima integrisan sigma-delta A/D konvertor i multiplekser koji omogućava višekanalna mjerenja. AD4111 čip i ESP8266 mikrokontroler podržavaju SPI komunikaciju, što ih čini međusobno kompatibilnim.

2.1. Wemos ESP8266 mikrokontroler

Wemos ESP8266 D1 mini mikrokontroler ima 11 digitalnih ulaznih/izlaznih pinova i 1 analogni ulaz na koji je moguće dovesti maksimalni napon od 3.2 V i ima ugrađen WiFi modul, koji mu omogućava bežičnu komunikaciju bez potrebe za dodatnim uređajima. Osim toga podržava I2C i SPI komunikaciju, PWM modulaciju, prekidne pinove (eng. external interrupts), kao i Arduino IDE softversko okruženje za programiranje, a raspolaže sa fleš memorijom od 4 MB [17]. Mikrokontroler se može napajati DC naponom od 3.3 V ili 5 V.

Na slici 2 je dat izgled ovog mikrokontrolera zajedno sa dijagramom konfiguracije pinova, gdje su pinovi rezervisani za SPI komunikaciju označeni zelenom bojom. Dimenzije ovog mikrokontrolera su 3.45 cm x 2.54 cm, što ga čini prikladnim za implementaciju u velikom broju slučajeva. Oscilator na mikrokontroleru se može podešavati u opsegu od 80 MHz do 160 MHz. Zahtjev snage ovog mikrokontrolera iznosi 77.35 mW.



Slika 2. Prikaz Wemos ESP8266 D1 mini mikrokontrolera sa označenim digitalnim i analognim pinovima, kao i pinovima koji se koriste za SPI i I2C komunikacione protokole [17]

2.2. AD4111 čip

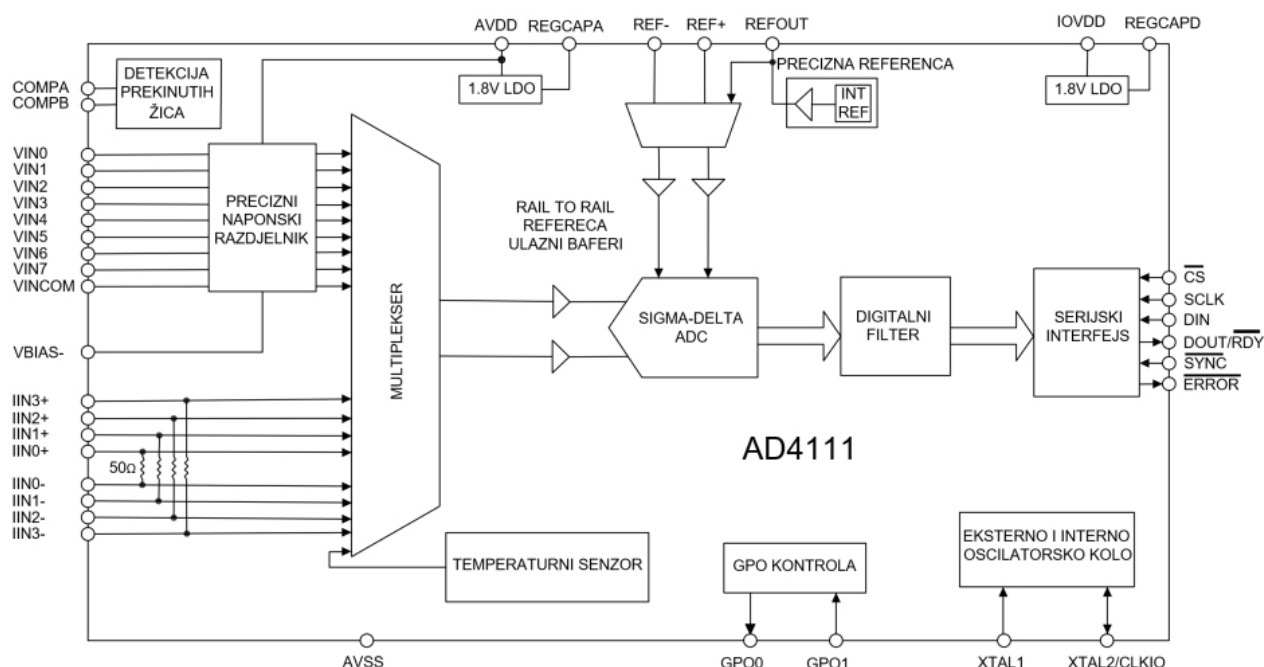
AD4111 čip karakteriše niski šum, niska potrošnja i sadrži integrisani 24-bitni sigma-delta A/D konvertor. Čip ima mogućnost očitavanja naponskih signala u opsegu od -10 V do 10 V, kao i strujnih signala u opsegu od 0 do 20 mA.

Osnovna struktura čipa je data na slici 1. Pored sigma-delta A/D konvertora, čip ima integrisan multiplekser koji omogućava višekanalno očitavanje senzora. Naponske ulaze je moguće prilagoditi za jednostrana mjerenja, gdje se može priključiti do osam različitih senzora ili za diferencijalna mjerenja, u čijem slučaju se mogu priključiti četiri različita senzora. Strujni ulazi su rezervisani za četiri strujna senzora [18].

AD4111 čip sadrži integrisani linearni naponski regulator koji na izlazu daje 2.5 V i koji služi kao referentni napon tokom konvertovanja analognih signala u digitalne. AD4111 je moguće napajati DC naponskim izvorom od 5 V ili 3.3 V, a veličine je 6 mm x 6 mm.

Osim toga, posjeduje i integrisani oscilator od 16 MHz, ulazne bafere koji služe za dodatnu mini-

mizaciju šuma, digitalni filter, ali i sposobnosti kao što su: dovođenje eksternih oscilatornih kola, eksternog referentnog napona i detekcije prekinutih senzorskih žica.



Slika 1. Funkcionalni blok dijagram AD4111 čipa [18]

Komunikacija sa AD4111 čipom se ostvaruje preko SPI (*eng. Serial peripheral interface*) komunikacionog interfejsa, koji zahtjeva četiri komunikaciona kanala: \overline{CS} (*eng. Chip select*), SCLK (*eng. Serial clock*), DIN (*eng. Data input*), DOUT (*eng. Data output*). Direktnim vezivanjem \overline{CS} pin-a na GND (*eng. Ground*) može se ostvariti komunikacija sa preostala tri komunikaciona kanala u slučaju da se komunicira samo sa jednim uređajem preko istih SPI linija.

3. DIZAJN SISTEMA ZA VIŠEKANALNO OČITAVANJE SENZORA

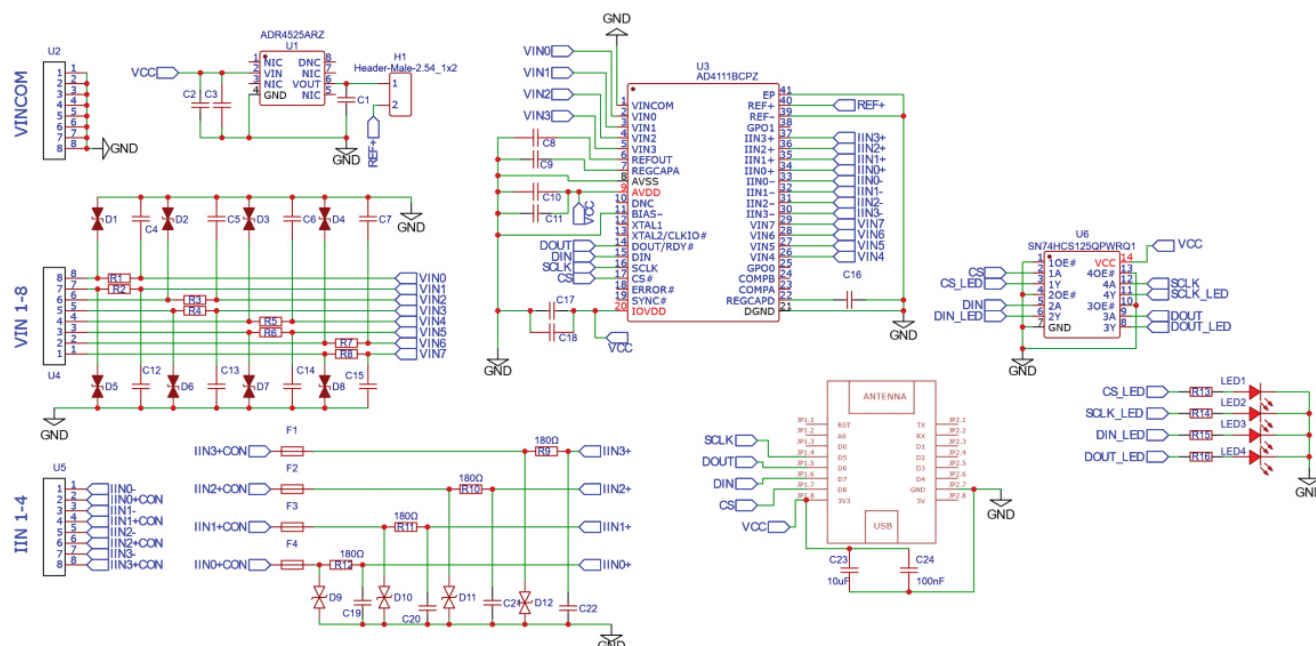
Dizajn PCB-a za višekanalno očitavanje senzora je prikazan na slici 3, dok su u tabeli 1 prikazane korišćene komponente. Wemos ESP8266 D1 mini mikrokontroler ima ulogu da napaja PCB, da komunicira sa AD4111 čipom i da očitane vrijednosti prosljeđuje računaru. Izabran je naponski nivo od 3.3 V iz dva razloga: dovoljan je za sve komponente na ploči i potiče od naponskog regulatora sa mikrokontrolera čime se osigurava stabilan naponski nivo. Radi sigurnosti od mogućeg šuma ili nestabilnosti, taj napon je dekaplovan (*eng. decoupled*) u blizini mikrokontrolera kondenzatorima C23 i C24.

AD4111 čip je povezan sa kondenzatorima C8-C11 i C16-C18 koji služe za dekaplovanje naponskih pinova čipa, čime se osigurava stabilan naponski nivo, sa što manje šuma. S tim u vezi, poželjno je da kondenzatori budu što je bliže moguće čipu, radi što manje induktivnosti i rednog otpora [19].

Naponski ulazni pinovi čipa: VINCOM, VIN0-7 imaju prenaponsku zaštitu realizovanu pomoću bipolarnih TVS dioda (D1-D8), otpornika (R1-R8) i kondenzatora (C4-C7, C12-C15). Izbor TVS dioda je određen prema maksimalnom dozvoljenom naponu na naponskim ulazima čipa koji iznosi ± 10 V. Zaštita strujnih ulaza, (IIN3-)-(IIN3+), je obavljena na isti način, s tim što su dodati i resetabilni strujni osigurači (F1-F4) probojne struje od 50 mA.

Integrirani linearni naponski regulator AD4111 čipa ima preciznost od $\pm 0.12\%$ od nominalnog napona, dok efektivna vrijednost šuma od 0.1 Hz do 10 Hz iznosi $4.5 \mu\text{V}$ [18]. S tim u vezi, u ci-

lju očitavanja preciznijih mjerenja sa A/D konvertora na štampanoj ploči je postavljen i eksterni naponski regulator koji na izlazu daje naponski nivo od 2.5 V, ADR4525ARZ, čija je preciznost $\pm 0.02\%$ od nominalnog napona, dok šum od 0.1 Hz do 10 Hz iznosi $1.25 \mu\text{Vp-p}$ [20].



Slika 3. Šema predložene štampane ploče za višekanalno očitavanje senzorskih signala

Tabela 1: Komponente iskorištene prilikom realizacije predloženog sistema

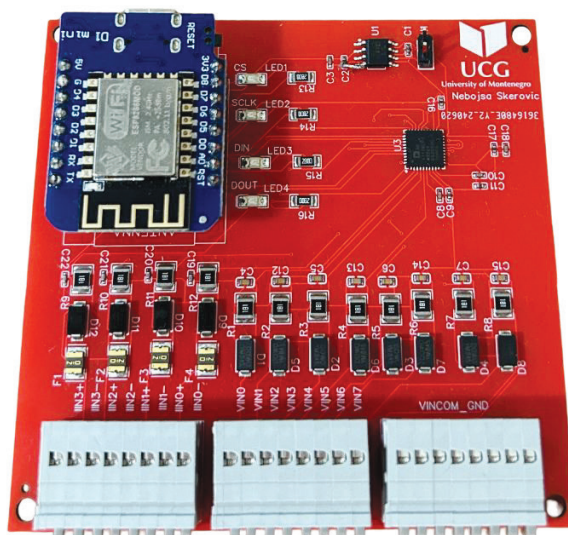
Naziv	Oznaka na šemi	Model/Vrijednost
Mikrokontroler		Wemos ESP8266 D1 mini
Kondenzator	C1, C2, C9, C11, C16, C17	1 μF
	C3, C8, C10, C18, C24	100 nF
	C4, C5, C6, C7, C12,	4.7 nF
	C13, C14, C15	
	C19, C20, C21, C22	470 pF
C23	10 μF	
TVS dioda	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	SMAJ33CA
	D9, D10, D11, D12	SMAJ10CA
Resetabilni strujni osigurač	F1, F2, F3, F4	MF-USMF005-2
LED indikator	LED1, LED2, LED3, LED4	SZYY1206G
Otpornik	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12	180 Ω
	R13, R14, R15, R16	280 Ω
Eksterni naponski regulator	U1	ADR4525ARZ
Konektor	U2, U4, U5	TBL009-254-08GY-2GY
A/D konvertor	U3	AD4111BCPZ
Četvorokanalni bafer sa Šmitovim okidnim kolom	U6	SN74HCS125QPWRQ1

U električnoj šemi je takođe implementiran i četvorokanalni bafer sa Šmitovim okidnim kolom, koji ima ulogu okidača za LED indikatore SPI komunikacionih linija, radi lakšeg testiranja i detekcije aktivnih linija.

Za adekvatno povezivanje analognih senzora odabrana su tri konektora sa po osam ulaza. Dva konektora su za naponske ulaze, što ujedno pokriva mogućnosti jednostranih i diferencijalnih mjerenja, dok je preostali konektor iskorišćen za strujne ulaze.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Dizajniranje PCB-a podrazumijeva adekvatno pozicioniranje svih komponenti na što kompaktniju površinu i njihovo međusobno povezivanje. Dimenzije proizvedene ploče su 8 cm x 8.3 cm i njen izgled je dat na slici 4.



Slika 4. Fotografija proizvedene štampane ploče za višekanalno očitavanje analognih senzorskih signala

Evaluacija performansi predloženog sistema je izvršena na osnovu proračuna promjene efektivne vrijednosti šuma i efektivnog broja bitova (eng. Effective number of bits, u daljem tekstu: ENOB) A/D konvertora pri različitim brzinama odabiranja. Takođe, posmatran je i slučaj korišćenja eksternog referentnog napona i njegov uticaj na naponska i strujna mjerenja.

U ovom testu, ENOB je analiziran dovođenjem konstantnog DC signala. ENOB definiše broj bitova idealnog A/D konvertora koji bi imao isti odnos signala i šuma kao realni A/D konvertor pod istim uslovima i za slučaj DC ulaznog signala dat je sljedećom relacijom [21]:

$$ENOB = N - \log_2\left(\frac{P}{Q}\right) \quad (1)$$

gdje je N rezolucija A/D konvertora, Q je efektivna vrijednost greške kvantizacije idealnog A/D konvertora, a P efektivna vrijednost šuma koja se proračunava kao standardna devijacija mjerenja [22]:

$$P = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} (y_n - y'_n)^2} \quad (2)$$

gdje je M broj uzoraka, y_n je vrijednost n -tog uzorka, dok je y'_n srednja vrijednosti svih uzoraka. Idealna greška kvantizacije se može proračunati po sljedećoj relaciji:

$$Q = \frac{V_s}{2^N} \quad (3)$$

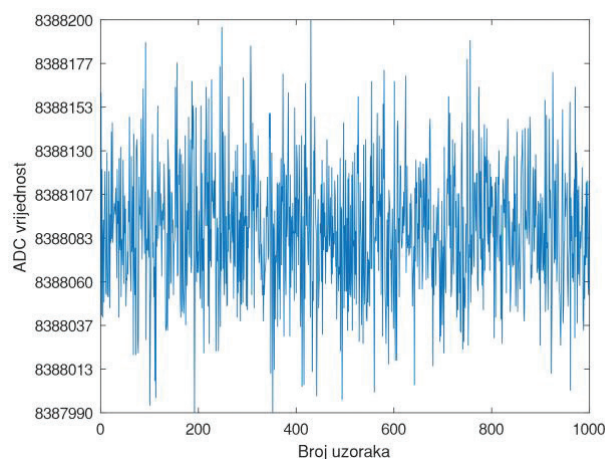
gdje je V_s ulazni naponski opseg A/D konvertora.

Očitavanje mjerenja štampane ploče, njihova vizuelizacija i proračun performansi su realizovani uz pomoć MATLAB softvera preko serijskog interfejsa. Performanse sistema su proračunate za naponske i strujne ulaze, pri 24-bitnoj rezoluciji, internom i eksternom referentnom naponu pri svakoj od dostupnih brzina odabiranja. Svaki proračun performansi je izračunat na osnovu 1000 mjerenja. U zavisnosti od toga da li se sprovode jednokanalna ili višekanalna mjerenja, brzine odabiranja se kreću od 1.25 SPS do 31250 SPS ili od 1.25 SPS do 6211 SPS, respektivno.

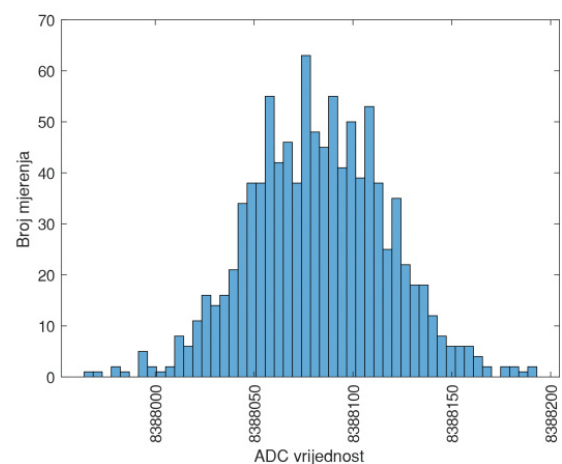
Na slici 5 prikazana su mjerenja na naponskim ulazima, kao i histogrami tih mjerenja pri različitim brzinama odabiranja od 31250 SPS, 15625 SPS i 1.25 SPS. Naponski ulazi su bili kratko-spojeni sa uzemljenjem i podešeni u jednostranoj konfiguraciji, dok se za referentni napon za A/D konvertor koristio interni referentni napon AD4111 čipa. Očitana mjerenja pokazuju da je najveći šum pri najvećoj brzini odabiranja AD4111 čipa. Standardna devijacija prikazanih mjerenja u tom slučaju iznosi 121 μ V, što rezultira u efektivnom broju bitova od 17.4. U slučaju brzina odabiranja 15625 SPS i 1.25 SPS, efektivna rezolucija iznosi 17.6 i 21.7 bitova, respektivno. Dodatno, analizirani su ekstremni slučajevi, odnosno, proračunat je efektivni broj bitova u slučaju najvećeg izmjenjenog šuma (peak-to-peak slučaj) za brzine odabiranja 31250 SPS, 15625 SPS, 1.25 SPS i on iznosi 14.7, 14.9 i 19.4, respektivno.

U tabeli 2 su prikazane izmjerene efektivne vrijednosti šuma i efektivna rezolucija A/D konvertora na naponskom ulazu pri svim brzinama odabiranja koje AD4111 čip podržava. Može se primijetiti da sa smanjenjem brzine odabiranja efektivni broj bitova raste, odnosno, AD4111 čip pruža preciznija mjerenja pri manjim brzinama odabiranja. Izmjereni efektivni broj bitova pokazuje minimalna odstupanja u poređenju sa vrijednostima navedenim od strane proizvođača za brzine odabiranja u rasponu od 200 SPS do 31.250 SPS, pri čemu je maksimalno izmjereno odstupanje zabilježeno pri 2597 SPS i iznosi 1.6%. U opsegu brzina odabiranja od 1.25 SPS do 100.2 SPS, razlika između izmjerenih ENOB vrijednosti i ENOB vrijednosti navedenih od strane proizvođača je izraženija, s odstupanjima koja variraju između 0.47% i 6.06%. Najveće odstupanje je zabilježeno pri brzini odabiranja od 1.25 SPS, gdje izmjereni ENOB iznosi 21.7 bita, dok je vrijednost data od strane proizvođača jednaka 23.1.

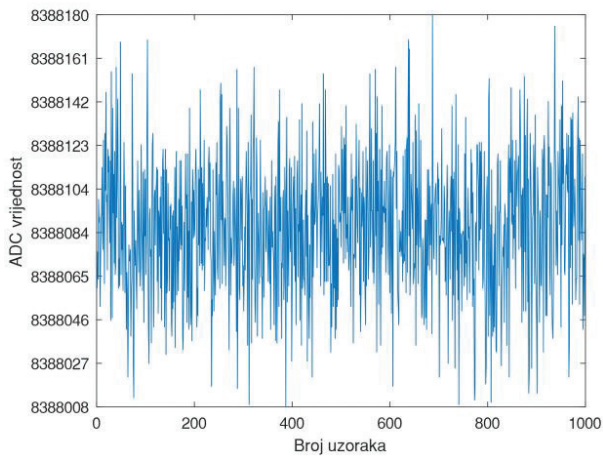
Kada su u pitanju peak-to-peak vrijednosti, izmjereni ENOB takođe ima neznatna odstupanja u opsegu odabiranja između 200 SPS i 31250 SPS u odnosu na vrijednosti date od strane proizvođača. Za manje brzine odabiranja, odstupanje u izmjenenom ENOB je u rasponu od 3.12% do 7.73%, i najveće je pri brzini odabiranja od 2.5 SPS.



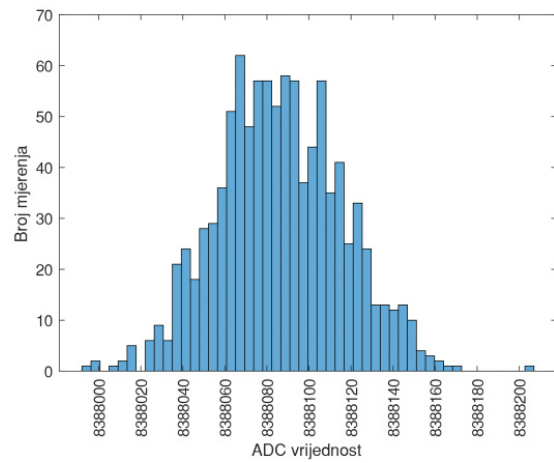
(a)



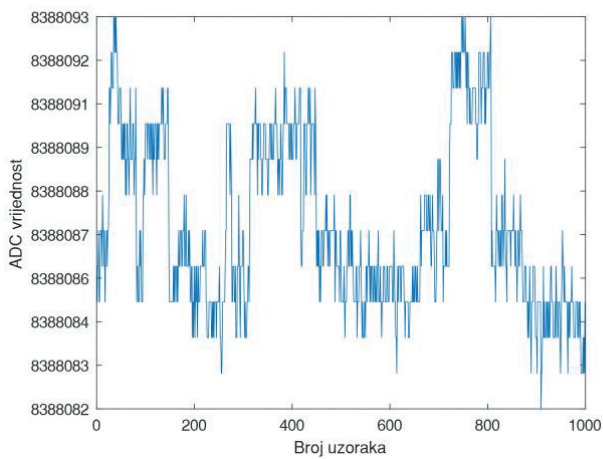
(b)



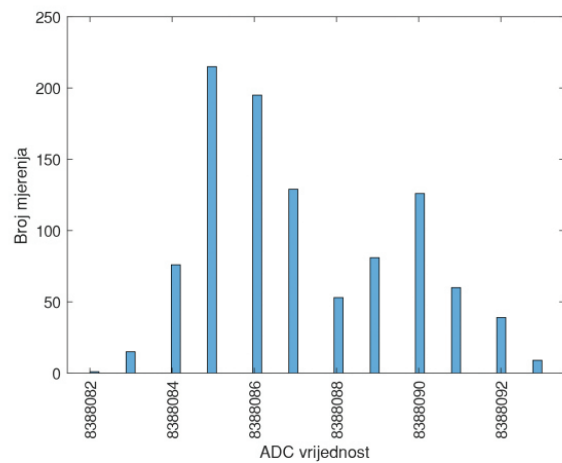
(c)



(d)



(e)



(f)

Slika 5. Izmjereni šum na naponskom ulazu A/D konvertora pri brzinama odabiranja od a) 31250 SPS, c) 15625 SPS, e) 1.25 SPS, kao i odgovarajući histogrami koji prikazuju izmjereni šum pri brzinama odabiranja od b) 31250 SPS, d) 15625 SPS, f) 1.25 SPS. Mjerenja su odrađena u jednostranoj konfiguraciji sa kratko-spojenim ulazima, pri 24 bitnoj rezoluciji i internom referentnom naponu

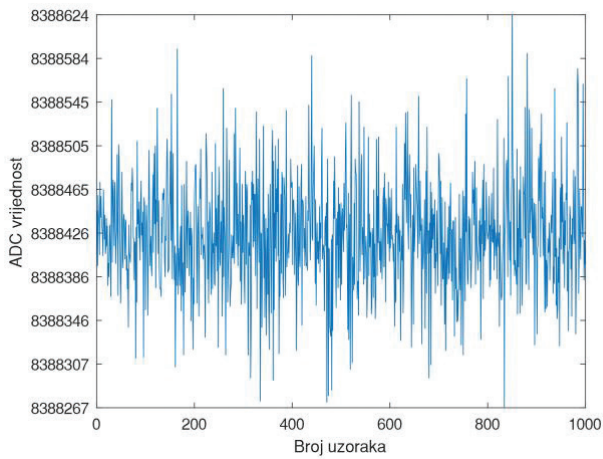
Tabela 2: Mjerenja efektivne vrijednosti šuma i efektivnog broja bita na naponskom ulazu u jednostranoj konfiguraciji, pri 24 bitnoj rezoluciji i internim referentnim naponom

Brzina odabiranja za jednokanalno mjerenje [SPS]	Brzina odabiranja za višekanalno mjerenje [SPS]	P [μV_{rms}]	ENOB [bitova]	P [$\mu\text{V}_{\text{p-p}}$]	ENOB p-p [bitova]
31250	6211	121	17.4	736	14.7
15625	5181	95	17.6	657	14.9
10417	4444	79	17.9	488	15.3
5208	3115	59	18.3	371	15.7
2597	2597	54	18.4	346	15.8
1007	1007	29	19.3	177	16.7
503.8	503.8	20	19.8	146	17
381	381	17	20.1	114	17.4
200.3	200.3	13	20.4	85	17.8
100.2	100.2	10	20.9	63	18.2
59.52	59.52	8	21.2	53	18.5
49.68	49.68	7	21.3	47	18.6
20.01	20.01	7	21.3	44	18.8
16.63	16.63	6	21.6	44	18.8
10	10	6	21.6	44	18.8
5	5	5	21.7	34	19.1
2.5	2.5	5	21.7	34	19.1
1.25	1.25	5	21.7	28	19.4

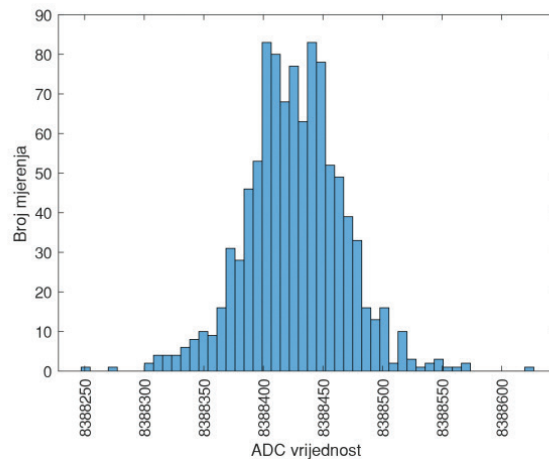
Na slici 6 prikazana su mjerenja na strujnom ulazu, kao i histogrami tih mjerenja pri različitim brzinama odabiranja od 31250 SPS, 15625 SPS i 1.25 SPS. Strujni ulazi su bili kratko-spojeni sa uzemljenjem, a kao referentni napon za A/D konvertor koristio se interni referentni napon AD4111 čipa. Očitana mjerenja pokazuju da je najveći šum prisutan kod brzine odabiranja od 31250 SPS i standardna devijacija pri toj brzini odabiranja iznosi 195 nA, što rezultira u efektivnom broju bitova od 16.6. Pri duplo manjoj brzini odabiranja, odnosno pri 15625 SPS, efektivna rezolucija iznosi 16.7 bitova, dok pri najmanjoj brzini odabiranja, odnosno pri 1.25 SPS, jednaka 22.6 bitova. Takođe, pri analiziranju efektivnog broja bitova u slučaju najvećeg izmjerenog šuma za brzine odabiranja 31250 SPS, 15625 SPS, 1.25 SPS i on iznosi 14, 14 i 20.6, respektivno.

U tabeli 3 su prikazane izmjerene efektivne vrijednosti šuma i efektivna rezolucija A/D konvertora na strujnom ulazu pri svim brzinama odabiranja koje AD4111 čip podržava. Kao kod mjerenja na naponskim ulazima, može se primijetiti da sa smanjenjem brzine odabiranja efektivni broj bitova raste, odnosno, AD4111 čip pruža preciznija mjerenja pri manjim brzinama odabiranja. Međutim, za razliku od naponskih mjerenja, strujna mjerenja su pokazala da je izmjereni ENOB najbliži onome datom od strane proizvođača pri najmanjim brzinama odabiranja. Pri brzinama odabiranja od 1.25 SPS do 59.52 SPS, odstupanje izmjerenog ENOB-a u odnosu na vrijednosti date od strane proizvođača je u opsegu od 0.44% do 1.91%. S druge strane, pri brzinama odabiranja od 100.2 SPS do 31250 SPS, odstupanje se kreće u opsegu od 1.99% do 4.52%, gdje je najveće izmjereno odstupanje ENOB-a zabilježeno pri brzini od 381 SPS i iznosi 19 bita, dok je vrijednost data od strane proizvođača 19.9 bita.

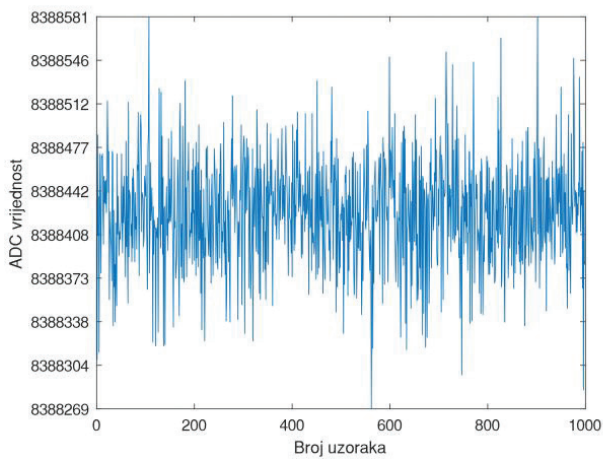
Prilikom upoređivanja peak-to-peak vrijednosti, zaključeno je da izmjereni ENOB odstupa od ENOB-a navedenog od strane proizvođača u rasponu od 1.41% do 7.11%, pri čemu je najmanje odstupanje pri brzini odabiranja od 31250 SPS, dok je najveće odstupanje pri 16.63 SPS.



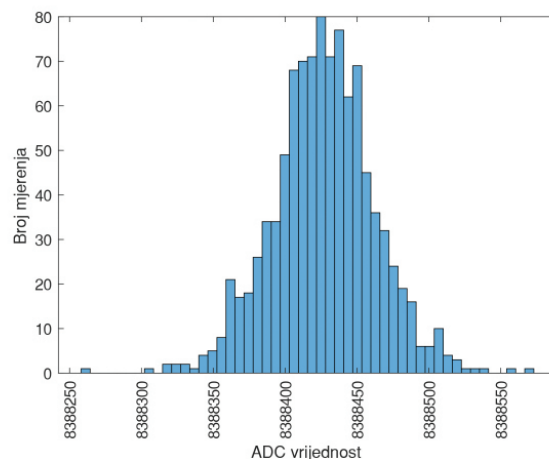
(c)



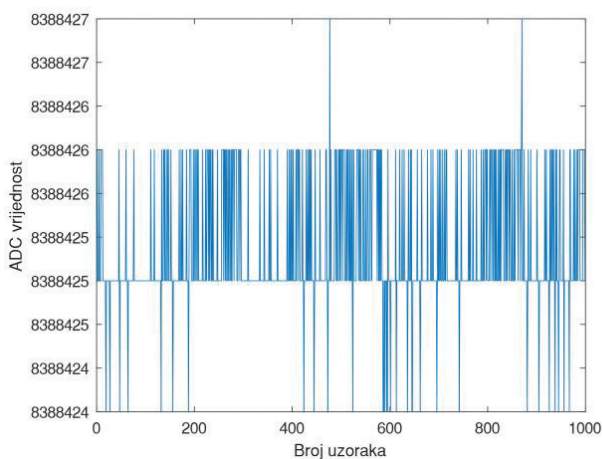
(d)



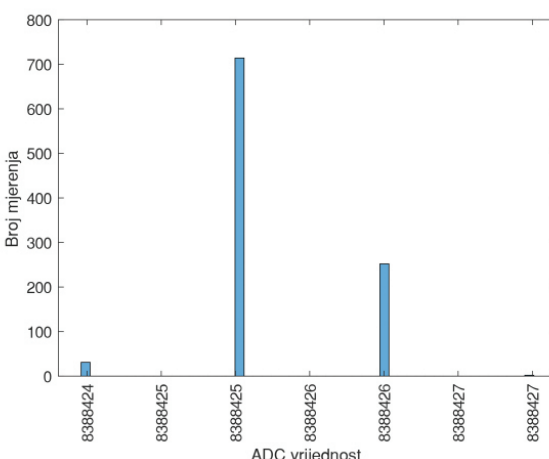
(e)



(f)



(e)



(f)

Slika 6. Šum mjerenja na strujnom ulazu A/D konvertora pri brzinama odabiranja od a) 31250 SPS, c) 15625 SPS, e) 1.25 SPS, kao i odgovarajući histogrami koji prikazuju izmjereni šum pri brzinama odabiranja od b) 31250 SPS, d) 15625 SPS, f) 1.25 SPS. Mjerenja su odrađena sa kratko-spojenim ulazima, pri 24 bitnoj rezoluciji i internom referentnom naponu

Tabela 3: Mjerenja efektivne vrijednosti šuma i efektivnog broja bita na strujnom ulazu, pri 24-bitnoj rezoluciji i internim referentnim naponom

Brzina odabiranja za jednokanalno mjerenje [SPS]	Brzina odabiranja za višekanalno mjerenje [SPS]	P [nA_{rms}]	ENOB [bitova]	P [nA_{p-p}]	ENOB p-p [bitova]
31250	6211	195	16.6	1212	14
15625	5181	180	16.7	1120	14
10417	4444	167	16.9	872	14.2
5208	3115	113	17.5	728	14.6
2597	2597	100	17.6	692	14.6
1007	1007	62	18.3	410	15.4
503.8	503.8	41	18.9	244	16
381	381	37	19	212	16.2
200.3	200.3	23	19.7	166	17
100.2	100.2	16	20.1	118	17.4
59.52	59.52	12	20.5	82	18
49.68	49.68	11	20.8	76	18.1
20.01	20.01	7	21.4	68	18.1
16.63	16.63	6	21.5	61	18.3
10	10	5	21.9	38	19.2
5	5	3	22.6	27	19.7
2.5	2.5	3	22.6	17	20
1.25	1.25	3	22.6	14	20.6

U tabeli 4 je dat pregled izmjerene efektivne vrijednosti šuma mjerenje ADC vrijednosti i efektivnog broja bita na naponskom ulazu, pri eksternom referentnom naponu, 24-bitnoj rezoluciji A/D konvertora i pri svim dostupnim brzinama odabiranja.

Imajući u vidu tabele 2 i 4, može se zaključiti da mjerenja korišćenjem eksternog referentnog napona donose određena poboljšanja kada je u pitanju efektivni broj bitova. Naime, pri većim brzinama odabiranja, u opsegu od 200.3 SPS do 31250 SPS, ENOB se mijenja u opsegu od -0.5% do 0.57% korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni referentni napon. Pri manjim brzinama odabiranja, u opsegu od 1.25 SPS do 100.2 SPS, ENOB se mijenja u opsegu od 0% do 2.29% korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni.

Najveća razlika je izmjerena na brzini odabiranja od 20.01 SPS, gdje je ENOB, u slučaju eksternog referentnog napona, bio veći za 2.29%, u odnosu na efektivnu rezoluciju izmjerenu sa internim referentnim naponom. U odnosu na šum izmjeran na naponskim ulazima, primjetno je da je efektivni broj bitova manji pri većim brzinama odabiranja, dok je razlika između teorijskog broja bitova i efektivnog broja bitova manja ili jednaka za brzine odabiranja manje od 100.2 SPS. S druge strane, korišćenje internog referentnog napona je pokazalo bolji rezultat od 0.5% i to pri brzini odabiranja od 381 SPS.

Tabela 4: Mjerenja efektivne vrijednosti šuma i efektivnog broja bita na naponskom ulazu u jednostranoj konfiguraciji, pri 24-bitnoj rezoluciji i eksternom referentnom naponu

Brzina odabiranja za jednokanalno mjerenje [SPS]	Brzina odabiranja za višekanalno mjerenje [SPS]	P [μV_{rms}]	ENOB [bitova]	P [μV_{p-p}]	ENOB p-p [bitova]
31250	6211	107	17.5	736	14.7
15625	5181	95	17.6	634	14.9
10417	4444	79	17.9	482	15.3
5208	3115	61	18.3	460	15.4
2597	2597	52	18.5	346	15.8
1007	1007	31	19.3	219	16.4
503.8	503.8	21	19.8	130	17.2
381	381	18	20	111	17.4
200.3	200.3	13	20.4	88	17.7
100.2	100.2	10	20.9	66	18.2
59.52	59.52	7	21.4	47	18.6
49.68	49.68	7	21.4	44	18.7
20.01	20.01	6	21.8	38	19.2
16.63	16.63	4	22	28	19.4
10	10	4	22.1	25	19.6
5	5	3	22.1	22	19.7
2.5	2.5	6	21.8	21	19.8
1.25	1.25	3	22.1	17	20.1

U tabeli 5 je dat pregled izmjerene efektivne vrijednosti šuma mjerenje ADC vrijednosti i efektivnog broja bita na strujnom ulazu, pri eksternom referentnim naponom, 24-bitnoj rezoluciji A/D konvertora i pri svim dostupnim brzinama odabiranja.

Imajući u vidu tabele 3 i 5, prilikom korišćenja eksternog referentnog napona zapaža se da u opsegu od 200.3 SPS do 31250 SPS, ENOB se mijenja u opsegu od -1.15% do 1.55% korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni, dok je pri manjim brzinama odabiranja, odnosno u opsegu od 1.25 SPS do 100.2 SPS, ENOB se mijenja u opsegu od -1.35% do 1.35% korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni.

Takođe, najbolji rezultat je dobijen pri brzini odabiranja od 381 SPS, gdje je ENOB bio veći za 1.55%, za slučaj korišćenja eksternog referentnog napona u odnosu na interni referentni napon. Nasuprot tome, korišćenje internog referentnog napona je pokazalo u četiri slučaja bolji rezultat od eksternog referentnog napona, pri čemu je najbolji iznosio 1.35% i to pri brzini odabiranja od 5 SPS.

Tabela 5: Mjerenja efektivne vrijednosti šuma i efektivnog broja bita na strujnom ulazu, pri 24-bitnoj rezoluciji i eksternom referentnom naponu

Brzina odabiranja za jednokanalno mjerenje [SPS]	Brzina odabiranja za višekanalno mjerenje [SPS]	P [nA _{rms}]	ENOB [bitova]	P [nA _{p-p}]	ENOB p-p [bitova]
31250	6211	186	16.7	1187	13.8
15625	5181	166	16.9	868	14
10417	4444	144	17.1	810	14.1
5208	3115	102	17.5	717	14.7
2597	2597	114	17.4	649	13.6
1007	1007	63	18.2	439	15.3
503.8	503.8	39	19	237	16
381	381	32	19.3	202	16.5
200.3	200.3	23	19.7	150	17
100.2	100.2	17	20.1	112	17.6
59.52	59.52	12	20.6	82	17.8
49.68	49.68	10	20.8	69	18.1
20.01	20.01	7	21.4	47	18.7
16.63	16.63	6	21.4	44	18.7
10	10	4	22.2	38	19
5	5	3	22.3	25	19.6
2.5	2.5	3	22.7	15	20.3
1.25	1.25	3	22.7	14	20.4

5. ZAKLJUČAK

Predstavljeni sistem za višekanalnu akviziciju podataka sa senzora različitih tipova, može se koristiti kao uređaj za brzo testiranje ili kao stalno rješenje u aplikacijama koje iziskuju precizna mjerenja i veliki broj senzora. Mogućnost očitavanja naponskih signala u opsegu od ± 10 V i strujnih signala u opsegu od 0-20 mA osigurava kompatibilnost sa velikim brojem senzora, dostupnih kako u industriji, tako i u svakodnevnoj primjeni.

Pokazane su odlične karakteristike A/D konvertora, koji je u mogućnosti da očita do 31250 uzoraka po sekundi, sa maksimalno dvanaest različitih senzora, dok pri tome zahtijeva snagu od samo 19 mW, pri čemu 24-bitna rezolucija A/D konvertora osigurava precizna mjerenja. Korišćenjem eksternog naponskog regulatora postignuta su određena poboljšanja performansi koja se ogledaju u većem broju efektivnih bitova. U slučaju naponskih mjerenja, izmjeren je ENOB za 0.69% veći u odnosu na efektivnu rezoluciju izmjerenu sa internim referentnim naponom. Kada su u pitanju mjerenja struje, ENOB je veći za 0.24%, čime su osigurana malo preciznija mjerenja sa manjim šumom.

U konfiguraciji sa AD4111 čipom korišćen je ESP8266 D1 mini mikrokontroler. Njegova uloga je konfigurisanje AD4111 čipa preko SPI komunikacionog protokola. Dalja naučna istraživanja se mogu baviti problematikom osmišljavanja „plug and play“ rješenja, odnosno omogućavanjem krajnjem korisniku podešavanja štampane ploče preko web stranice, bežični prenos podataka, kao i njihovu vizuelizaciju, bez potrebe za programiranjem.

LITERATURA

1. <https://www.sphericalinsights.com/reports/current-sensor-market>
2. Srividya Devi, P.; Pusphalatha, D.V.; Sharma, P.M. Measurement of Power and Energy Using Arduino. *Res. J. Eng. Sci.* 2013, 2, 10-15
3. Mnati, M.J.; Van den Bossche, A.; Chisab, R.F. A smart voltage and current monitoring system for three phase inverters using an android smartphone application. *Sensors* 2017, 17, 872
4. Rao, A.S. Design of Low-cost Autonomous Water Quality Monitoring System. In Proceedings of the International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Mysore, India, 22–25 August 2013; pp. 14–19.
5. Fuentes, M.; Vivar, M.; Burgos, J.M.; Aguilera, J.; Vacas, J.A. Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2014, 130, 529–543.
6. Mahzan, N.N.; Omar, A.M.; Rimon, L.; Noor, S.Z.M.; Rosselan, M.Z. Design and development of an arduino based data logger for photovoltaic monitoring system. *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.* 2017, 17, 15.1–15.5.
7. Zachariadou, K.; Yiasemides, K.; Trougkakos, N. A low-cost computer-controlled Arduino-based educational laboratory system for teaching the fundamentals of photovoltaic cells. *Eur. J. Phys.* 2012, 33, 1599–1610.
8. Francis, J. K. Cloud-based multi-sensor remote data acquisition system for precision agriculture (CSR-DAQ), Master thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 2019
9. Paul, K.; Chatterjee, S.S.; Puja, P.; Varshney, A.; Juikar, S.; Prasad, V.; Bhadra B.; Dasgupta S. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 198, July 2022
10. Lam, P.T.; Le, T.Q.; Le, N.N.; Nguyen S.D. Wireless sensing modules for rural monitoring and precision agriculture applications, *Journal of Information and Telecommunication*, VOL.2, NO.1, 107-123, Vietnam, 2018
11. Eroglu, A. Long Range Wireless Data Acquisition Sensor System for Health Care Applications, Research Gate Article, July 2014
12. Hertzog, P.E.; Swart, A.J. A customizable energy monitoring system for renewable energy systems. In Proceedings of the 23rd Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC 2015), Johannesburg, South Africa, 28–30 January 2015; pp. 154-159.
13. Navaro, Miguel Angel Grando. Arduino based acquisition system for control applications, Master thesis, Universitat politecnica de Catalunya, 2012
14. George, Maria, Akash J B, Azad Hussain and Sreedharan Pillai Sreelal. Compact Multichannel Data Acquisition and Processing System for IoT Applications, International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2015
15. Velemurugan, S., C. Rajasekaran. A Reconfigurable On-chip multichannel Data Acquisition and Processing (DAQP) system for multichannel signal processing, International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering (PRIME), 2013
16. Vidal-Pardo, Antonio, Santiago Pindado. Design and Development of a 5-Channel Arduino-Based Data Acquisition System (ABDAS) for Experimental Aerodynamics Research, *Sensors*, 2018
17. <https://grobotronics.com/wemos-d1-mini-esp8266.html?sl=en>
18. Analog Devices, AD4111 Data Sheet, 2021
19. Analog Devices, Chapter 12: Printed Circuit Board Issues
20. Analog Devices, ADR4525ARZ Data Sheet, 2024
21. Belcher R. Allan. ADC Standard IEC 60748-4-3: Precision Measurement of Alternative ENOB Without a Sine Wave, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Vol. 64, No. 12, December 2015
22. Baccigalupi A.; ADC testing methods, Department of Computer Science, University of Naples 'Federico II', Via Claudio 21, 80125, Naples, Italy, February 1999

DANFOSS DRIVES VLT FREKVENTNI REGULATORI I SOFTVERSKI ALAT ZA PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE ELEKTRO MOTORA TZV. CBM „CONDITION BASED MONITORING“

Jovan Milović
TANGENTA DOO Nikšić

Žarko Guranović
Danfoss Drives Beograd

KRATAK SADRŽAJ

Bukvalan prevod CBM-a bi bio praćenje zasnovano na stanju i definiše se kao strategija prediktivnog održavanja koji kontinuirano prati stanje u ovom slučaju trofaznih asinhronih elektro motora koji se pogone preko frekventnih regulatora, koristeći različite tipove senzora, a zatim na osnovu izlaznih analognih signala sa datih senzora u realnom vremenu vrši monitoring. Veličine i komponente nad kojima se vrši monitoring su vibracije, stanje izolacije namotaja statora i kriva opterećenja elektro motora.

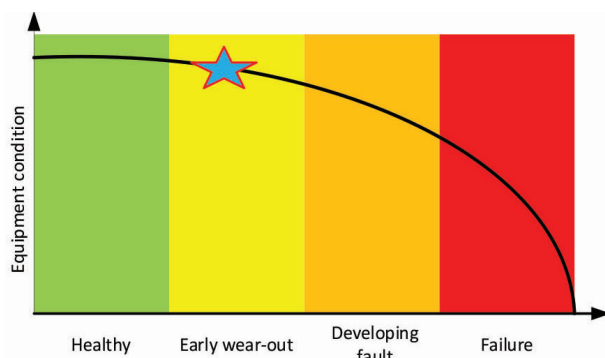
Na taj način Danfoss Drives VLT, kao jedan od pionira u svijetu u oblasti razvoja i serijske proizvodnje frekventnih regulatora, svrstao se i među pionire u oblasti prediktivnog održavanja pogona i sistema upravljanja u industriji. Kako su prevashodno Danfoss Drives VLT frekventni regulatori našli široku primjenu u svim granama industrije, a dokazali su se naročito kao pouzdani i moćni kod izuzetno zahtjevnih aplikacija (kranovi, transporteri, HVAC sistemi, pumpe, kompresori itd.), ovom nadogradnjom softvera i integracijom softverskog alata kakav je CBM napravio se iskorak u eksploataciji i održavanju opreme i pogona i njihovom kontinualnom radu bez neplaniranih zastoja i troškova zastoja i reparacije opreme.

Ključne riječi: Frekventni regulatori, Trofazni asinhroni elektro motori, Senzori i signali, Condition Based Monitoring (CBM), Monitoring i prediktivno održavanje, Danfos Drives VLT

1. UVOD

Ključno pitanje koje se postavlja je na kom principu radi predmetni softverski alat i kako se u praksi realizuje ideja prediktivnog održavanja pogona i praćenja navedenih parametara pogona u realnom vremenu. Na konstrukciji i nosećim montažnim elementima trofaznih asinhronog elektro motora se montiraju posebni senzori vibracija (4-20mA) (maksimalno 4 senzora), a zatim se snima

kriva vibracija pod nominalnim radnim uslovima motora koja se upisuje i čuva u samom softveru (memoriji) frekventnog regulatora. Za monitoring proboja izolacije namotaja statora se ne koriste posebni senzori već se kontinualno analizira struja elektromotora. Osim krive vibracija na sličan način se snima i kriva opterećenja tzv. „load envelope monitor“. Na osnovu obje snimljene krive generišu se pragovi i mjerene analogne vrijednosti CBM funkcija se kontinualno upoređuju sa njima, tj. parametrima koji se mjere u realnom vremenu i normalnom radu pogona, a ako dođe do bilo kakvog odstupanja (van granice dozvoljenog opsega koji se definiše) frekventni regulator javlja upozorenje i na taj način blagovremeno alarmira operatera da se desio problem na datom elektromotoru. Detektujući promjene u krivoj vibracija (npr. usljed oštećenja ležajeva) ili proboja izolacije namotaja statora dok je proboj još u ranoj fazi, frekventni regulator alarmiranjem operatera (putem svjetlosne ili zvučne signalizacije u pogonu, slanjem poruke i obavještenja na SCADA ili HMI itd.) ne samo da šalje poruke upozorenja već i ostavlja dovoljno prostora operaterima da na vrijeme reaguju i preduzmu adekvatne mjere i akcije po pitanju zamjene odnosno servisiranja pomenutog elektromotora. Na taj način se sprečava nastanak veće havarije ili eventualno „domino“ efekat koji bi se odrazio i na ostale elektromotore u nizu ili pak na cijeli sistem (dobar primjer iz prakse su transporter i HVAC sistemi u pogonima gdje je važno održavati idealnu temperaturu u svakom trenutku), a samim tim i skupe troškove popravki i zastoja cijelokupnog pogona i linije. Sam koncept CBM-a je zamišljen da funkcioniše po principu dobijanja prave informacije u pravom trenutku.



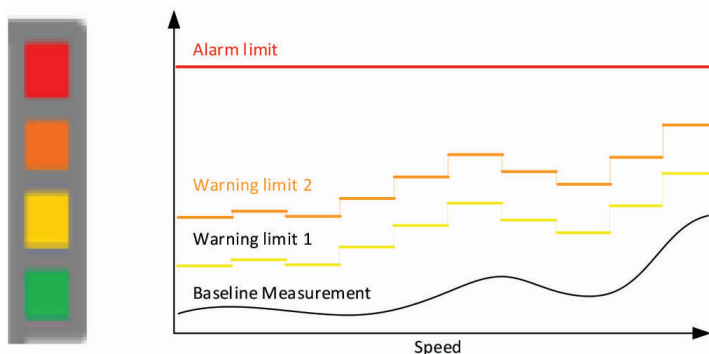
Slika 1.

2. KARAKTERISTIKE I OPIS CBM-A

2.1. Monitoring Vibracija

U toku normalnog rada elektromotora kada se pokrene snimanje krive vibracija od 0 o/min pa do maksimalne brzine frekventni regulator na osnovu snimljene krive definiše „radnu“ krivu vibracija. Opseg brzine koji ko respondira datoj krivoj je izdijeljen na 20 podioka kao što se može vidjeti na slici br. 2 i svaki podiok pamti snimljenu vrijednost. Na istoj slici se mogu vidjeti pragovi aktivacije dojava upozorenja odnosno alarmnog stanja.

Prema standardu mehaničkih vibracija ISO 20816-8:2018: ukoliko izmjerena vrijednost u nekom trenutku premaši prvu graničnu vrijednost (žuta granica) frekventni regulator upozorava na potencijalni kvar na elektromotoru ali ne prekida rad istog tj. ne zaustavlja proces. Slično važi i za narandžastu granicu, s' tim što je sada odstupanje još i veće nego u prethodnom slučaju. Kada izmjerena vrijednost premaši crvenu „kritičnu“ graničnu vrijednost frekventni regulator dojavljuje alarm i automatski zaustavlja dalji rad elektromotora. Danfoss VLT frekventni regulatori se mogu podesiti tako da CBM funkcionalnosti ne zaustavljaju mašinu i u slučaju da se pređe prag alarma. Date poruke o statusu elektromotora se mogu prikazati putem svjetlosne i zvučne signalizacije u vidu signalnog semafora. Opseg praga tolerancije definisan je shodno ISO10816.



Slika 2. Kriva vibracija i pragovi alarmiranja

Praćenje vibracija obuhvata dvije funkcije:

- Opšti nivo vibracija prati mehaničke vibracije i koristan je za rano otkrivanje glavnih kvara poput neuravnoteženosti, neusklađenosti, mehaničke labavosti;
- Druga funkcija koristi vrijednosti izračunate pomoću različitih senzora, korisne za praćenje degradacije ležajeva, loše podmazivanje i slično.

Ove dvije funkcije su komplementarne. Senzori pružaju izračunate izlazne vrijednosti opštih vibracija ($v\text{-rms}$) ili stanja ležajeva u širem frekventnom opsegu ($g\text{-rms}$).

Za snimanje i kontinualno praćenje prethodno pomenute krive vibracija koriste se eksterni senzori vibracija (4...20mA), dok se dati strujni analogni signal uvodi na analogni ulaz frekventnog regulatora. Dati senzori se montiraju na konstrukciji, nosačima ili postolju elektromotora i to:

Montaža V-RMS senzora - Uvijek se postavlja na čvrsti dio kućišta motora. Idealno je postaviti ga na ležaj pogonskog kraja ili što bliže njemu. Mogu se montirati vertikalno ili horizontalno. Jedan senzor po motoru je dovoljan za motore snage do 15 kW. Za veće motore preporučuje se više senzora, u kombinaciji tipova ($v\text{-rms}$ i $g\text{-rms}$). Senzor se može montirati bušenjem/narezivanjem navoja, lijepljenjem ili čak magnetom ako je površina magnetna. Rizik od gubitka signala kod ovog tipa RMS mjerenja je manji.

Montaža G-RMS senzora - mjeri više frekvencije do 5 kHz koje se ne prenose u kućište motora. On mjeri stanje i podmazivanje ležaja na kojem je montiran. Kvalitet montaže je važan za konzistentnost signala. Najbolja veza se postiže bušenjem.

Ova funkcionalnost se može koristiti za prepoznavanje:

- Neuravnoteženosti i ekscentričnosti,
- Labavosti,
- Mehaničke rezonance,
- Degradacija ležaja.

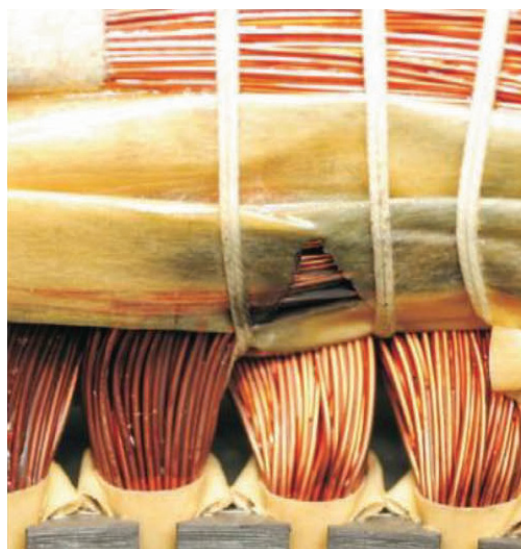


Slika 3. Senzor vibracija

U Danfoss implementaciji, vibracije su uvijek povezane sa brzinom motora. Ovo je važno jer Danfoss frekventni regulatori nude pragove tolerancije prilagodljive stanju rada, za razliku od opšteg praćenja koje koristi apsolutne vrijednosti za čitav raspon brzina. Ova sposobnost je jedinstvena kod mašina sa promjenljivom brzinom rada.

2.2. Monitoring namotaja statora elektromotora

Za monitoring i eventualnu detekciju proboja namotaja statora elektromotora ne koriste se posebni senzori već frekventni regulator kroz praćenje struje elektromotora u normalnom radu (tzv. „motor current signature“) detektuje pojavu mikro struja koje bi mogle da ukažu na eventualno oštećenje izolacije namotaja statora u ranoj fazi. Obično se proboj izolacije namotaja statora ne dešava iznenada već se progresivno vremenom razvija. Kao i u prethodnom slučaju frekventni regulator će na vrijeme detektovati proboj dok je još u početnoj fazi i alarmirati operatere da na vrijeme izvrše zamjenu oštećenog elektromotora i izvrše reparaciju istog prije nego nastupi veća havarija. Napredni algoritmi frekv. regulatora eliminišu lažna upozorenja uzrokovana nesavršenošima motora ili uslovima mreže. Ova funkcija je podržana za asinhronne (IM) i motore sa permanentnim magnetima (PM), paralelne motore, i radi sa instaliranim izlaznim filterima. Može biti posebno korisna za motore koji rade u teškim uslovima i sredinama sa visokim procentom vlage i visokim temperaturama, kao i za starije motore sa istrošenom izolacijom namotaja.

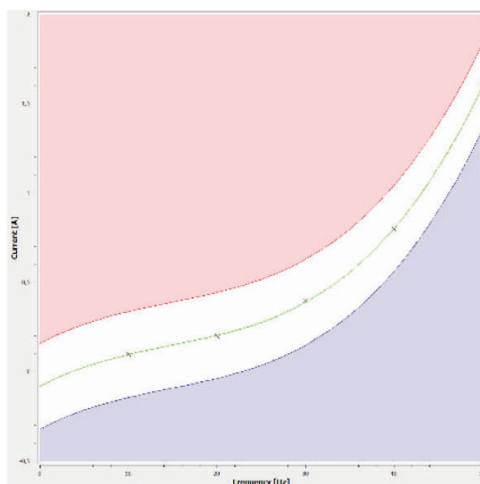


Slika 4. Proboj izolacije namotaja statora

2.3. Monitoring krive opterećenja

Treća funkcionalnost CBM-a koja se odnosi na krivu opterećenja (tzv. „Load envelope monitor“) koristi sličan princip kao funkcija monitoringa vibracija, samo što se u ovom slučaju snima i prati kriva opterećenja u vremenu. Kao što se može vidjeti sa slike br. 5, funkcija snima i pamti krivu opterećenja u normalnom radu elektromotora i kreira opseg nominalnog rada, a zatim kontinualno u vremenu upoređuje dati opseg sa trenutnim opterećenjem, detektuje i alarmira ukoliko kriva opterećenja izađe iz datog opsega. Funkcija je korisna za detekciju kvarova kod raznih aplikacija kao što su pumpe i ventilatori:

- Oštećenja radnog kola pumpi,
- Začepljeni filteri i curenja u ventilacionim sistemima,
- Oštećenje kaiševa ventilatora,
- Trenje u mašinskim sklopovima.



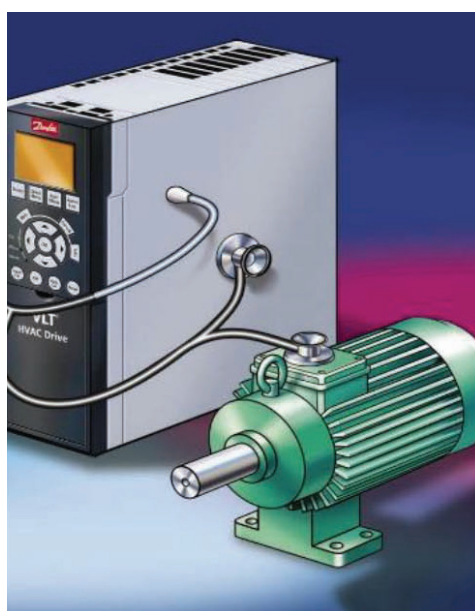
Slika 5. Kriva opterećenja

3. POZITIVNI EFEKTI I PRIMJERI IZ PRAKSE

3.1. Pozitivni efekti

Kroz prethodne tri opisane funkcionalnosti CBM-a Danfoss VLT frekventni regulatori vrše kontinualan monitoring nad trofaznim asinhronim elektromotorima koje pogone, i u slučaju pojave odnosno detekcije bilo kakve anomalije alarmiraće osoblje. Čitav koncept CBM-a je zasnovan na principu „prava informacija u pravom trenutku“ jer je cilj da se kvarovi detektuju dok su u ranoj fazi da bi operaterima ostavili dovoljno vremena za akciju prije nego se desi veća havarija, a shodno tome i zastoji proizvodnje. Ključni benefiti integracije date funkcionalnosti su:

- Smanjenje i prevencija kvarova,
- Smanjenje broja i vremena neplaniranih zastoja pogona,
- Smanjenje troškova zastoja, održavanja, popravke i nabavke rezervnih dijelova,
- Integracija sa SCADA sistemima, cloud e i IoT („machine learning“) kroz razne komunikacione protokole u cilju prikupljanja i korišćenja datih informacija radi postizanja većeg stepena održavanja opreme,
- Produžen radni vijek opreme.



Slika 6.

3.2. Primjer iz prakse

Sa očekivanim rastom evropskog tržišta piva od 15,2% do 2025. godine, HEINEKEN razumije da njegova proizvodna linija mora uvijek biti spremna da zadovolji potražnju - sa svim resursima koji se očekuju da pruže dosljedno pouzdane i izvanredne performanse. U pivari „Den Bosch“, teško radno okruženje postavljalo je brojne izazove: svaki kvar mašine rezultirao je skupim i dugotrajnim periodima zastoja zbog rada u mokrim i teškim uslovima, a električni motori bili su skriveni i teško dostupni u slučaju nužde. Imajući ovo na umu, Danfoss Drives je dobio zadatak da pomogne HEINEKEN-u da integriše monitoring na bazi stanja u svoje procedure kako bi:

- Povećali vrijeme rada,
- Smanjili režijske troškove,
- Poboljšali upravljanje rezervnim djelovima i zalihama,
- Pristupili novim nivoima podataka o mašinama,
- Povećali performanse aplikacija i sistema.

U avgustu 2019. godine, Danfoss Drives je predložio HEINEKEN-u da instalira VLT® pogone sa ugrađenom inteligencijom, povezanošću i senzoričkom. Signali za CBM su integrisani u sistem održavanja pivare putem edge računarstva. Pivara je takođe dobila senzore vibracija 4-20 mA od Hansford Sensors, dok je Danfoss pružio dodatnu podršku kroz definisanje projekta, puštanje u rad i obuku, kao i radionice za određivanje najboljeg rješenja za potrebe HEINEKEN-a. VLT® pogoni podržavaju postojeće komunikacione interfejse i softver kao što su fieldbus, lokalni kontrolni paneli i VLT® Motion Control Tool MCT 10, što je značilo da HEINEKEN nije morao da investira u novi paralelni sistem kao dio nadogradnje.

VLT® Motion Control Tool MCT 10 dodatak se pokazao kao pravi preokret, omogućavajući besprekorno puštanje u rad sa dosljednim parametrima. Zahvaljujući mogućnosti prikupljanja kritičnih podataka o aplikaciji u realnom vremenu, kao i naporima Danfoss Drives-a, HEINEKEN je uspio da optimizuje svoju proizvodnu liniju u Den Boschu, i tako među prvima u svijetu integriše i testiraju mogućnosti koje pruža CBM. Rizik se isplatio, a benefiti su bili višestruki.

Pored toga, digitalna ekspertiza Danfoss Drives-a omogućila je HEINEKEN-u da rekonstruiše sve svoje pogone u ostalim objektima sa funkcionalnošću CBM-a.

Zaključno, nadogradnja u Den Boschu pokazuje da CBM više nije premium proizvod namijenjen samo za nekoliko kritičnih resursa, već pristupačno rješenje dostupno svima – zahvaljujući inovativnom i naprednom pristupu Danfoss Drives-a.



Slika 7.

Još jedan od praktičnih primjera uspješne realizacije CBM-a u svijetu je danska farmaceutska kompanija Novo Nordisk koja je implementirala dati softverski alat na frekventnim regulatorima tip FC-102 Hvac Drive u svojim proizvodnim pogonima. Kao što je poznato u farmaceutskoj industriji ključni aspekt proizvodnje predstavlja 24/7 održavanje temperature i vlažnosti vazduha u striktnim granicama sa vrlo malim pragom tolerancije na bilo kakva odstupanja. Shodno tome HVAC sistemeti igraju ključnu ulogu u lancu proizvodnje lijekova i farmaceutskih proizvoda i bilo koji zastoj ili kvar na datom sistemu posljedično bi mogao uzrokovati kontaminaciju proizvoda i štetu koja se mjeri u milionima dolara po kompaniju. Zbog svega prethodno navedenog proizilazi zaključak koliko je važno adekvatno održavanje i kontrola proizvodnih pogona prevashodno HVAC sistema. Uz integraciju CBM od trenutka implementacije do danas konačan ishod je 0h zaštoja proizvodnih linija.

CBM je našao praktičnu primjenu i u brojnim fabrikama u regionu Zapadnog Balkana prevashodno u pivarama i šećeranama u Hrvatskoj, Srbiji, Makedoniji gdje se dati alat pokazao kao vrlo koristan.

4. ZAKLJUČAK

Inženjeri iz Danfoss-a konstantno rade na usavršavanju i daljem razvoju komponenti, softverskih alata i ponude na polju frekventnih regulatora čime postižu da Danfoss-ov proizvod VLT ostane konkurentan i svjetski lider u svojoj kategoriji. Jedan od tih softverskih alata je upravo tema današnjeg rada, a riječ je o jednom od najnovijih iz ponude, sofisticiranom i potpuno novom rješenju u oblasti frekventnih regulatora tzv. „Condition based monitoring“ koji je kao prvi te vrste napravio iskorak na polju prediktivnog održavanja pogona i opreme. Međutim Danfoss se nije na tome zaustavio već ovaj proizvod nastavlja da usavršava, a sljedeći stadijum jeste nadogradnja CBM-a sa tri nove funkcionalnosti koje su već u fazi testiranja i to su:

- Otkrivanje i izbjegavanje kavitacije,
- Detekcija zemljospoja,
- Aplikacije sa kratkim ciklusom rada.

LITERATURA

1. Danfoss, “VLT® Condition Based Monitoring”
2. Danfoss, “Condition monitoring with intelligent drives”, Heineken Case story
3. Danfoss, “VLT® Condition Based Monitoring” Programming guide VLT FC Series
4. Danfoss, VLT® AutomationDrive FC 301/302, VLT® AQUA Drive FC 202, VLT® HVAC Drive design guide, operating and instruction manual

UNAPREĐENJE PROGRAMA ZA PRORAČUN JAČINE ELEKTRIČNOG POLJA U MOBILNOJ TELEFONIJI SA OSVRTOM NA NJEGOVU PRIMENU KOD 5G SISTEMA

Aleksandar Lebl

IRITEL a.d. Beograd, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad predstavlja nastavak razvoja programa za proračun električnog polja odnosno nivoa zračenja u okolini baznih stanica mobilne telefonije, čime se naslanja na rad prikazan na Sedmim danima elektroinženjera Crne Gore. Rad ima dve tematske celine. U prvoj se prikazuju realizovana poboljšanja postojećeg postupka proračuna koja u znatnoj meri olakšavaju sam proračun. Najvažnija poboljšanja su: 1. unošenje rasporeda i koordinata objekata koji postoje na lokaciji; 2. definisanje visine zemljišta u okolini bazne stanice; 3. proširenje mogućnosti proračuna i na lokacije kod kojih se sve antene ne nalaze na mestu sa istim geografskim koordinatama. Druga tematska celina odnosi se na neke specifične karakteristike zračenja 5G sistema koje je potrebno obuhvatiti prikazanim programom - prvenstveno na upravljanje snopom zračenja i na njegovo uobličavanje (*beamforming*) u skladu sa položajem pojedinih aktivnih korisnika. Prikazan je postupak i rezultati proračuna udaljenosti od bazne stanice na kojoj elektromagnetno zračenje više ne potiče samo od snopa namenjenog za aktivnog korisnika koji se nalazi na tom mestu već i od snopova namenjenih za susedne aktivne korisnike. Pokazano je da u realnim uslovima rada 5G mobilnih sistema električno polje na mestu udaljenog aktivnog korisnika od bazne stanice može imati veću vrednost nego na mestu bliskog aktivnog korisnika.

Ključne reči: 5G, *Beamforming*, Mobilna telefonija, Program za proračun električnog polja

1. UVOD

Softverski paketi za proračun nivoa električnog polja spadaju u vrlo kompleksne neophodne elemente potrebne za rad svake laboratorije koja se bavi procenom nivoa elektromagnetnog zračenja u našem okruženju. Mogući izvori zračenja su mnogobrojni, a među njima mobilna telefonija od-

nosno njene bazne stanice se posebno ističu zbog svog potencijalno značajnog negativnog uticaja na ljudsko zdravlje. Neophodno je da ovi programi stalno prate razvoj tehnologije tako da softver za proračun nivoa zračenja u okolini baznih stanica predstavlja komponentu koja se stalno razvija i poboljšava. Ovo, svakako, važi i za softverski paket koji se ovde prikazuje.

Razvoj programa započet je polazeći od nekoliko vrlo ambicioznih ciljeva: 1. da se dobije program koji će obuhvatiti sve generacije mobilnih sistema od 2G do 5G; 2. da se program razvije u nekom relativno jednostavnom okruženju tako da ne bude potrebno nabavljati neki skupi, komplikovani programski paket; 3. da se u procesu proračuna obuhvate svi značajniji parametri vezani za rad baznih stanica koji utiču na nivo zračenja; 4. da proces unošenja ulaznih podataka, samog proračuna i očitavanja izlaznih rezultata budu što jednostavniji tako da programom može upravljati i osoba sa ne preterano visokim nivoom poznavanja sistema u mobilnoj telefoniji.

Unapređenje programa u ovoj fazi odnosilo se prvenstveno na cilj 4 i, u manjoj meri, na cilj 3. Ovo unapređenje predstavlja prvu, manju celinu u radu koja je predmet poglavlja 2 u radu, odnosno njegovih podpoglavlja. Sledeći korak u razvoju programa odnosiće se na cilj 1, konkretno na primenu programa za proračun električnog polja 5G sistema mobilne telefonije. U vezi s tim, drugu celinu u radu predstavlja prikaz upravljanja snopom zračenja antena (*beamforming*) u 5G sistemima što je specifičnost u odnosu na prethodne generacije gde su antene imale fiksne, čvrsto definisane dijagrame zračenja.

2. POBOLJŠANJA U REALIZACIJI PROGRAMA

Prethodna verzija programa za proračun veličine električnog polja (koja je i prikazana na konferenciji Sedmi dani elektro inženjera Crne Gore [1], [2]) bila je praktično kompletna u smislu uključenja u proračun električnih i drugih karakteristika koje utiču na nivo električnog polja. Program je bio namenjen za proračun polja izazvanog zračenjem antena za 2G, 3G i 4G sisteme (odnosno GSM, UMTS i LTE). Proračun je realizovan za spoljnu sredinu (*outdoor*) i najizloženije spratove objekata (*indoor*). Parametri koji su uzimani u obzir su: snaga predajnika pojedinih sistema, pojačanje antene, njen dijagram zračenja, slabljenje na kablovima između izlaza predajnika u baznoj stanici i predajne antene, broj frekvencijskih nosilaca za GSM sisteme odnosno signala za UMTS i LTE sisteme, vrednosti električnog i mehaničkog *downtilt*-a kao i azimuta glavnog snopa zračenja za svaku primenjenu antenu, visina baze antene u odnosu na površinu tla, slabljenje signala pri prolasku kroz zidove objekata, koeficijent refleksije podloge [1], [2]. Međutim, unošenje ulaznih parametara (podataka) u proračun bilo je prilično komplikovano i oduzimalo je onom ko vrši proračun znatnu energiju. Praktično je bilo potrebno da se za svaku tačku (unutar prostora oko bazne stanice za koju se proračunava električno polje) unese: 1. da li se na tom mestu nalazi neki objekat ili ne, odnosno da li je tačka *indoor* ili *outdoor* tipa; 2. koja je visina zemljišta u posmatranoj tački u odnosu na nivo bazne stanice. Poboljšanja se odnose na: 1. unošenje rasporeda i geografskih koordinata uglova objekata koji postoje na lokaciji; 2. definisanje visine zemljišta u okolini bazne stanice; 3. proširenje mogućnosti proračuna i na lokacije kod kojih se sve antene mobilnih sistema ne nalaze na mestu sa potpuno istim geografskim koordinatama već postoji izvestan razmak između njih – na primer antene se nalaze na različitim mestima krova objekta; 4. olakšan uvid u strukturu nivoa električnog polja unutar pojedinih objekata kao i maksimalne jačine polja u svakom objektu na lokaciji; 5. proširenje baze sa karakteristikama raspoloživih antena; 6. povećanje broja mobilnih sistema na lokaciji i maksimalnog broja antena za svaki sistem čiji se uticaj može uzeti u obzir za proračun; 7. intuitivniji izbor granica oblasti kod prikaza vrednosti električnog polja.

U daljem delu ovog poglavlja objasniće se detaljnije kako su izvršena poboljšanja po svakoj od ovih 7 tačaka.

2.1. Raspored i koordinate uglova objekata

Raspored objekata unutar prostora u okolini bazne stanice određuje se na osnovu očitanih geografskih koordinata četiri ugla objekta iz programa GeoSrbija ili, alternativno, *Google Maps*. Redosled očitavanja 4 koordinate je tačno definisan da je u smeru kazaljke na satu počev od tačke sa najvećom geografskom širinom. Pri tome se geografske koordinate očitavanih tačaka modifikuju u udaljenosti od bazne stanice u metrima. Ukoliko tlocrt objekta ne može da se prikaže kao četvorougao, objekat se raščlanjuje na nekoliko četvorouglova i koordinate svakog tog pojedinog četvorougla se posebno unose. Maksimalni broj ovakvih četvorouglova iznosi 160. Ovo, dalje, na primer znači da se može zadati maksimalno 80 objekata na lokaciji ako se svaki objekat sastoji prosečno od 2 četvorougla, itd. Na osnovu koordinata četvorouglova program sam definiše položaj stranica objekta odnosno tačke između ovih stranica koje su *indoor* tipa. Za ove *indoor* tačke unosi se zatim pre samog proračuna visina na najizloženijem nivou objekta – u principu to je visina poda na najvišem spratu (odnosno visina objekta umanjena za 3m).

2.2. Visina zemljišta u okolini bazne stanice

U postupku određivanja visine zemljišta u okolini bazne stanice polazi se od programa *Zonum Solutions* [3]. U program *Zonum Solutions* unose se geografske koordinate kvadratne površine koja okružuje baznu stanicu. Pored toga u programu se zadaje i broj tačaka ($N_t=4900$) za koje se određuje visina zemljišta u odnosu na podnožje bazne stanice. Po završetku proračuna tih N_t vrednosti visina se kopira u program za proračun. Kako se proračun veličine električnog polja realizuje za ukupno 22500 tačaka, to znači da se jedna tačka sa visinom tla iz *Zonum Solutions* programa koristi u proračunu polja za ukupno približno 4 tačke, odnosno za kvadratić veličine 2x2 tačke.

U praktičnoj realizaciji visinu zemljišta ne treba uzimati u obzir ako se ona nalazi u oblasti sa granicama $\pm 3m$ u odnosu na apsolutnu visinu podnožja bazne stanice.

2.3. Proračun u slučaju da se sve antene ne nalaze na istom mestu

Svi elementi jedne bazne stanice ne moraju se nalaziti na mestu sa istim geografskim koordinatama. Na primer, antene za pojedine sektore bazne stanice mogu biti locirane na različitim delovima jednog solitera. Za svaki od ovih delova mogu se uneti zasebno geografske koordinate s tim što se jedan od tih delova proglašava kao referentni koji se za dobijene slike električnog polja nalazi u koordinatnom početku. Pored ovog referentnog dela mogu se zadati još 4 različite koordinate tačaka sa elementima baznih stanica.

2.4. Struktura nivoa električnog polja unutar objekata i maksimalni nivo polja unutar objekata

Kao jedan novi element programa za proračun električnog polja uvedena je mogućnost da se iz ukupne strukture brojnih vrednosti električnog polja na celoj lokaciji „iseku“ delovi koji odgovaraju za 3 izabrana objekta na taj način što se anuliraju sve vrednosti polja u prostoru oko bazne stanice sem onih vrednosti koje odgovaraju analiziranom izabranom objektu. Ova struktura polja dobija se sa rezolucijom 2m*2m, 1m*1m ili 0,5m*0,5m, kako se to dobija i za celokupnu sliku polja [1]. Kao kriterijumi za izbor 3 objekta može poslužiti položaj tih objekata (da su što bliže centralnim delovima snopova zračenja po azimutu) i njihova visina (da su visine što približnije visinama na kojima se nalaze antene (najizloženiji spratovi objekta su bliski centralnim delovima snopova zračenja po elevaciji). Pored ovoga, novi element u programu je mogućnost da se odrede

maksimalne veličine električnog polja unutar svakog od objekata koji se nalaze na lokaciji. Maksimalni broj objekata predviđen za ovakav prikaz na lokaciji je 100. Na osnovu ovih maksimalnih vrednosti električnog polja za sve objekte na lokaciji može se izvršiti korekcija u izboru 3 objekta za koja se određuje struktura električnog polja.

2.5. Proširenje baze sa karakteristikama raspoloživih antena

U ovome koraku formirana je baza sa oko 60 antena koje se najčešće koriste u Srbiji. Kao i u ranijoj verziji programa, dijagrami zračenja svake antene u horizontalnoj i u vertikalnoj ravni aproksimiraju se polinomima trećeg, četvrtog ili petog stepena tako da što približnije odgovaraju realnom dijagramu zračenja. Pri tome je akcenat na tome da aproksimativna karakteristika što bolje zadovoljava dijagram zračenja u glavnom snopu (*main lobe*). Dobijanje ovakve polinomske aproksimativne karakteristike je funkcija ugrađena u sam Excel program. Kad god se u procesu proračuna električnog polja za neku novu lokaciju naiđe na neku antenu čija karakteristika do tog trenutka nije aproksimirana, moguće je proširenje baze sa antenama. Ovo definisanje dijagrama zračenja nove antene može da odradi svaki korisnik ako je potrebno. Naime, ako karakteristika zadate antene ne postoji u bazi, pojaviće se ispis „ANTENNA FALSE“.

2.6. Broj mobilnih sistema na lokaciji

U prethodnoj verziji programa maksimalni broj mobilnih sistema za koji je mogao da se odradi proračun bio je 6, svaki sa po 3 sektora. To je, recimo, moglo biti da jedan operater ima na lokaciji sisteme u tehnologijama GSM900, UMTS2100, LTE800 i LTE1800 (4 sistema), a drugi operater sisteme u tehnologijama GSM900 i UMTS2100 (2 sistema). U novoj verziji programa maksimalni mogući broj mobilnih sistema povećan je na 18, svaki sa po 6 sektora. To bi, drugim rečima, značilo da 3 operatera mogu imati po 6 sistema u različitim tehnologijama što znači da se lako pored sistema u tehnologijama GSM900, GSM1800, UMTS2100, LTE800, LTE1800 može dodati u proračun i sistem u 5G tehnologiji. U vrlo retkim slučajevima kada na lokaciji ima više od 6 sektora umesto 18 sistema sa po 6 sektora moguće je lako napraviti transformaciju u proračunu tako da je maksimalno moguće predvideti do 9 sistema sa po maksimalno 12 sektora.

2.7. Izbor granica kod prikaza električnog polja

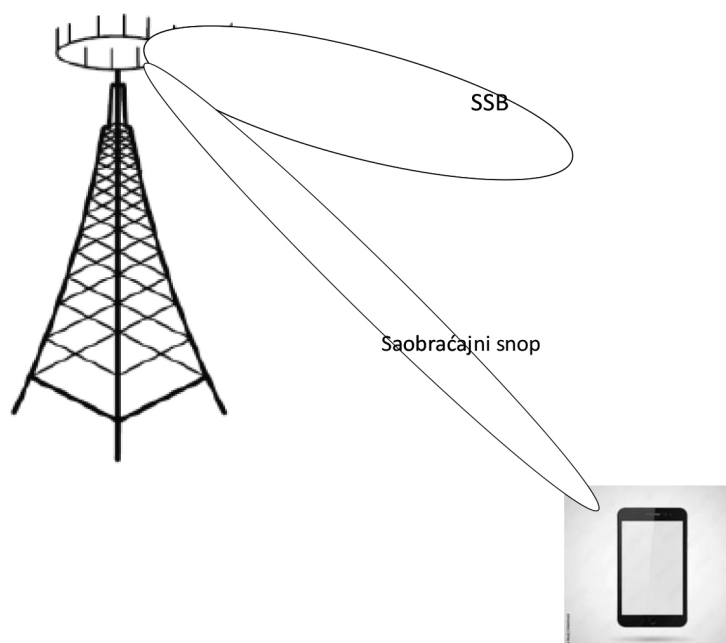
Kod grafika sa vrednostima električnog polja smanjen je broj oblasti za koje se prikazuje polje u odnosu na prethodno rešenje. Broj tih oblasti sveden je na samo 10. Granice oblasti izabrane su tako da odgovaraju, redom prema srpskim propisima [4]: 1. gornjoj granici dozvoljenog električnog polja za frekvencije iznad 2GHz; 2. gornjoj granici dozvoljenog električnog polja za sisteme LTE1800, GSM900 i LTE800; 3. 10% vrednosti električnog polja za granice određene u prethodne dve tačke; 4. 0,4V kao reprezentativna mala vrednost električnog polja.

3. FORMIRANJE SNOVA ZRAČENJA U 5G SISTEMIMA

Način proračuna nivoa električnog polja u slučaju analize za GSM, UMTS i LTE sisteme (tj. 2G, 3G i 4G) nije primenljiv u slučaju analize za 5G sisteme. Sistemi na koje se odnosi analiza u ovom radu nalaze se u frekvencijskom opsegu oko 3,5GHz. Osnovni razlog za ovo je što antene koje se koriste za 5G sisteme nemaju fiksnu, unapred definisanu dijagram zračenja kao sistemi prethodnih generacija. Umesto toga formiraju se posebni snopovi zračenja za saobraćajne kanale svakog aktivnog korisnika („saobraćajni snop“) koji su usmereni prema trenutnoj poziciji korisnika u prostoru oko

bazne stanice (*beam forming*) [5], [6]. U literaturi se za ovakav način formiranja snopa zračenja koristi i termin *Eigen-Based Beamforming* [6]. Druga moguća strategija je da se između unapred definisanih snopova zračenja bira onaj koji daje najkvalitetniji signal (*beam steering*) [7]. Za ovu strategiju u literaturi se sreće i naziv *Grid of Beams* (GoB). Obe ove strategije imaju za cilj da u svakom trenutku prate kretanje korisnika u prostoru oko bazne stanice. Primer jedne trosektorske 5G antene kojom se realizuje *beam steering* funkcija prikazan je u [8]. Na svakoj od 3 stranice prizme smeštena su po 24 elementa koji mogu nezavisno da zrače u različitim pravcima

Na slici 1 prikazani su snopovi zračenja koji postoje u slučaju primene 5G sistema. To su, kao prvo, snopovi za SSB kanale (*Synchronization Signal/Physical Broadcast Channel* (SS/PBCH)) i, kao drugo, snopovi za saobraćajne kanale [5]. Signali za SSB kanale spadaju u stalno prisutne signale („*always on*“). Ima ih nekoliko koji se emituju iz bazne stanice – jedan tipičan broj ovih signala je 7 pri čemu svaki od njih pokriva prostor od 17° kompletirajući tako celokupan prostor od 120° koji se dodeljuje jednom sektoru u baznoj stanici [9]. Njihovi dijagrami zračenja su stabilni u toku vremena i koriste ih svi mobilni korisnici za svoj rad. Signali za saobraćajne kanale emituju se samo prema aktivnim korisnicima. Na taj način smanjuje se ukupan nivo zračenja na mestima gde postoje mobilni korisnici, jer je osnovna ideja da oni aktivni primaju samo signal koji je namenjen njima samima dok je za one koji nisu aktivni ideja da ne primaju nikakvo zračenje od saobraćajnih kanala. Snopovi zračenja za saobraćajne kanale su vrlo uski, usmereni i njihov intenzitet u smeru maksimalnog zračenja je veći nego intenzitet u smeru maksimalnog zračenja za SSB signale. Na taj način, pored smanjenja intenziteta zračenja, smanjuje se i interferencija signala između pojedinih aktivnih korisnika.



Slika 1. Snopovi zračenja u slučaju primene 5G tehnologije

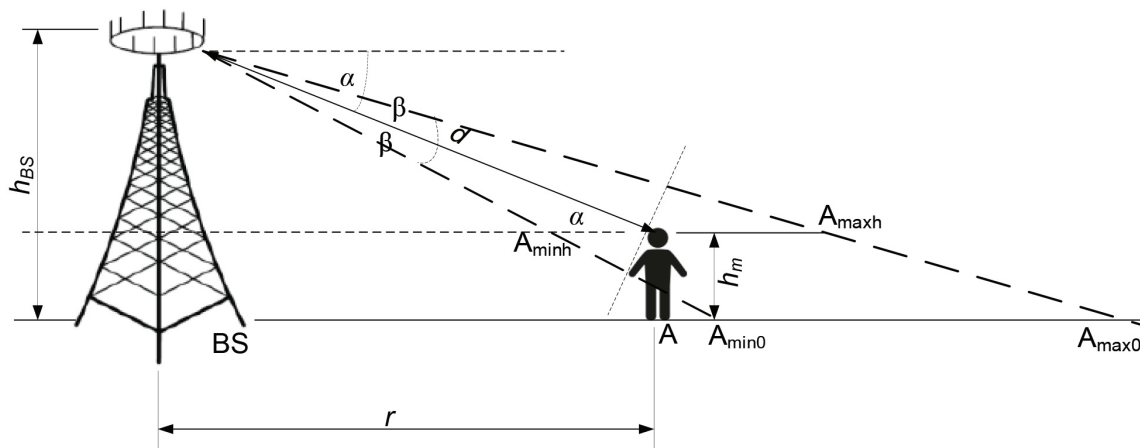
Podaci o konkretnim vrednostima širina snopova zračenja za saobraćajne kanale su oskudni u priličnoj meri. Tako se u karakteristikama jednog primera antene u [6] (za koju autor navodi da se ne odnosi na jednu konkretnu antenu) navodi vrednost $12-16^\circ$ po azimutu i $5,5-7,5^\circ$ po elevaciji. Slična vrednost širine snopa zračenja po azimutu proizlazi i iz grafika sa slike 4 u [10]. Usmenim kontaktom sa jednim od autora [11] dobijen je podatak da su tipične vrednosti ovog ugla reda 10° do maksimalno 20° . Kada je reč o slabljenju signala van glavnog snopa zračenja, ova vrednost na pomenutoj karakteristici iz [10] iznosi $\geq 15\text{dB}$, odnosno više od 30 puta po snazi. Uzimajući ovo u obzir, karakteristika zračenja 5G može se modelovati konstantnim jediničnim nivoom zračenja unutar uglova maksimalnog zračenja i pojačajem čija je vrednost 0 van ovih uglova. Ovakva karak-

teristika koristi se za analize u daljem toku rada.

U praksi se koriste dve varijante formiranja snopa zračenja (*beam forming-a*): po azimutu i po elevaciji [7], [12]. Formiranje po azimutu koristi se ako su korisnici smešteni na površini tla, tj. na maloj visini. Formiranje po elevaciji koristi se ako se korisnici nalaze na spratovima solitera. U daljem toku rada analizira se formiranje snopa zračenja po azimutu.

Na slici 1 prikazan je saobraćajni snop zračenja prema samo jednom aktivnom korisniku i samo jedan snop zračenja za SSB kanale. U praksi imaćemo veći broj saobraćajnih kanala za aktivne korisnike i više snopova za SSB kanale. Svi ovi snopovi se sabiraju tokom vremena, formirajući rezultatno zračenje (*Envelope Radiation Pattern*) [6]. Razlikuju se *Broadcast Envelope Radiation Pattern* (BERP) za SSB kanale i *Traffic Envelope Radiation Pattern* (TERP) za saobraćajne kanale. Ovo nisu fizički postojeći dijagrami zračenja već samo model koji se dobija uzimajući u obzir za svaki pravac apsolutno maksimalnu vrednost zračenja. Izgled prvenstveno TERP zavisi od gustine raspodele korisnika, uslova prostiranja signala, načina kretanja korisnika, vremenskog intervala u toku koga se vrši posmatranje, itd. Dakle, svaki dijagram koji nam može biti dat specifičan je za jednu posebnu situaciju.

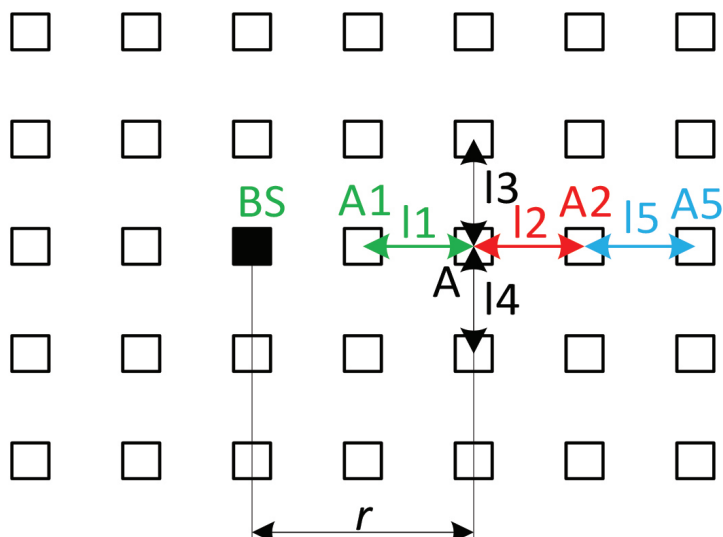
Osnovni elementi koji se koriste u analizi *beamforming-a* prikazani su na slici 2. Visina na kojoj se nalazi bazna stanica je h_{BS} . Mobilni korisnik nalazi se na udaljenosti r u horizontalnoj ravni od bazne stanice. Saobraćajni snop zračenja usmerava se pod uglom α u odnosu na horizontalnu ravan prema aktivnom korisniku (glavni snop zračenja). Širina snopa zračenja je $2 \cdot \beta$ (po β na obe strane u odnosu na pravac glavnog snopa zračenja) posmatrano kao presek dijagrama zračenja u vertikalnoj ravni. Van ovog ugla širine $2 \cdot \beta$ smatraće se da nema zračenja, kako je to već objašnjeno. Visina mobilnog korisnika uzima se da je $h_m = 1,7\text{m}$ [13]. Ova visina je znatno manja od visine antene bazne stanice, pa se može zanemariti. Zato se u kasnijim matematičkim proračunima koristi visina $h_m = 0\text{m}$ radi pojednostavljenja samog postupka proračuna. Snop zračenja obuhvata oblast između tačaka $A_{\min 0}$ i $A_{\max 0}$ na površini tla.



Slika 2. Osnovni elementi za analizu beamforming-a

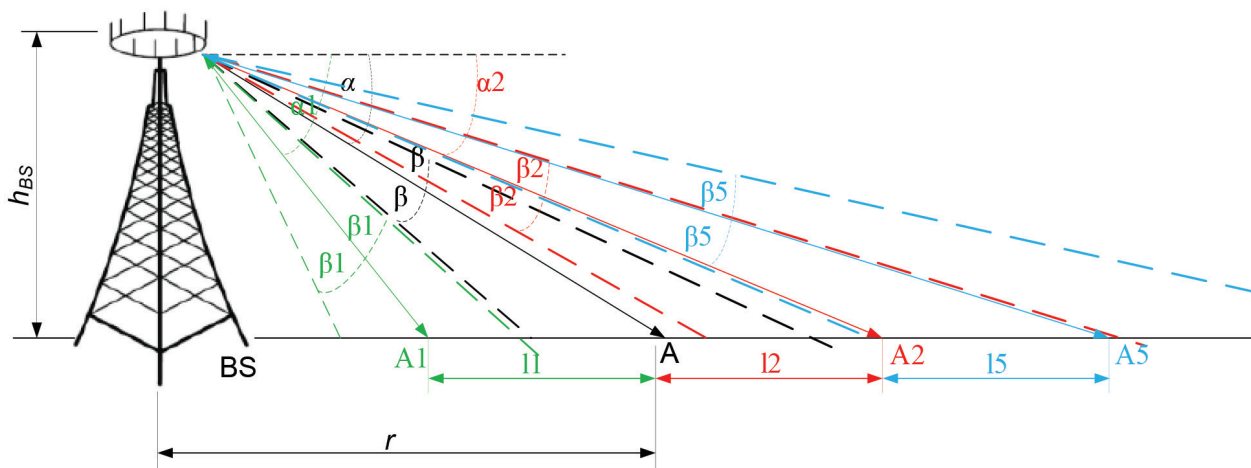
4. PROCENA KOJI SNOPOVI UTIČU NA ZRAČENJE U OKOLINI BAZNE STANICE

Pretpostavimo jedan hipotetičan raspored aktivnih mobilnih korisnika unutar oblasti oko bazne stanice kakav je prikazan na slici 3, pogled odozgo. Na ovoj slici crni kvadratić simbolično prikazuje položaj bazne stanice dok beli kvadratići predstavljaju hipotetični položaj aktivnih mobilnih korisnika. Svi aktivni korisnici nalaze se na međusobno jednakoj udaljenosti, odnosno $l1=l2=l3=l4=l5$. Položaji pojedinih korisnika označeni su sa A, A1, A2 i A5.



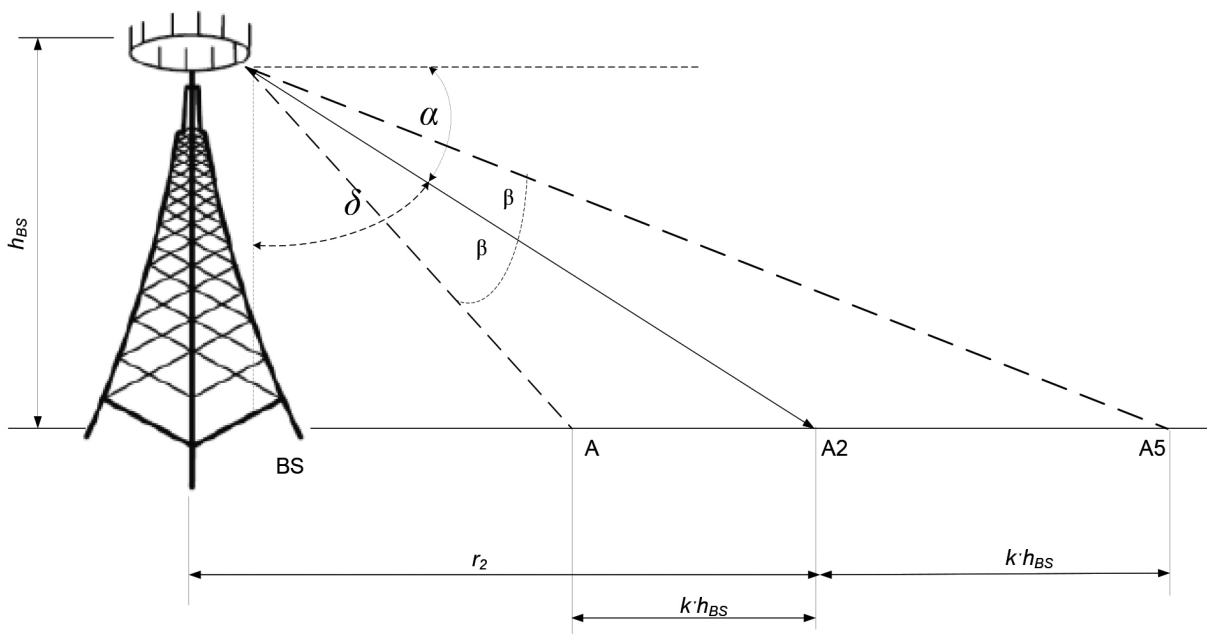
Slika 3. Hipotetični raspored aktivnih korisnika u okolini bazne stanice

Na slici 4 dat je stilizovani prikaz granica u okviru kojih se nalaze dijagrami zračenja za aktivne korisnike sa slike 3. Na ovoj slici zanemarene su visine korisnika u odnosu na visinu bazne stanice, kako je to već objašnjeno uz sliku 2. Dijagrami zračenja za pojedine korisnike modelovani su karakteristikama koje imaju jedinično pojačanje unutar oblasti širine $2 \cdot \beta$, kao što je već obrazloženo uz sliku 2. Dijagrami zračenja za sve korisnike su iste širine, odnosno $\beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_5$. Ono što se može zaključiti sa stilizovane slike 4 je da saobraćajni snopovi zračenja za korisnike koji su bliži baznoj stanici zahvataju manju površinu na tlu nego udaljeniji korisnici. Zbog toga se, na primer, snop zračenja $2 \cdot \beta_1$ za korisnika u položaju A1 nigde ne preklapa ni sa jednim od snopova zračenja za susedne korisnike. Nasuprot tome, snop zračenja $2 \cdot \beta_2$ za korisnika u položaju A2 u jednom delu se preklapa sa snopom za korisnika u položaju A kao i sa snopom za korisnika u položaju A5. Preciznije rečeno, korisnik u položaju A2 biće pod uticajem „svog“ snopa zračenja, ali i susednog korisnika u položaju A5. Važiće i obrnuto: korisnik u položaju A5 biće pod uticajem „svog“ snopa zračenja, ali i susednog korisnika u položaju A2.



Slika 4. Stilizovani snopovi zračenja za aktivne korisnike

Sada ćemo odrediti ugao glavnog snopa zračenja u odnosu na smer visine bazne stanice (odnosno udaljenost od bazne stanice) pri kojima korisnik u oblasti u okolini bazne stanice počinje da biva izložen takođe i zračenju namenjenom susednom korisniku. Ovo ćemo proračunati uz pomoć slike 5.



Slika 5. Ilustracija uz proračun ugla zračenja pri kome korisnik počinje da biva izložen zračenju snopova za susedne korisnike

Neka je na slici 5 mobilni korisnik koji će izazvati zračenje i na mestu susednog korisnika lociran u tački A2 na udaljenosti r_2 od bazne stanice. Udaljenost do tog susednog korisnika izražava se kao umnožak visine bazne stanice, odnosno $k \cdot h_{BS}$. Ugao koji saobraćajni snop zračenja za posmatranog korisnika u tački A2 zaklapa sa visinom bazne stanice je δ pri čemu je $\delta = 90^\circ - \alpha$, gde je α ugao definisan uz sliku 4.

Ugao snopa zračenja za korisnika u tački A2 može se izraziti kao:

$$\text{tang } \delta = \frac{r}{h_{BS}} \quad (1)$$

Ugao za susednog korisnika (u tački A ili tački A5 zavisno od toga na koju stranu je prvo zadovoljen uslov da snop zračenja za korisnika na poziciji A2 „pokriva“ i tog susednog korisnika) iznosi:

$$\text{tang } (\delta \pm \beta) = \frac{r \pm k \cdot h_{BS}}{h_{BS}} \quad (2)$$

Vrednost faktora umnožavanja visine bazne stanice na osnovu (1) i (2) sada se dobija kao:

$$\pm k = \text{tang } (\delta \pm \beta) - \text{tang } \delta \quad (3)$$

odnosno posle trigonometrijskih transformacija:

$$\pm k = \frac{\sin(\pm \beta)}{\cos(\delta \pm \beta) \cdot \cos \delta} \quad (4)$$

i dalje:

$$k = \frac{2 \cdot \sin \beta}{\cos(2 \cdot \delta \pm \beta) + \cos \beta} \quad (5)$$

Vrednost ugla δ sada se postepeno izračunava sledećim postupkom:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2} \cdot \text{ctg } \beta + \frac{\cos(2 \cdot \delta \pm \beta)}{2 \cdot \sin \beta} \quad (6)$$

$$2 \cdot \delta \pm \beta = \arccos \left(2 \cdot \sin \beta \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{ctg} \beta \right) \right) \quad (7)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot \left(\arccos \left(2 \cdot \sin \beta \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{ctg} \beta \right) \right) - (\pm\beta) \right) \quad (8)$$

Odgovarajuća udaljenost od bazne stanice korisnika na poziciji A2 može se sada odrediti na osnovu ugla δ proračunatog u (8) kao:

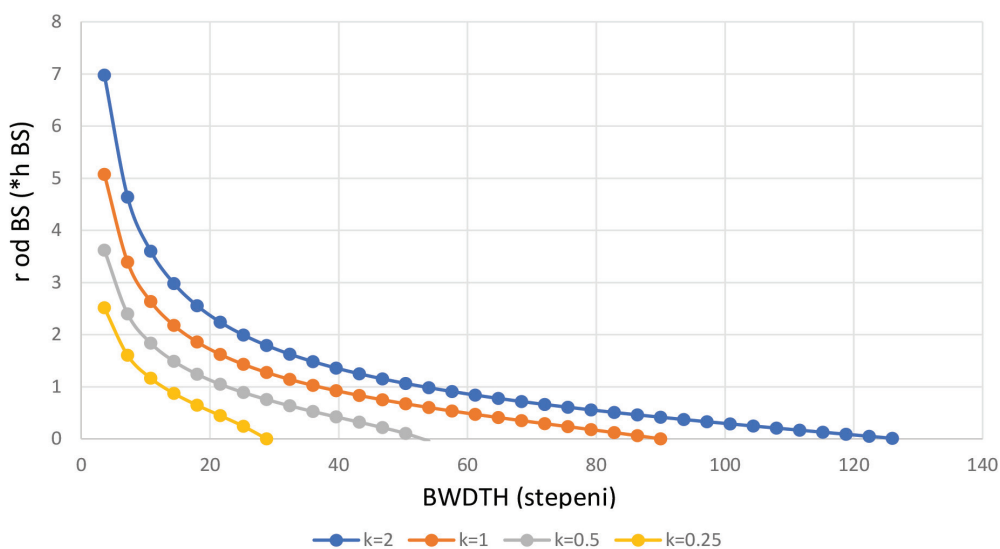
$$r_2 = h_{BS} \cdot \operatorname{tang} \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\arccos \left(2 \cdot \sin \beta \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{ctg} \beta \right) \right) - (\pm\beta) \right) \right) \quad (9)$$

5. REZULTATI PRORAČUNA

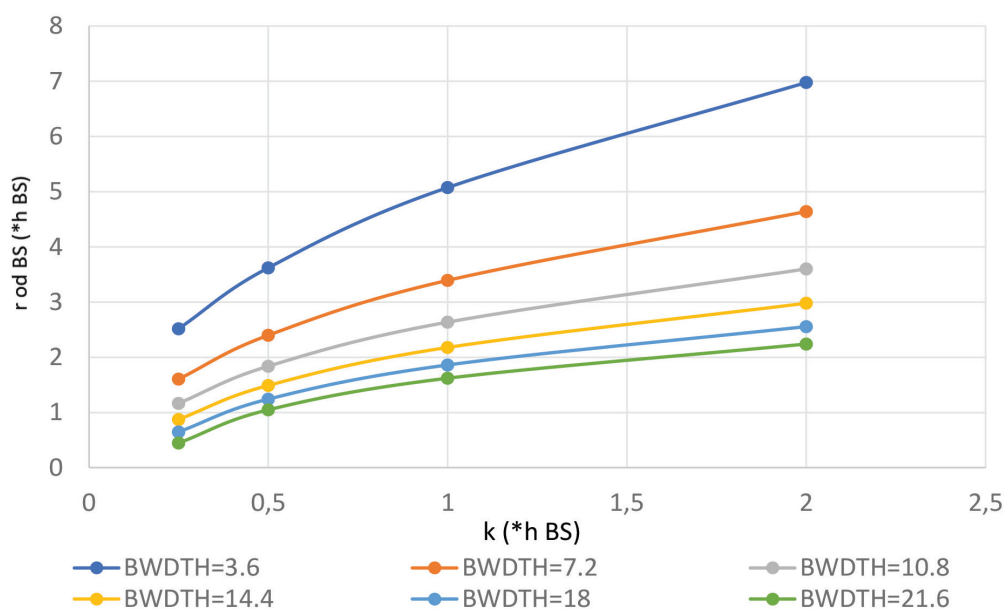
Rezultati proračuna udaljenosti r na kojoj bilo koji aktivni korisnik počinje da bude pod uticajem polja koje je posledica aktivnosti susednog korisnika prikazani su na slikama 6 i 7. Konkretno vrednosti dobijene su na osnovu (9). Pri tome je ta udaljenost na slici 6 prikazana u funkciji širine snopa zračenja (BWDTH) primenjene antene a parametar za prikaz je odnos udaljenosti između aktivnih korisnika i visine bazne stanice iznad tla (k). Na slici 7 je obrnuto: udaljenost r se prikazuje u funkciji odnosa udaljenosti k između aktivnih korisnika i visine bazne stanice a širina snopa zračenja (BWDTH) je parametar. Vrednosti udaljenosti od bazne stanice koje se dobijaju na vertikalnim osama grafika na slikama 6 i 7 potrebno je još pomnožiti visinom bazne stanice h_{BS} kako je i naznačeno na samim slikama.

Rezultati proračuna na slikama 6 i 7 dobijeni su kada se primeni pozitivna vrednost za ugao $\pm\beta$ u (9). Ako bi se primenila negativna vrednost za $\pm\beta$, dobila bi se vrednost r veća za k .

Ono što se može zaključiti na osnovu grafika prikazanih na slikama 6. i 7. je da udaljenost od bazne stanice korisnika koji počinje da „oseća“ zračenje koje potiče od snopa namenjenog susednom korisniku raste sa smanjenjem širine snopa zračenja i sa povećanjem međusobne udaljenosti između aktivnih korisnika.



Slika 6. Udaljenost korisnika od bazne stanice koji je dodatno pod uticajem snopa zračenja za susednog korisnika u funkciji širine snopa zračenja



Slika 7. Udaljenost korisnika od bazne stanice koji je dodatno pod uticajem snopa zračenja za susednog korisnika u funkciji udaljenosti između korisnika

6. KONTROLA SNAGE I NJEN UTICAJ NA NIVO ZRAČENJA KOD 5G SISTEMA

Proračun intenziteta zračenja u okolini bazne stanice polazi od premise da je cilj da se proračuna maksimalni nivo električnog polja. Svi elementi koji utiču na nivo polja uzimaju se u proračunu sa svojim najnepovoljnijim vrednostima. Među ovim elementima je i emisiona snaga bazne stanice. U proračunu se smatra da se emituje maksimalna moguća snaga nezavisno od ostalih uslova koji mogu uticati na zračenje.

U proračunu se, dalje, smatra da emitovana snaga signala opada sa kvadratnim stepenom udaljenosti od bazne stanice, odnosno vrednost koeficijenta slabljenja signala (*environmental propagation coefficient*) uzima se da je $\gamma=2$. Ovo je, praktično, najmanje moguće slabljenje signala koje odgovara slabljenju u slobodnom prostoru. Kvalitativnom analizom može se zaključiti da će korisnik koji je bliži baznoj stanici biti izložen većem nivou emitovanog signala nego onaj koji je udaljeniji. Pri tome će nivo signala sa udaljenošću od bazne stanice brže opadati (s obzirom da se radi o slabljenju sa kvadratom udaljenosti) nego što se nivo primljenog signala povećava kao rezultat toga što je udaljeni korisnik izložen i uticaju saobraćajnog snopa zračenja susednog korisnika.

U realnim uslovima rada situacija je drugačija. Kao prvo, realno slabljenje signala pri njegovom prostiranju je veće nego u slobodnom prostoru: vrednost koeficijenta slabljenja signala kreće se u granicama između $\gamma=2$ i $\gamma=5$ [14]. Zatim, već počev od GSM sistema (2G) pa nadalje i kod sistema sledećih generacija mobilne telefonije primenjuje se kontrola snage za emitovane signale [15], [16]. Emitovani nivo signala je niži za korisnike koji su bliži baznoj stanici sa krajnjim ciljem da se na mestu mobilnog korisnika obezbedi takav nivo signala koji je blizak minimalnom nivou koji obezbeđuje ostvarivanje mobilne veze. U slučaju približno istih ostalih uslova prostiranja signala, razmene približno iste količine podataka i primene mobilnih telefona istih/sličnih karakteristika za različite korisnike prijemni nivo signala za te različite korisnike će biti približno isti. Samim tim kod 5G sistema gde se teži tome da svaki korisnik bude „izložen“ samo svome saobraćajnom snopu zračenja, u opisanim uslovima svaki aktivni korisnik će biti izložen približno istom nivou zračenja. Međutim, s obzirom da formiranje snopa zračenja utiče na smanjenje interferencije između aktivnih korisnika, kontrola snage se ne primenjuje uvek kod 5G sistema. Bez kontrole snage na saobraćajnim kanalima je realizovano, na primer, merenje prikazano u [17].

Posmatrajmo sada slučaj da imamo dva para aktivnih korisnika pri čemu su svaka dva korisnika u paru međusobno jednako udaljena – jedan par bliži baznoj stanici i drugi par dalji od bazne stanice. Za aktivnog korisnika koji je dodatno izložen delovanju električnog polja zbog aktivnosti susednog korisnika (par dalji od bazne stanice) nivo zračenja će biti viši nego što je to slučaj sa korisnikom koji se nalazi samo u polju prouzrokovanom njegovim saobraćajnim snopom (par bliži baznoj stanici). Neočekivani rezultat ove analize je da će viši nivo električnog polja biti na mestu aktivnog korisnika koji je udaljeniji od bazne stanice. Pri tome, ako je susedni korisnik koji dodatno utiče na jačinu električnog polja bliži baznoj stanici nego posmatrani korisnik, rezultatni nivo električnog polja može biti i više nego dvostruko veći nego kada se radi o korisniku bliskom baznoj stanici.

7. ZAKLJUČAK

Ovaj rad prikazuje nastavak rada na programu za proračun električnog polja u okolini baznih stanica mobilne telefonije. Kao takav, on se nadovezuje na rad prikazan na Sedmim danima elektroinženjera Inženjerske komore Crne Gore. Prvi deo rada prikazuje nove i modifikovane od ranije postojeće komponente proračuna koji olakšavaju i ubrzavaju analizu u samom programu. Kao takav, ovaj deo rada prvenstveno je namenjen direktnoj primeni projekatata. Drugi deo rada odnosi se na početne analize za 5G sisteme mobilne telefonije koje treba da budu smernica za buduće prilagođenje programa primeni u slučaju da na lokaciji postoje/planiraju se 5G sistemi. Ovaj deo rada ima dominantno naučnu komponentu kao pripremu za usmerenje u projektantske vode.

Glavna pažnja pri analizi za 5G sisteme posvećena je upoznavanju sa *beam forming*-om. *Beam forming* je specifičnost 5G sistema u odnosu na prethodne generacije sistema mobilne telefonije. Kod sistema koji pripadaju 2G-4G primenjuju se antene sa fiksnim dijagramima zračenja, nezavisnim od rasporeda korisnika u prostoru oko bazne stanice gde je svaki korisnik bilo da je on aktivan ili neaktivan pod uticajem celokupnog električnog polja. Kod 5G sistema cilj je da se postigne da svaki aktivni korisnik bude pod uticajem samo onog saobraćajnog snopa zračenja iz bazne stanice koji je namenjen njegovoj aktivnosti. Dalje, cilj je da neaktivni korisnik ne bude pod uticajem zračenja koje potiče od saobraćajnih kanala. Samim tim i nivo zračenja je očekivano da bude niži nego kod sistema generacija 2G-4G. U radu je dokazano postojanje jedne paradoksalne činjenice: da nivo zračenja kojem je izložen saobraćajno aktivni korisnik na većoj udaljenosti od bazne stanice može biti viši nego u slučaju korisnika na manjoj udaljenosti u slučaju da su ova dva aktivna korisnika praćena svaki dodatnim aktivnim korisnikom koji se u oba slučaja nalaze na istoj udaljenosti od analiziranih korisnika.

LITERATURA

1. A. Lebl, C. Tušup, "Novi program za proračun nivoa elektromagnetnog zračenja u okolini baznih stanica mobilne telefonije," Sedmi dani elektro inženjera Crne Gore, Podgorica, 26-27. oktobar 2023.
2. A. Lebl, „Program for Electrical Field Estimation around Base Stations of Mobile Telephony,” 10th International Conference IcETRAN 2023., East Sarajevo, 5-8. June 2023., TEI1.5, pp. 1-6, ISBN 978-86-7466-970-9.
3. <http://www.zonums.com/gmaps/terrain.php?action=sample>.
4. "Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima", Službeni glasnik Republike Srbije broj 104/2009, 2009.
5. D. Franci, S. Coltellaci, E. Grillo, S. Pavoncello, T. Aureli, R. Cintoli, M. D. Migliore, "Experimental Procedure for Fifth Generation (5G) Electromagnetic Field (EMF) Measurement and Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment," *Environments*, Vol. 7, No.

- 3, art.number:22, pp.1-15, March 2020., <https://doi.org/10.3390/environments7030022>.
6. B. Biscontini, "Recommendation on Base Station Active Antenna System Standards," version 2.0, Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance, September 2021.
 7. S. A. Khwandah, J. P. Cosmas, P. I. Lazaridis, Z. D. Zaharis, I. P. Chochliouros, "Massive MIMO Systems for 5G Communications," *Wireless Personal Communications*, Vol. 120, My 2021, pp. 2101-2115, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08550-9>.
 8. M. A. Al-Tarifi, M. S. Sharawi, A. Shamim, "A Massive MIMO Antenna System for 5G Base Stations with Directive Ports and Switched Beamsteering Capabilities," *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2018., pp. 1-8, ISSN: 1751-8644, DOI: 10.1049/iet-map.2018.0005.
 9. H. Schwarz, T.Jungman, "Measuring Immissions of 5G Base Stations with Beamforming," *Microwave Journal*, Vol. 65, Issue 5, pp. 18, May 2022, ISSN: 0192-6225.
 10. D. Colombi, P. Joshi, B. Xu, F. Ghasemifard, V. Narasaraju, C. Törnevik, "Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 15, paper 5280, July 2020, pp. 1-10, DOI: 10.3390/app10155280.
 11. A. Lebl, Dj. Budimir, "Maximum electric field estimation in the vicinity of 5G base stations before their start-up," *Military Technical Courier*, Vol. 71, No. 2, April 2023., pp. 345-361., DOI: 10.5937/vojtehg71-42426; <https://doi.org/10.5937/vojtehg71-42426>.
 12. Q-U-A. Nadeem, A. Kammoun, M-S. Alouini, "Elevation Beamforming With Full Dimension MIMO Architectures in 5G Systems: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 21, Issue 4, July 2019, pp. 3238-3273., DOI: 10.1109/COMST.2019.2930621.
 13. European Committee for Electrotechnical Standardization, "European standard EN 50400:2006/A1:2012: Basic standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz — 40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service," CENELEC, 2012.
 14. J. Eberspracher, H.-J. Vögel, C. Bettstetter, *GSM, Switching, Services and Protocols*, (Section 5), John Wiley & Sons, 2nd Edition, April 2001.
 15. M. Mileusnić, M. Popović, A. Lebl, D. Mitić, Ž. Markov, "Power Control of Base Station in GSM: Influence of Users' Density in the Cell," *Automatika*, Vol. 56, No. 1, March 2015., pp. 84-90., DOI: <https://doi.org/10.7305/automatika.2015.04.606>.
 16. M. Mileusnić, M. Popović, A. Lebl, D. Mitić, Ž. Markov, "Influence of Users' Density on the Mean Base Station Output Power," *Elektronika ir Elektrotehnika*, Vol. 20, No. 9, November 2014., pp. 74-79., DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.eee.20.9.5418>.
 17. M. Ruttner, H. Keller, "5G FR1 Exposure measurement with extrapolation," Narda Safety Test Solutions, SRM-3006 Application Note NSTS 0723-AN1125.

UTICAJ VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE NA MEDICINSKU PRAKSU: STANJE, IZAZOVI I PERSPEKTIVE

Ivan Martinović

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

KRATAK SADRŽAJ

U okviru ovog rada predstavljeno je stanje, izazovi i perspektive u primjeni vještačke inteligencije u medicini, sa fokusom na primjenu ove tehnologije u radiologiji. Rad je preglednog karaktera i oslanja se na vodeće studije objavljene u prestižnim svjetskim časopisima. Ove studije pokazuju da je potrebno uložiti dodatne napore za široku primjenu vještačke inteligencije u kliničkoj praksi. Prije svega treba voditi računa o pristrasnosti (bias) u podacima, koji mogu degradirati performanse modela vještačke inteligencije. Dodatno, medicinski podaci su jako osjetljivi sa stanovišta privatnosti te obimna zakonska regulativa usporava razvoj i primjenu vještačke inteligencije u medicini. Iako trenutno izgleda da smo daleko od scenarija da vještačka inteligencija može zamijeniti medicinski kadar, u budućnosti se može očekivati da medicinski kadar koji ne koristi mogućnosti vještačke inteligencije bude zamijenjen onim kadrom, koji koristi mogućnosti ove tehnologije.

Ključne riječi: Biomedicinski inženjering, Vještačka inteligencija, Medicina, Radiologija

1. UVOD

Industrijska revolucija kao pojam skovan je u prvoj polovini 19. vijeka i on predstavlja nagli društveni napredak prouzrokovan tehnološkim razvojem [1]. Do sada su zabilježene četiri industrijske revolucije. Posljednju industrijsku revoluciju karakterišu sajber fizički sistemi, oslanjajući se na tehnologije kao što su vještačka inteligencija (Artificial Intelligence-AI), nanotehnologija, robotika, IoT (Internet of things), 3D štampa. Sajber fizički sistemi daju značajan doprinos u unapređenju digitalizacije, kao i transformaciji proizvodnih procesa kroz uspostavljanje sistema pametnih fabrika. Ipak, u stručnim krugovima sve više je aktuelno razmišljanje da sada svjedočimo novom dobu obilježenom nevjerovatnim razvojem AI.

AI je doživjela veliku popularizaciju u 2023. godini, te je prema Kolinsovom rječniku prograšena

za riječ godine [2]. U ovom rječniku AI je definisana kao „*simulacija ljudskih mentalnih funkcija pomoću kompjuterskih programa*“. Glavni okidač za popularizaciju AI predstavljalo je lansiranje ChatGPT platforme od strane američke kompanije OpenAI [3]. Ova platforma je za samo pet dana dosegla milionitog korisnika, što predstavlja svojevrsan rekord imajući u vidu da je platformama kao što su Facebook, Twitter, Netflix za milionitog korisnika trebalo od nekoliko mjeseci do nekoliko godina [4]. Važnost ove platforme se ogleda u činjenici da je ona po prvi put omogućila prosječnom korisniku da na jednostavan način direktno dođe u kontakt sa tehnologijom AI. Međutim, popularizacija ove tehnologije u prethodnih par godina može navesti na pogrešan zaključak da je AI tehnologija novijeg datuma. Zapravo razvoj AI se može pratiti od pedesetih godina 20. vijeka, kroz rad naučnika kao što su Alan Turing (*Alan Turing*) i Džon Mekarti (*John McCarthy*) [5]. Relativno spori razvoj AI uslovljen je tehnološkom nespremnošću da se uspostavljeni teorijski osnovi AI primijene u praksi. Razvoj AI je u direktnoj vezi sa izgradnjom tri stuba na kojima se temelji AI: podaci, algoritmi i računarski resursi. Za široku praktičnu primjenu AI potrebno je bilo sačekati da proces digitalizacije obezbijedi dovoljnu količinu podataka iz kojih AI modeli mogu da stiču znanja. Takođe, bilo je potrebno sačekati razvoj računarskih resursa, u prvom redu grafičkih kartica, koji će obezbijediti dovoljnu računarsku snagu za obuku AI modela.

Popularizacija AI je prouzrokovala veliku pozornost i podjelu javnosti. Javnost je primarno podijeljena na one koji zastupaju stanovište da treba raditi na daljem nesmetanom razvoju AI, kao i one koji smatraju da treba ograničiti razvoj ove tehnologije prije svega zbog potencijalnih negativnih efekata na čovječanstvo. Međutim i pored dva suprotstavljena pogleda na dalju sudbinu AI tehnologije postoji jedna oblast u kojoj se razvoj ove tehnologije ne dovodi u pitanje, to je medicina.

U ovom radu predstavice se stanje, izazovi i perspektive u primjeni AI u medicini, sa posebnim fokusom na njenoj primjeni u radiologiji. Dodatno, rad će ponuditi odgovore na sljedeća pitanja:

Kako AI transformiše medicinsku praksu?

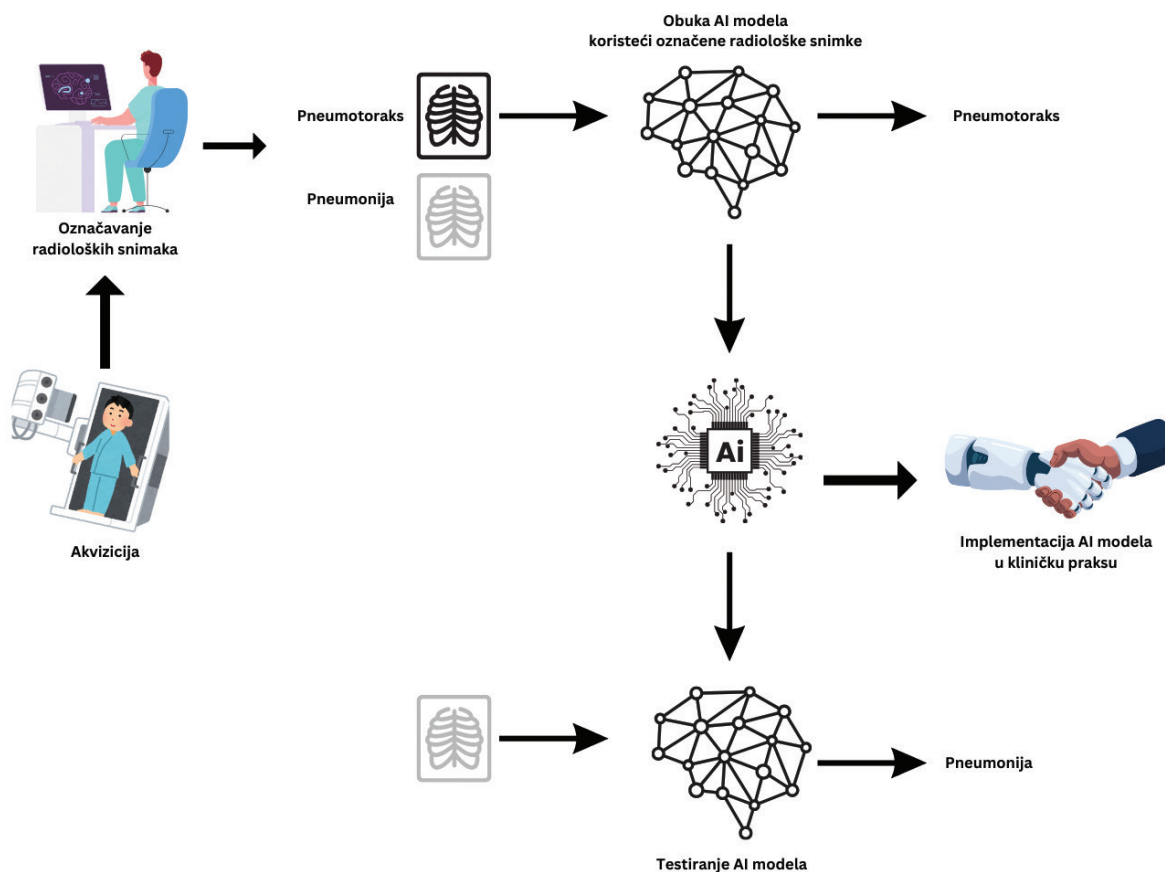
Šta to ograničava AI da se ova tehnologija primijeni u svakodnevnoj kliničkoj praksi?

Koliko smo blizu scenariju u kojem bi AI mogla zamijeniti medicinski kadar?

2. PRIMJENA VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE U MEDICINI

AI nalazi primjenu u svim područjima medicine, od dijagnostike i liječenja do prevencije bolesti [6]. Glavna svrha AI je da kvalitet i brzinu pružanja zdravstvenih usluga podigne na viši nivo. Ovo je posebno značajno u manje razvijenim sredinama gdje usljed nedostataka medicinskog kadra i medicinske opreme značajan broj ljudi ne može biti adekvatno zbrinut, što u konačnici može rezultirati kobnim ishodom [7][8,6]], "issued": {"date-parts": [{"2021", 12, 15}]}, "schema": "https://github.com/citation-style-language/schema/raw/master/csl-citation.json" .

Primjena AI u dijagnostici i prevenciji oboljenja uglavnom se vezuje za primjenu ove tehnologije u radiologiji (Slika 1). Sa druge strane u procesu liječenja AI nalazi primjenu u procesu njege pacijenata, u okviru operativnih zahvata sa fokusom na minimalno invazivne operacije, kao i u procesu planiranja liječenja.



Slika 1. Blok šema koja prikazuje kreiranje modela vještačke inteligencije za kliničku primjenu

2.1. Radiologija u eri vještačke inteligencije

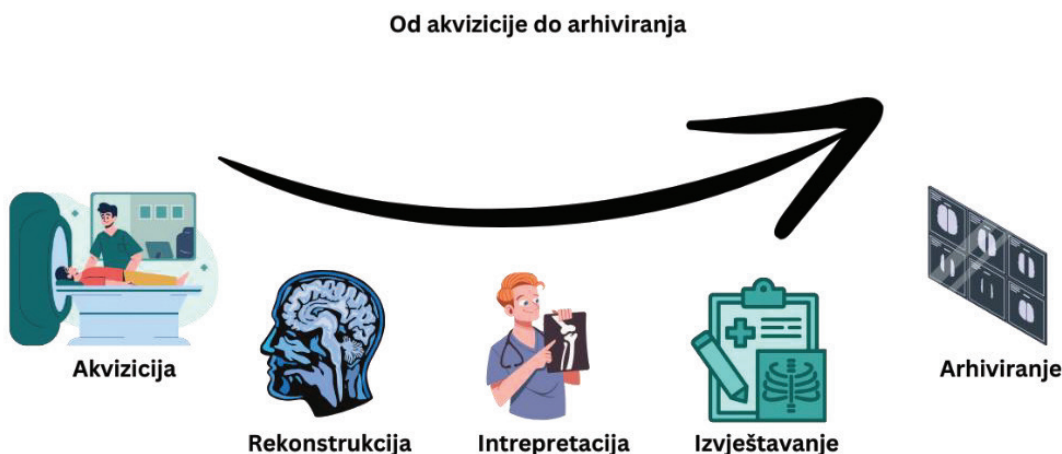
Način na koji AI oblikuje medicinsku praksu možda se najbolje može vidjeti na primjeru radiologije. Trenutna težnja u svijetu je da se fokus sa reaktivne medicine usmjeri na preventivnu medicinu [8]. U tom procesu tranzicije značajnu ulogu igra radiologija, grana medicine koja između ostalog omogućava rano otkrivanje velikog broja oboljenja koristeći različite modalitete (konvencionalna radiografija, kompjuterizovana tomografija CT, magnetna rezonanca MR, ultrazvuk, fluoroskopija).

O uticaju AI na radiologiju rađen je veliki broj istraživanja, koja naglašavaju da AI nalazi primjenu u cjelokupnom radnom toku (workflow) radiologije (Slika 2), tj. od postupka akvizicije pa sve do procesa arhiviranja radioloških snimaka [9], [10]. Proces akvizicije podrazumijeva sve one procedure koje uključuju sakupljanje slikovnih podataka unutrašnje strukture tijela pacijenta. Akvizicija je prvi i ključni korak budući da kvalitet prikupljenih podataka direktno utiče na uspostavljanje dijagnoze. AI se u procesu akvizicije primarno koristi kao sredstvo za automatizaciju manualnih procedura koje su jedan od glavnih uzročnika smanjenja kvaliteta radioloških snimaka. Jedna od tih procedura je pozicioniranje pacijenata tokom izvođenja CT pregleda. Studija rađena od strane kineskih naučnika [11] pokazala je da automatsko pozicioniranje u poređenju sa manualnim doprinosi uštedi vremena za 28%. Dodatno, automatsko pozicioniranje utiče na smanjenje doze zračenja isporučene pacijentu za 16%. Pored procesa akvizicije značajno smanjenje doze zračenja kod CT modaliteta moguće je obezbijediti koristeći AI u procesu rekonstrukcije. Proces rekonstrukcije podrazumijeva pretvaranje sirovih podataka prikupljenih tokom snimanja u radiološki snimak koji se može koristiti u procesu uspostavljanja dijagnoze. Korišćenje AI u procesu rekonstrukcije doprinosi konceptu nisko doznih uređaja, gdje se doza zračenja isporučene pacijentu dodatno smanjuje [12], [13], [14]. Dijagnostičke procedure, koje svoj rad baziraju

na tehnologiji X-zraka, oslanjaju se na ALARA (*as low as (is) reasonably achievable*) princip. Ovaj princip podrazumijeva da se u procesu snimanja koristi ona minimalna doza zračenja koja neće degradirati mogućnost uspostavljanja dijagnoze.

Pored prethodno opisanih primjera AI, veoma je značajna primjena ove tehnologije u procesu uspostavljanja dijagnoze. Naučne studije pokazuju da radiolozi koji koriste algoritme AI brže i tačnije uspostavljaju dijagnoze nego radiolozi koji u svom radu ne koriste mogućnosti AI [15]. Nakon interpretacije radioloških snimaka prateći regulativu, koja se razlikuje od zemlje do zemlje, potrebno je čuvati/arhivirati snimke određeni broj godina. Ovaj postupak je veoma zahtjevan sa stanovišta obezbjeđivanja dovoljnog memorijskog prostora za skladištenje svih snimaka. U cilju smanjenja memorijskih zahtjeva koriste se algoritmi za kompresiju radioloških snimaka. Pored standardnih algoritama za kompresiju (JPEG, PNG) naučnici su razvili niz algoritama koji se baziraju na AI [16]. Prednost ovih algoritama se ogleda u tome što postupak kompresije ne utiče na eliminisanje korisnih informacija koje su ključne u postupku uspostavljanja dijagnoze. Prema tome, nakon dekompresije radiološki snimak je ponovo moguće koristiti za uspostavljanje dijagnoze.

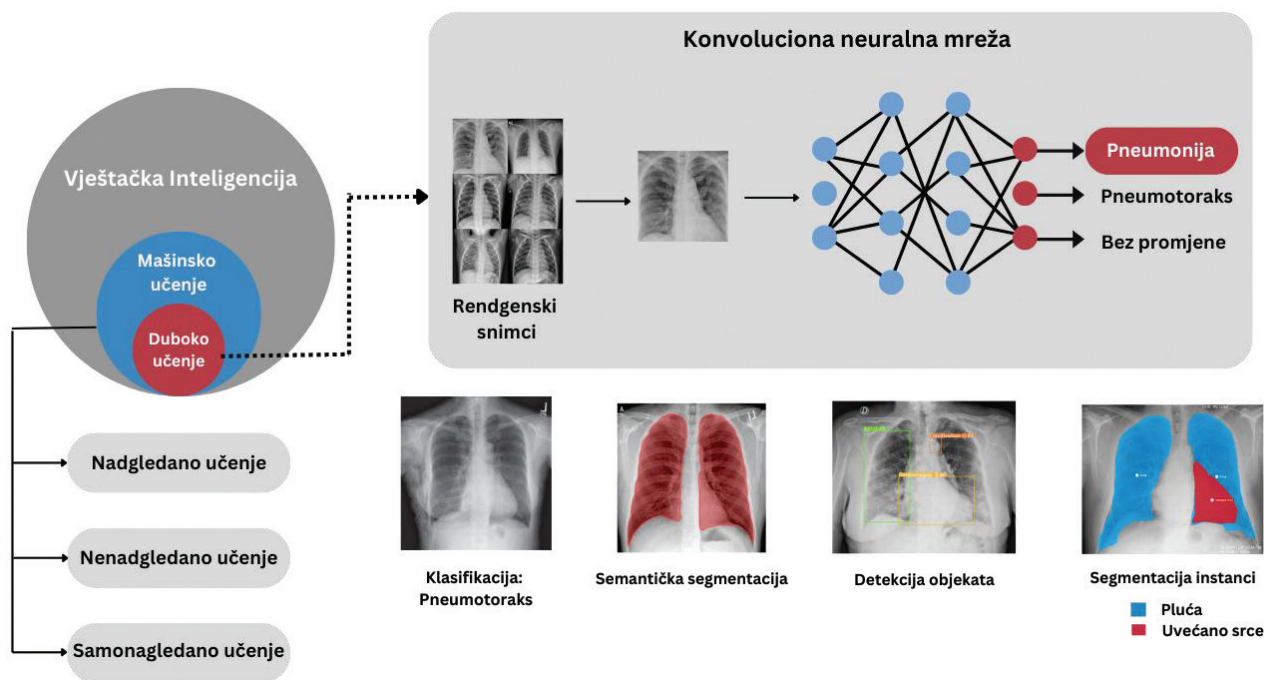
AI unapređuje cijeli radni tok radiologije



Slika 2. Radni tok radiologije

2.2. Najčešće korišćene metode vještačke inteligencije u radiologiji

Mašinsko učenje predstavlja podoblast AI koja se najčešće primjenjuje u radiologiji. Cilj mašinskog učenja je stvaranje algoritama koji su sposobni da se adaptiraju na nove situacije i uče na bazi iskustva [17]. Algoritme u oblasti mašinskog učenja možemo podijeliti na: nadgledano učenje (*supervised learning*), nenadgledano učenje (*unsupervised learning*), kao i samonadgledano učenje (*self-supervised learning*) (Slika 3).



Slika 3. Metode vještačke inteligencije i njihove primjene u radiologiji

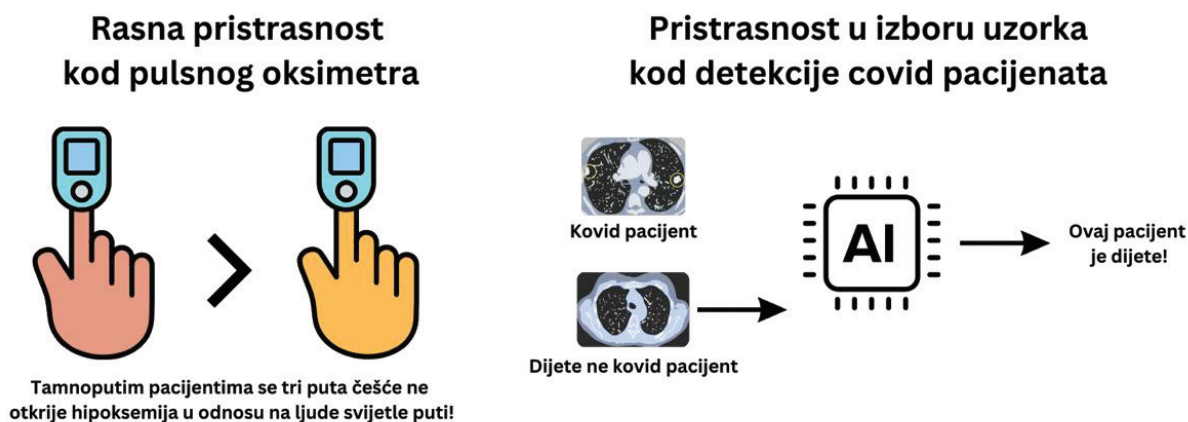
Nadgledano učenje je tip učenja u kojem se algoritmu u procesu obuke tačno predočava šta svaki ulazni podatak predstavlja. Sistem za automatsko uspostavljanje dijagnoze može biti obučavan sa označenim radiološkim snimcima različitih oboljenja. Nakon obuke sistem bi trebalo da bude u stanju da razlikuje i klasifikuje oboljenja na ranije neviđenim radiološkim snimcima. Nenadgledano učenje s druge strane oslanja se na neoznačene skupove podataka. Koristeći ovaj tip učenja algoritam pokušava da pronađe skrivene obrasce ili strukture u podacima na osnovu njihovih sličnosti ili veza. Nenadgledano učenje u radiologiji se može koristiti za klasterizaciju radioloških snimaka u grupe na osnovu sličnih karakteristika tkiva ili drugih uočenih struktura na snimcima [18]. Jedan od takvih primjera je prepoznavanje anomalija, oštećenja tkiva. Opisani način obuke doprinosi kreiranju algoritama sa većom sposobnošću generalizacije u odnosu na nadgledano učenje. Poboljšanje generalizacije, kao i ušteda u vremenu i resursima kod nenadgledanog učenja postiže se prije svega korišćenjem neoznačenih skupova podataka. Ovo je posebno značajno jer se na ovaj način eliminiše potreba za ekspertskim znanjem prilikom kreiranja algoritama. S druge strane, usljed činjenice da algoritam nije obučan na jasno definisanim uzorcima dolazi do poteškoća u tumačenju dobijenih rezultata, što predstavlja jednu od glavnih mana nenadgledanog učenja. Između nadgledanog i nenadgledanog učenja nalazi se samonadgledano učenje. Samonadgledano učenje se sprovodi u dva koraka. Prvi korak podrazumijeva obuku algoritma koristeći neoznačene skupove podataka, dok drugi korak podrazumijeva korišćenje označenih skupova podataka. Na ovaj način se algoritmu daje prostor da prvo sam uoči neka zajednička svojstva u podacima, dok se u drugom koraku definiše svrha (zadatak) sistema. Iako se nadgledano učenje trenutno dominantno koristi u radiologiji, u literaturi se često navodi da budućnost ipak pripada samonadgledanom učenju [19], [20].

Najznačajni doprinos primjeni AI u radiologiji vezuje se za razvoj vještačkih neuralnih mreža (Artificial Neural Network-ANN), koje su omogućile uspostavljanje koncepta dubokog učenja (deep learning) [21]. ANN su kreirane tako da izvršavanje složenih zadataka baziraju na mreži međusobno povezanih vještačkih neurona raspoređenih u slojevima. Ukoliko je broj slojeva veći možemo govoriti o dubokoj neuralnoj mreži. Duboka neuralna mreža koja se najčešće primjenjuje u radiologiji je konvoluciona neuralna mreža (Convolutional Neural Network-CNN). Razlog za široku primjenu CNN leži u činjenici da medicinske slike čine oko 90% svih zdravstvenih poda-

taka [22]. Zadaci u kojima CNN pokazuje najbolje rezultate su klasifikacija radioloških snimaka [23], semantička segmentacija [24], segmentacija instanci [25], kao i detekcija objekata na radiološkim snimcima [26] a vast number of medical images are produced every day. There is a great demand for intelligent equipment for adjuvant diagnosis to assist medical doctors with different disciplines. With the development of artificial intelligence, the algorithms of convolutional neural network (CNN).

3. IZAZOVI I PERSPEKTIVE U PRIMJENI VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE U MEDICINI

Pored nesumnjivih benefita koje pruža tehnologija AI u medicini, postoje određeni izazovi koji sprečavaju široku primjenu ove tehnologije u kliničkoj praksi. U naučnim publikacijama često se navodi da primjena AI u medicini može biti posebno korisna u vanrednim zdravstvenim situacijama, kao što su pandemije i epidemije. Pojava korona virusa 2020. godine predstavljala je pravi test za ove tvrdnje. Nažalost, istraživanje sprovedeno od strane Turing Instituta u Velikoj Britaniji [27] pokazalo je da AI nije pružila očekivanu pomoć u borbi protiv korona virusa. Ovo istraživanje je uključivalo analizu 232 algoritma prezentovanih u vodećim svjetskim časopisima. Rezultati su pokazali da ni jedan od 232 algoritma ne može naći primjenu u kliničkoj praksi, dok se za dva algoritma predlaže dodatno testiranje. Istraživači sa Univerziteta Kembridž su otišli korak dalje analizirajući 415 algoritama od kojih ni jedan nije bio adekvatan za kliničku primjenu. Glavni nedostatak uočen u ovim algoritmima ticao se korišćenja neadekvatnih medicinskih podataka za obuku AI modela. Sprovedena istraživanja su pokazala da su nerealna očekivanja od AI dovela do pokušaja primjene razvijenih modela u kliničkoj praksi prije nego što su objektivno bili spremni za to. Tako je npr. kreiran algoritam koji je trebalo da omogući detekciju pacijenata koji su zaraženi sa korona virusom koristeći CT snimak grudnog koša. Međutim, pored dovoljnog broja snimaka koji su predstavljali kovid pacijente bilo je potrebno nabaviti snimke ne kovid pacijenata, a sve sa ciljem da bi AI model bio obučen da razlikuje ove dvije kategorije. U konkretnom slučaju odlučeno je da se za ne kovid pacijente prikupe podaci iz obližnje dječije bolnice. Rezultat rada sa ovakvim setom medicinskih podataka prouzrokovao je da AI model nije naučio da detektuje kovid pacijente, već je naučio da detektuje da li je pacijent dijete ili odrasla osoba. Opisani problem spada u jedan od ključnih izazova u primjeni AI u medicini, a tiče se pristrasnosti (bias) podataka. Pristrasnost podataka je izazov koji nije samo rezervisan za primjenu AI u medicini. Postojanje ovog problema proističe iz činjenice da setove podataka za obuku AI modela kreiraju ljudi čija je jedna od karakteristika pristrasnost, tj. ne donošenje suda o nekome ili nečemu na osnovu objektivnih, logičkih analiza, već na osnovu subjektivnih faktora kao što su medijski uticaj, kulturni stereotipi ili etički principi. Jedan od takvih primjera može biti široko rasprostranjeno stanovište u našem društvu da su muškarci znatno bolji vozači automobila nego pripadnice ženskog pola. Ipak, naučna zajednica vjeruje da je prevazilaženjem problema pristrasnosti u podacima moguće kreirati AI modele koji će biti značajno objektivni nego ljudi. Ovo je posebno važno za aplikacije gdje treba nepristrasno izvršiti određenu selekciju, kao što je npr. izbor adekvatnog kandidata za radni angažman. U oblasti medicine pristrasnost u podacima (Slika 4.) se dijeli na pristrasnost prouzrokovane od strane medicinskih aparata (*bias from medical devices*), kao i na pristrasnost u izboru uzorka (*sampling selection bias*).



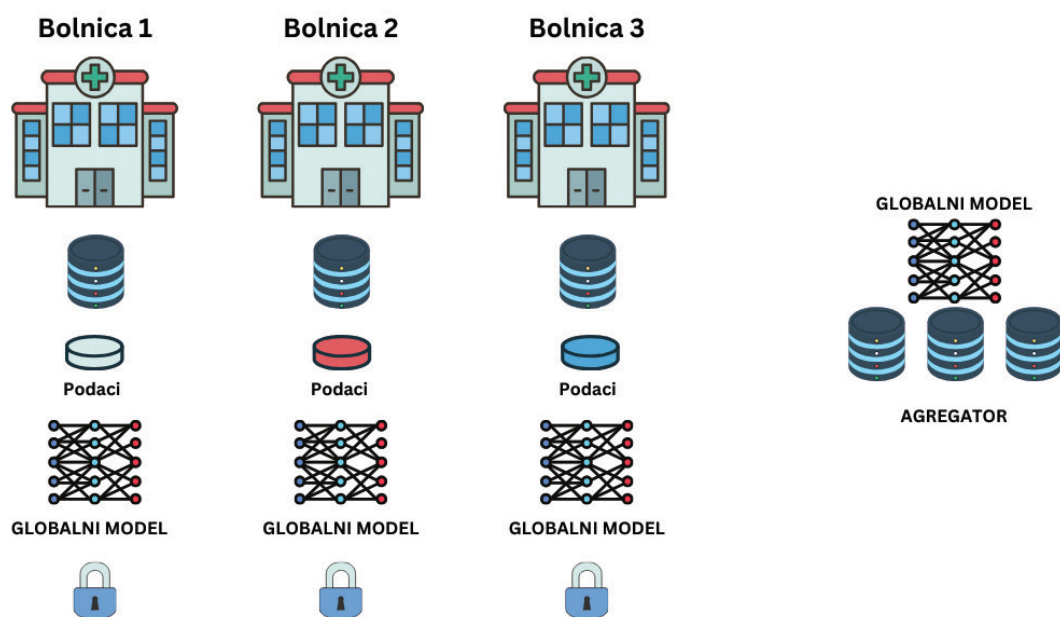
Slika 4. Pristrasnost u medicinskim podacima

Navedeni primjer gdje umjesto detekcije kovid pacijenta algoritam detektuje da li je pacijent dijete ili odrasla osoba spada u domen pristrasnosti u izboru uzorka. Ovo znači da je kreiranje AI modela za detekciju kovid pacijenata moguće realizovati ukoliko bi kreirali skup podataka koji za ne kovid pacijente sadrži ne samo djecu, već i ostalu populaciju. Za razliku od pristrasnosti u izboru uzorka koju možemo direktno da eliminišemo, za pristrasnost prouzrokovanu od strane medicinskih aparata to nije moguće. Ipak, moguće je na indirektan način uticati na smanjenje posljedica ove pristrasnosti. Jedan od takvih primjera je studija koja je rađena za pulsni oksimetar, uređaj koji je imao široku primjenu u trijaži kovid pacijenata. Ova studija [28] je pokazala da pomenuti uređaj posjeduje rasnu pristrasnost, tj. da se ljudima tamne puti tri puta češće ne otkrije hipoksemija nego ljudima svijetle puti. Na ovaj vid pristrasnosti je moguće indirektno uticati i zahtijevati dodatne analize za tamnolute pacijente.

3.1. Perspektive u primjeni vještačke inteligencije u medicini

AI tehnologija pokazuje izvrsne rezultate u svim onim oblastima gdje postoji dovoljna količina podataka, koji se mogu koristiti za kreiranje AI modela. Nažalost, medicina nije jedna od tih oblasti. U medicini postoje objektivne prepreke u kreiranju velikih setova podataka koje se ogledaju u zakonskoj regulativi o pristupu medicinskim podacima. Medicinski podaci su sa stanovišta privatnosti vrlo osjetljivi podaci i oni su isključivo vlasništvo pacijenta. Prema tome bilo koja studija koja treba da uključuje pristup i rad sa medicinskim podacima mora da prođe zahtjevnu proceduru odobrenja od strane Etičkog odbora. Sve ove procedure otežavaju razvoj i primjenu AI tehnologije u medicini. Prema tome naučnici smatraju da se perspektiva u ovoj oblasti ogleda u demokratizaciji pristupu medicinskim podacima [29]. Trenutno, usljed zahtjevnih procedura za dijeljenje medicinskih podataka između institucija, razvoj AI modela je rezervisan za veće medicinske centre koji su prepoznali važnost AI tehnologije formirajući istraživačke centre. Mana ovakvog pristupa se ogleda u nemogućnosti razvoja AI modela koji se karakterišu dobrom generalizacijom, tj. mogućnošću primjene AI modela u druge zdravstvene ustanove. Izvor problema ogleda se u činjenici da se medicinski podaci značajno razlikuju između zdravstvenih ustanova. Iz tog razloga su naučnici kreirali nove načine za obuku AI modela, koji ne uključuju dijeljenje podataka između zdravstvenih ustanova. Ovaj pristup se naziva federated learning [30] i on omogućava da se AI model dijeli između ustanova i na taj način obezbijedi sakupljanje potrebnog znanja (Slike 5.). Budućnost u primjeni AI tehnologije u medicini takođe se ogleda u razvoju multi modalnih sistema [31], koji će kombinovati različite tipove podataka (slikovne, tekstualne itd.) za obuku AI modela.

Federated learning



Slika 5. Federated learning

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljeno je stanje, izazovi i perspektiva u primjeni AI tehnologije u medicini. AI tehnologija, čiji se razvoj može pratiti od pedesetih godina 20. vijeka, svoju popularizaciju doživljava 2022. nakon lansiranja ChatGPT platforme. Studije pokazuju da AI nalazi primjenu u svim područjima medicine, od dijagnostike i liječenja do prevencije bolesti. Međutim, način na koji AI oblikuje medicinsku praksu najbolje se može vidjeti na primjeru radiologije. AI u ovoj grani medicine nalazi primjenu od postupka akvizicije pa sve do postupka arhiviranja radioloških snimaka. Glavni izazovi u kreiranju AI modela ogleda se u problemu pristrasnosti u skupovima podataka. Dodatno, zakonska regulativa o zaštiti privatnosti kod medicinskih podataka dodatno otežava razvoj i primjenu AI tehnologije u medicini. Pored opisanih nedostataka u primjeni AI, budućnost ove tehnologije nije upitna prije svega jer naučnici kontinuirano rade na prevazilaženju ključnih izazova. Na kraju se može zaključiti da smo još uvijek relativno daleko od scenarija gdje će AI tehnologija zamijeniti medicinski kadar. Međutim, moramo naglasiti da težnja naučnika nije da kreiraju sisteme koji mogu zamijeniti medicinski kadar, već sisteme koji će medicinskom kadru služiti kao pomoćno sredstvo u obavljanju kliničke prakse!

LITERATURA

1. M. Vidaković, "Industrijska revolucija i tržište," Sveučilište Jurja Dobrile u Puli Fakultet ekonomije i turizma, Pula, 2020. [Online]. Available: <https://repozitorij.unipu.hr/islandora/object/unipu%3A6516/datastream/PDF/view>
2. CDM, "Riječ godine prema Kolinovom rječniku je – AI (vještačka inteligencija)," Cafe del montenegro. [Online]. Available: <https://www.cdm.me/zabava/zanimljivosti/rijec-godine-prema-kolinovom-rjecniku-je-ai-vjestacka-inteligencija/>
3. OpenAI, "ChatGPT," ChatGPT. [Online]. Available: <https://openai.com/chatgpt/>
4. AIPRM, "100+ ChatGPT Statistics 2024," AIPRM. [Online]. Available: <https://www.aiprm.com/chatgpt-statistics/>

5. M. Haenlein and A. Kaplan, "A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 61, no. 4, pp. 5–14, Aug. 2019, doi: 10.1177/0008125619864925.
6. P. Liu, L. Lu, J. Zhang, T. Huo, S. Liu, and Z. Ye, "Application of Artificial Intelligence in Medicine: An Overview," *Curr. Med. Sci.*, vol. 41, no. 6, pp. 1105–1115, Dec. 2021, doi: 10.1007/s11596-021-2474-3.
7. A. Nawaz *et al.*, "A Comprehensive Literature Review of Application of Artificial Intelligence in Functional Magnetic Resonance Imaging for Disease Diagnosis," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 35, no. 15, pp. 1420–1438, Dec. 2021, doi: 10.1080/08839514.2021.1982185.
8. S. A. Waldman and A. Terzic, "Health Care Evolves From Reactive to Proactive," *Clin. Pharmacol. Ther.*, vol. 105, no. 1, pp. 10–13, Jan. 2019, doi: 10.1002/cpt.1295.
9. C. Mello-Thoms and C. A. B. Mello, "Clinical applications of artificial intelligence in radiology," *Br. J. Radiol.*, vol. 96, no. 1150, p. 20221031, Oct. 2023, doi: 10.1259/bjr.20221031.
10. E. Ranschaert, L. Topff, and O. Pinykh, "Optimization of Radiology Workflow with Artificial Intelligence," *Radiol. Clin. North Am.*, vol. 59, no. 6, pp. 955–966, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.rcl.2021.06.006.
11. Y. Gang *et al.*, "A comparison between manual and artificial intelligence-based automatic positioning in CT imaging for COVID-19 patients," *Eur. Radiol.*, vol. 31, no. 8, pp. 6049–6058, Aug. 2021, doi: 10.1007/s00330-020-07629-4.
12. F. Valeri *et al.*, "UNet and MobileNet CNN-based model observers for CT protocol optimization: comparative performance evaluation by means of phantom CT images," *J. Med. Imaging*, vol. 10, no. S1, Mar. 2023, doi: 10.1117/1.JMI.10.S1.S11904.
13. R. V. Gupta *et al.*, "Complex Relationship Between Artificial Intelligence and CT Radiation Dose," *Acad. Radiol.*, vol. 29, no. 11, pp. 1709–1719, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.acra.2021.10.024.
14. H. Shan *et al.*, "Competitive performance of a modularized deep neural network compared to commercial algorithms for low-dose CT image reconstruction," *Nat. Mach. Intell.*, vol. 1, no. 6, pp. 269–276, Jun. 2019, doi: 10.1038/s42256-019-0057-9.
15. C. Leibig, M. Brehmer, S. Bunk, D. Byng, K. Pinker, and L. Umutlu, "Combining the strengths of radiologists and AI for breast cancer screening: a retrospective analysis," *Lancet Digit. Health*, vol. 4, no. 7, pp. e507–e519, Jul. 2022, doi: 10.1016/S2589-7500(22)00070-X.
16. M. Al-Rababah and A. Al-Marghirani, "Implementation of Novel Medical Image Compression Using Artificial Intelligence," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 7, no. 5, 2016, doi: 10.14569/IJACSA.2016.070544.
17. I. H. Sarker, "Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions," *SN Comput. Sci.*, vol. 2, no. 3, p. 160, May 2021, doi: 10.1007/s42979-021-00592-x.
18. K. Raza and N. K. Singh, "A Tour of Unsupervised Deep Learning for Medical Image Analysis," *Curr. Med. Imaging Former. Curr. Med. Imaging Rev.*, vol. 17, no. 9, pp. 1059–1077, Sep. 2021, doi: 10.2174/1573405617666210127154257.
19. A. Aljuaid and M. Anwar, "Survey of Supervised Learning for Medical Image Processing," *SN Comput. Sci.*, vol. 3, no. 4, p. 292, May 2022, doi: 10.1007/s42979-022-01166-1.
20. S. Azizi *et al.*, "Big Self-Supervised Models Advance Medical Image Classification," Apr. 01, 2021, *arXiv*: arXiv:2101.05224. Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2101.05224>
21. R. Najjar, "Redefining Radiology: A Review of Artificial Intelligence Integration in Medical Imaging," *Diagnostics*, vol. 13, no. 17, p. 2760, Aug. 2023, doi: 10.3390/diagnostics13172760.
22. G. Papanastasiou, N. Dikaios, J. Huang, C. Wang, and G. Yang, "Is Attention all You Need in Medical Image Analysis? A Review," *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, vol. 28, no. 3, pp. 1398–1411, Mar. 2024, doi: 10.1109/JBHI.2023.3348436.
23. J. Irvin *et al.*, "CheXpert: A Large Chest Radiograph Dataset with Uncertainty Labels and

- Expert Comparison," *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, vol. 33, no. 01, pp. 590–597, Jul. 2019, doi: 10.1609/aaai.v33i01.3301590.
24. W. Liu, J. Luo, Y. Yang, W. Wang, J. Deng, and L. Yu, "Automatic lung segmentation in chest X-ray images using improved U-Net," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, p. 8649, May 2022, doi: 10.1038/s41598-022-12743-y.
25. D. Budagam *et al.*, "Instance Segmentation and Teeth Classification in Panoramic X-rays," Jun. 06, 2024, *arXiv*: arXiv:2406.03747. Accessed: Sep. 22, 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.03747>
26. R. Yang and Y. Yu, "Artificial Convolutional Neural Network in Object Detection and Semantic Segmentation for Medical Imaging Analysis," *Front. Oncol.*, vol. 11, p. 638182, Mar. 2021, doi: 10.3389/fonc.2021.638182.
27. W. Heaven Douglas, "Hundreds of AI tools have been built to catch covid. None of them helped." [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/2021/07/30/1030329/machine-learning-ai-failed-covid-hospital-diagnosis-pandemic/>
28. M. W. Sjoding, R. P. Dickson, T. J. Iwashyna, S. E. Gay, and T. S. Valley, "Racial Bias in Pulse Oximetry Measurement," *N. Engl. J. Med.*, vol. 383, no. 25, pp. 2477–2478, Dec. 2020, doi: 10.1056/NEJMc2029240.
29. Stanford, "The Democratization of Health Care," 2018. [Online]. Available: <https://med.stanford.edu/content/dam/sm/school/documents/Health-Trends-Report/Stanford-Medicine-Health-Trends-Report-2018.pdf>
30. P. Dhade and P. Shirke, "Federated Learning for Healthcare: A Comprehensive Review," in *RAiSE-2023*, MDPI, Feb. 2024, p. 230. doi: 10.3390/engproc2023059230.
31. J. N. Acosta, G. J. Falcone, P. Rajpurkar, and E. J. Topol, "Multimodal biomedical AI," *Nat. Med.*, vol. 28, no. 9, pp. 1773–1784, Sep. 2022, doi: 10.1038/s41591-022-01981-2.

ENERGETSKO-KOMUNIKACIONA REDUNDANSA DATA CENTARA NOVE GENERACIJE

Ivan Vujović, Željko Đurišić

Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu

Vladan Durković

Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet Crne Gore

KRATAK SADRŽAJ

U objektima velikih data centara (DC-a) postoji mnoštvo različitih sistema čija je osnovna uloga obezbjeđivanje neprekidne funkcionalnosti definisanih servisa i usluga. Standardi kojima se kategoriju DC-i bazirani su na kriterijumima vezanim za neke ili sve oblasti koje uključuju: elektroenergetske sisteme, sisteme hlađenja i ventilacije, telekomunikacionu i informacionu infrastrukturu i sisteme zaštite. Jedan od najvažnijih uslova realizacije DC-a najvećeg nivoa je postizanje potpune redundanse u svim oblastima od interesa za ovakvom vrstom pouzdanosti.

U radu će biti predstavljen koncept redundatnog napajanja objekta DC-a od nivoa proizvodnje pa do krajnjih potrošača. Sistem hlađenja i ventilacije podrazumijeva održavanje ambijentalnih uslova unutar objekta DC-a, kao i upotrebu skladišta ohlađenog fluida koji cirkuliše u sistemu. Prenos informacija unutar DC-a i prema entitetima van objekta kao i obrada, odnosno prikazivanje podataka ostvaruje se upotrebom *information and communication technology* (ICT) sistema. Sistemi fizičke zaštite vrše neprekidno snimanje okoline i unutrašnjosti objekta, ograničavaju mogućnost pristupa objektu i vrše detekciju neovlašćenog pristupa.

Ključne riječi: Data centar, Redundansa, Napajanje, Hlađenje, Komunikacija, Fizička zaštita

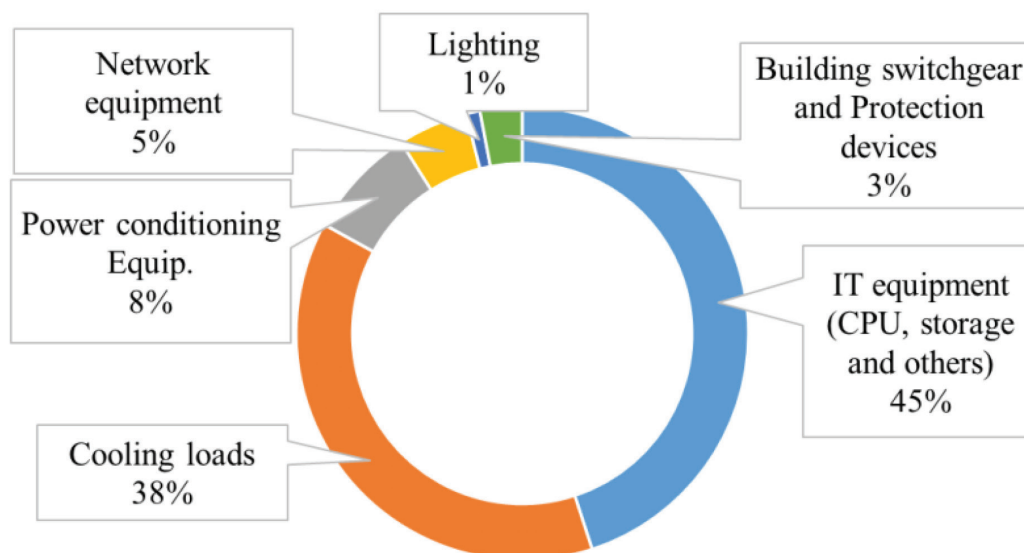
1. UVOD

Razvoj ICT-a kreće se u smjeru centralizacije resursa potrebnih za ostvarivanje mogućnosti pružanja servisa širokom auditorijumu i uređajima koji se nalaze na različitim lokacijama. Sve više korisnika servisa zahtijeva redundansu u pristupu resursima i komunikaciji. Potrebno je realizovati i zahtjevan stepen zaštite informacija, prenosa i upotrebe podataka. Jedan od najvećih izazova je standardizacija svih mjera i postupaka koje je neophodno slijediti kako bi projekat implementacije velikog DC-a mogao biti uspješno završen. Veličina DC-a se obično mjeri prema instaliranoj snazi potrebnoj za napajanje objekta, broju servera i prema površini namijenjenoj za smještanje

rekova i opreme unutar objekta [1], [2]. U ovom radu, razmatraćemo slučaj kada je:

- Instalirana snaga DC-a: 100 MW,
- Instalirana snaga po reku: 25 kW,
- Broj instaliranih servera: 6.000,
- Površina objekta: 12.000 m².

Raspodjela opterećenja DC-a je takva da oko 50% ukupne električne energije koristi ICT opremu, kao što je prikazano na slici 1 [3]. Tada je ukupan broj rekova u ovom DC-u jednak 2.000. Pod pretpostavkom da je za svaki rek potrebno 3 m² za postavljanje i pristup, što je ukupno 6.000 m², i još toliko površine za smještanje uređaja i opreme van rekova, te ostavljanje koridora i prolaza, dobija se predviđenih 12.000 m².



Slika 1. Tipična procentualna raspodjela utrošene električne energije po sistemima DC-a [3]

Napajanje velikih DC-a treba biti ostvareno isključivo iz obnovljivih i ekološki prihvatljivih izvora električne energije. Kako bi se efikasno iskoristila električna energija, poželjno je vršiti stalnu kontrolu i obezbijediti uštede u svim sistemima DC-a. Mjerila efikasnosti u dizajnu, održavanju, kontroli i uštedi električne energije DC-a definisana su na različite načine. Najčešće korišćeni izrazi za izračunavanje efikasnosti upotrebe električne energije dati su u [4].

Sistem čija je uloga obezbjeđivanje adekvatnih ambijentalnih uslova (temperature i vlažnosti vazduha) u prostorijama DC-a je *heating ventilation and air conditioning* (HVAC). Posebno u ljetnjim mjesecima, kada je temperatura okoline značajno veća od ambijentalne temperature unutar prostorija DC-a, HVAC zahtijeva velike količine električne energije. Ušteda električne energije se postiže, prije svega, upotrebom neke druge vrste energije (obično termičke). Metodologija izračunavanja energetske efikasnosti ovih sistema data je u [5].

Dizajn ICT infrastrukture treba da obezbijedi brz i efikasan prenos, obradu i prikazivanje informacija unutar DC i prema drugim entitetima. Osnova za obezbjeđivanje ovih uslova je potpuno optička infrastruktura na kojoj je bazirana računarska mreža objekta [6]. Veliki DC-i koriste *cloud* tehnologije pa je potrebno obezbijediti efikasno korišćenje električne energije u ovakvom okruženju [7]. Svaki veliki DC treba da ima sistem za monitoring i upravljanje koji će biti realizovan nezavisno od drugih sistema, ali povezan sa njima. Takav sistem treba da omogući prikazivanje vrijednosti karakterističnih parametara svih sistema DC-a u realnom vremenu, obradu podataka i izvršenje potrebnih komandi zavisno od rezultata obrade podataka.

Fizička zaštita objekta DC-a, odnosno sistemi: video nadzora, kontrole pristupa i dojave pokušaja neovlašćenog ulaska u objekat obezbjeđuju: vizuelno praćenje stanja u okolini i unutrašnjosti objekta u realnom vremenu i skladištenje snimaka u trajanju definisanom stepenom sigurnosti,

kontrolu osoba koje pristupaju objektu i sprečavanje neovlašćenog ulaska u prostorije objekta, rukovanja opremom, preuzimanje podataka, mijenjanje podataka i slično. Fizička zaštita obuhvaća više sistema i više nivoa zaštite [8].

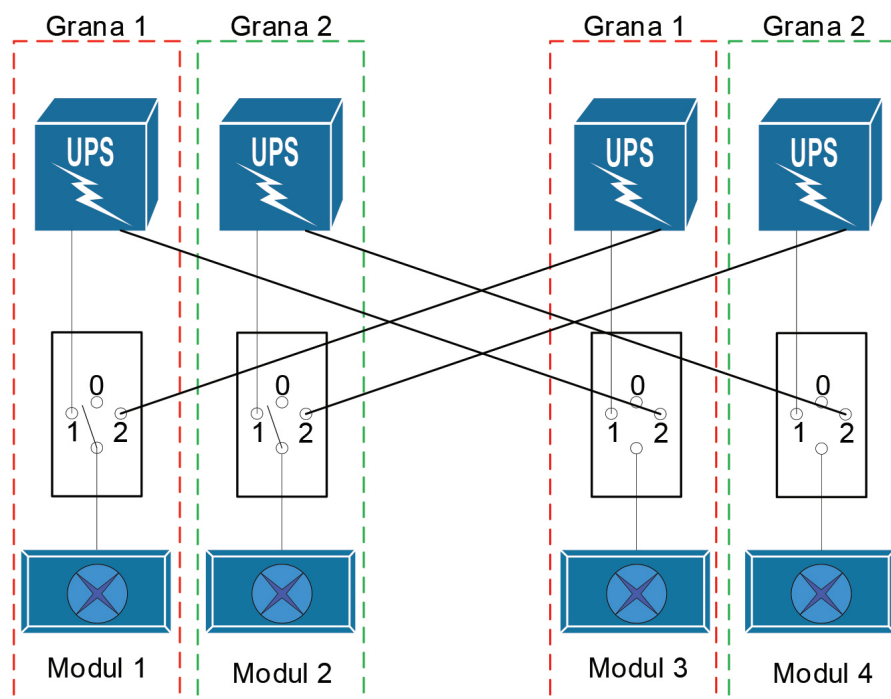
U radu će biti prikazani predlozi rješenja onih dijelova navedenih sistema koji nisu uopšte ili nisu jasno definisani standardima i preporukama. Rad se ne odnosi na sisteme dojava požara i softverske zaštite ICT opreme.

Glava dva odnosi se na sistem napajanja DC-a od 400 kV do 0,4 kV nivoa tj. od dva nezavisna prstena elektroenergetskog sistema (EES-a) do krajnjih uređaja u rekovima. Navedeno je i kakve izvore i na kojim mjestima u sistemu je potrebno obezbijediti za snabdijevanje DC-a električnom energijom. U trećem dijelu rada opisan je način akumulacije toplotne energije tj. rashladnog fluida i iskorišćenje toplog vazduha koji se odvodi iz prostorija DC-a. Hardverske i komunikacione komponente ICT sistema opisane su u glavi 4. Glava 5 odnosi se na sisteme fizičke sigurnosti DC-a. Na kraju rada dat je zaključak i viđenje budućih smjerova i trendova u razvoju infrastrukture DC-a.

2. NAPAJSANJE DATA CENTRA

Sistem napajanja objekta DC-a dizajnira se u zavisnosti od nivoa pouzdanosti koji treba biti postignut. Razni međunarodni standardi i dokumenti, u većoj ili manjoj mjeri, definišu kako treba da funkcioniše ovaj sistem [9] - [13]. Najveći naponski nivo do kog je standardima za DC-e definisana redundansa u napajanju je 10 kV. Savremeni, veliki DC-i, zahtijevaju redundansu sve do nivoa proizvodnje električne energije koja mora biti isključivo iz obnovljivih izvora električne energije [10]. Redundansu je potrebno postići u konfiguraciji 2N+1 ili 2N+2 gdje 2N označava broj grana napajanja. Broj 1, odnosno 2 u izrazima predstavlja broj dodatnih grana napajanja sistema koji se napaja sa 2N napojnih grana. Ako je sistem konfiguracije 2N+1 to znači da pri ispadu jedne grane napajanja sistem nastavlja da funkcioniše sa 2N redundansom. Ako je sistem konfiguracije 2N+2 to znači da pri ispadu dvije grane napajanja sistem nastavlja da funkcioniše sa 2N redundansom. Grana napajanja predstavlja jedinstvenu električnu vezu jednog naponskog nivoa između uređaja koji vrši napajanje i uređaja koji se napaja.

Na naponskom nivou 0,4 kV, unutar DC-a, grane napajanja povezuju AC ili DC napojne module pojedinačnih ICT uređaja i UPS ili ispravljačke sisteme. Hardverski dizajn ICT uređaja treba da

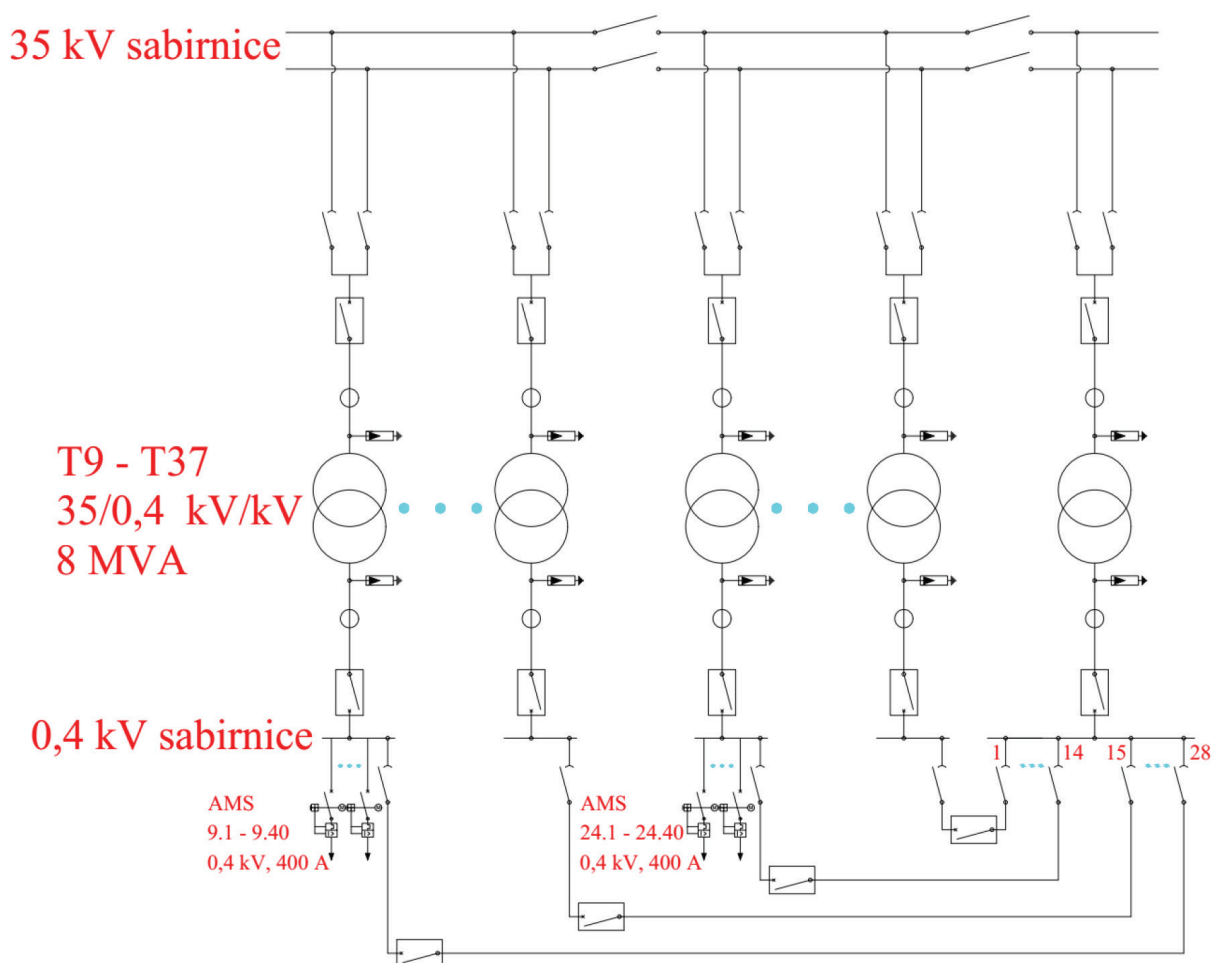


uključuje minimalno dva napojna modula za svaku granu napajanja koji paralelno i redundantno funkcionišu. Moduli pojedinačne grane mogu biti u kombinacijama: AC+AC, DC+DC, AC+DC. Za prve dvije kombinacije je potrebno da napajanje bude realizovano sa različitih UPS-eva, odnosno ispravljačkih sistema. Na slici 2 prikazan je predlog dizajna napajanja jednog ICT uređaja sa četiri AC modula u konfiguraciji 2+2.

Slika 2. Predlog dizajna napajanja jednog ICT uređaja

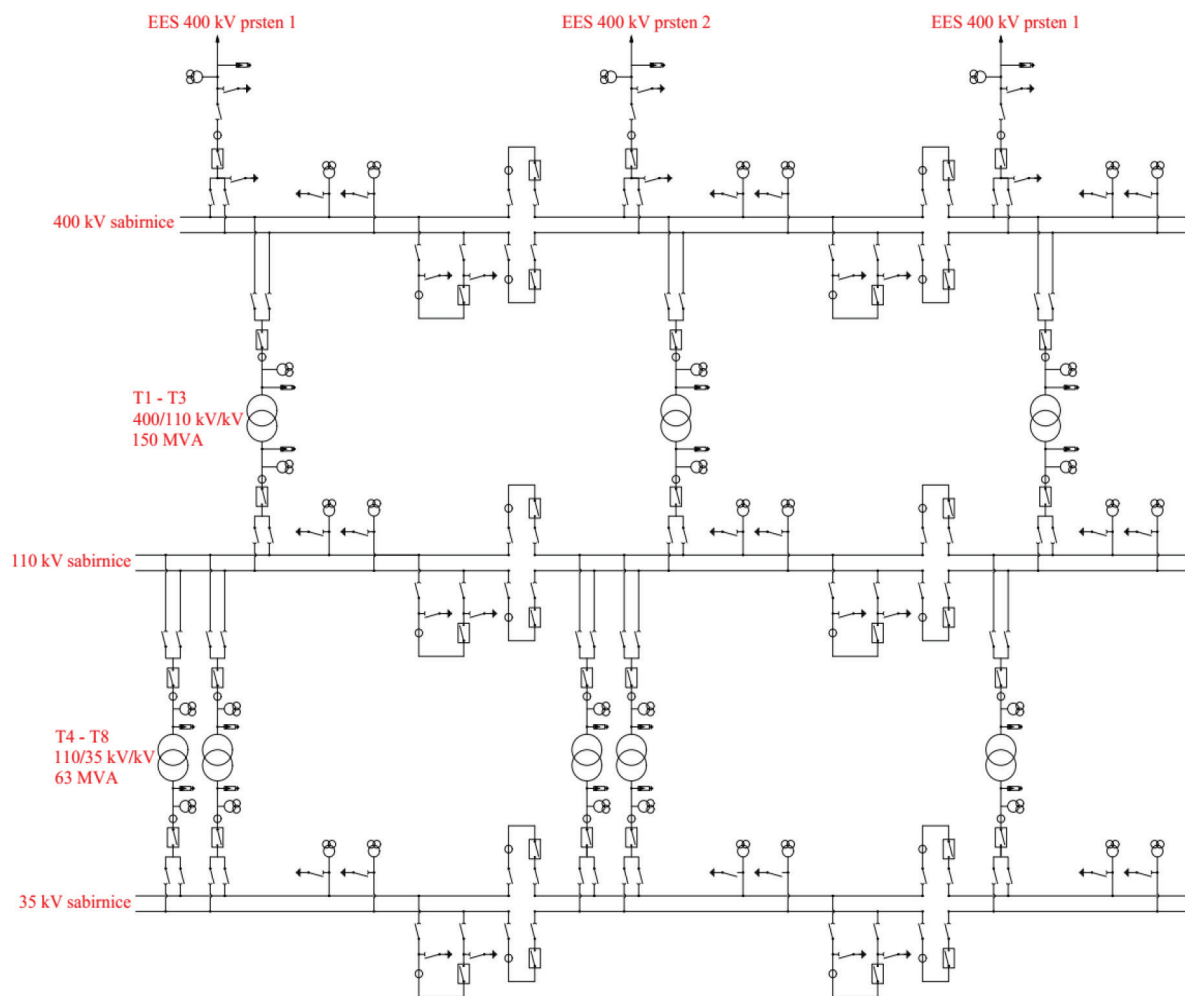
Osim pomenute redundanse u napajanju, postoji i redundansa u vidu baterijskih kapaciteta. Ako se desi takva situacija da uopšte ne funkcioniše napajanje DC-a iz EES-a, baterije UPS-eva i ispravljača treba da obezbijede neprekidni nastavak napajanja ICT uređaja u trajanju najmanje onoliko vremena koliko je potrebno da posljednji vid redundanse bude na raspolaganju za napajanje DC-a. Kada situacija ide u prilog tome da baterijski kapaciteti neće moći obezbijediti napajanje DC-a do ponovnog uspostavljanja napajanja iz EES-a, proizvodnja električne energije jednog stalnog izvora se preusmjerava samo za snabdijevanje DC-a.

Slika 3 [14] prikazuje predlog dizajna dijela napajanja DC-a instalisane snage 100 MVA od naponskog nivoa 0,4 kV do naponskog nivoa 35 kV. Ovo rješenje je 2N+1 konfiguracija tj. na svakom naponskom nivou elektroenergetskog postrojenja, za sve elemente svih 2N napojnih grana specificirane funkcije (ulazni prekidači i rastavljači, transformatori, izlazni prekidači i rastavljači itd.), postoji jedan redundantni element koji u normalnom uklopnom stanju ne služi za napajanje DC-a.



Slika 3. Predlog dizajna napajanja DC-a od naponskih nivoa od 0,4 kV do 35 kV [14]

Na slici 4 prikazan je predlog dizajna redundantne šeme napajanja DC-a instalisane snage 100 MVA od 35 kV do 400 kV nivoa dva nezavisna prstena EES-a [14]. Rješenje je takođe 2N+1 konfiguracije, ali je, za razliku od rješenja datog u [14], ovdje predviđeno da napojne grane koje na 400 kV nivou sadrže transformatore T1 i T2 budu redundantne i na nivou prstena EES-a tj. da grana 1 bude povezana na prsten 1, a grana 2 na prsten 2. Napojna grana koja sadrži transformator T3 bila bi povezana ili na prsten 1 ili na prsten 2 zavisno od instalisane snage, odnosno dostupnosti električne energije, izvora koji su povezani na ova dva prstena. Transformator T3 bio bi povezan na onaj prsten EES-a na koji su povezani izvori električne energije koji generišu veću snagu i proizvode električnu energiju u dužem vremenskom periodu bez prekida.



Slika 4. Predlog dizajna napajanja DC-a naponskih nivoa od 35 kV do 400 kV [14]

Poželjno je da svi elementi sistema napajanja kod kojih je moguće realizovati takvu konfiguraciju, budu modularnog tipa i da je moguća zamjena nefunkcionalnog elementa (modula) bez prekidanja napajanja u toj napojnoj grani. Time se ostvaruje veća dostupnost i pouzdanost napajanja, pojednostavljuje proces i smanjuje vrijeme zamjene neispravnog modula.

Na EES se povezuju različiti izvori električne energije, ali svi koji će biti korišćeni za napajanje DC-a moraju biti obnovljivi ili ekološki prihvatljivi. Vlasnik/ci DC-a mogu biti vlasnici i dijela ili svih izvora koji su predviđeni za snabdijevanje DC-a električnom energijom. Ukupna instalisana snaga svih izvora treba biti tako dimenzionisana da na nivou godine generišu približno istu količinu električne energije koju utroši DC ili da cijena proizvedene električne energije iz izvora i utrošene električne energiju DC-a budu približno iste. Poželjno je da makar jedan izvor električne energije bude dostupan samo za napajanje DC-a u slučaju kada svi drugi izvori i čitav EES ne budu dostupni, a baterijski kapaciteti samog DC-a budu pri kraju mogućnosti snabdijevanja opreme električnom energijom. Takav izvor u normalnom radu predaje električnu energiju EES-u, a u slučaju potrebe ostrvski napaja DC električnom energijom. Da bi tako nešto bilo moguće koriste se izvori koji imaju akumulaciju energije kao što su: elektrane na prirodni ili deponijski gas, elektrane na biomasu, akumulacione hidroelektrane itd. Zbog omogućavanja jednostavne manipulacije rasklopnom opremom u okviru EES-a radi postizanja uklopnog stanja ostrvskog napajanja DC-a električnom energijom, ovakve elektrane se izgrađuju što je moguće bliže lokaciji DC-a.

3. KLIMATIZACIJA I VENTILACIJA U DATA CENTRU

Implementacija nekog od predloženih rješenja HVAC sistema opisanih u [15] treba biti tako realizovana da se postigne 2N+2 konfiguracija u objektu DC-a i 2N+1 konfiguracija dijela sistema koji je postavljen izvan samog objekta. Koliko je moguće, elementi sistema trebaju biti modularni. Poželjno je da rješenje bude takvo da u polovini grana HVAC sistema (N grana) fluid za rashlađivanje bude drugačiji od onog u drugoj polovini grana, čime se postiže dodatna redundansa. Unutar DC-a, zavisno od prosječne instalisane snage uređaja u jednom reku, mogu biti implementirani različiti HVAC sistemi koji imaju ulogu rashlađivanja: prostorije, reda rekova, reka ili pojedinačnih uređaja u reku [16].

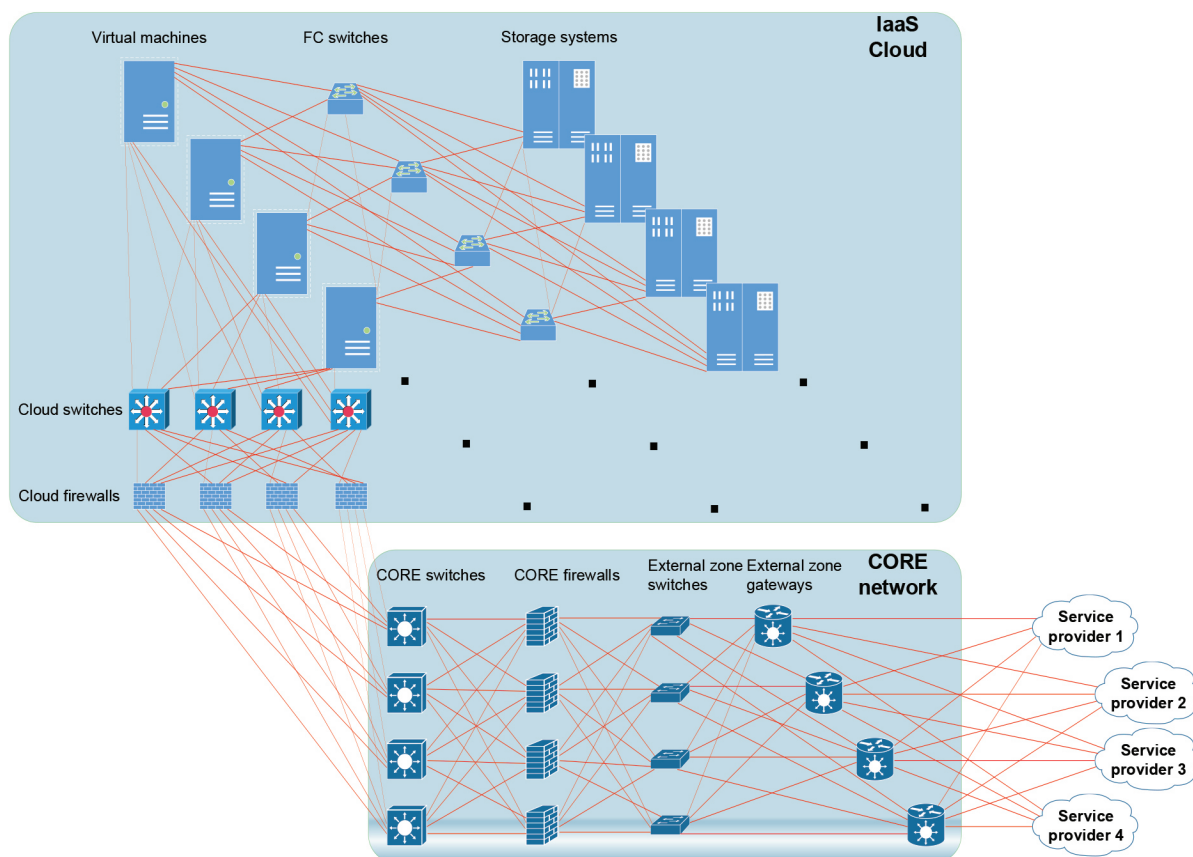
Kako bi HVAC sistem efikasnije i ekonomičnije funkcionisao poželjno ga je dizajnirati tako da budu upotrijebljeni posredni resursi. Iskorišćenje atmosferskih prilika u okolini DC-a ostvaruje se kroz implementaciju *free cooling* sistema. Realizacija ovakvih sistema u objektu DC-a može biti ostvarena na nekoliko načina [17], [18]. Upotreba skladišta ohlađenog fluida podrazumijeva postavljanje više manjih prenosnih sistema za skladištenje vazduha [19] ili jednog velikog skladišta vode koje se nalazi ispod površine zemlje [20], [21]. Pored velikih podzemnih skladišta ohlađene vode, izgrađuju se i velika skladišta zagrijane vode pod uticajem odstranjene toplote koja potiče od disipacije uređaja u DC-u i kroz poseban sistem se odvodi iz objekta. Ova zagrijana voda se može koristiti, u zimskom periodu, za grijanje samog objekta DC-a ili drugih objekata koji se nalaze u blizini, u industrijskim procesima, početnom zagrijavanju vazduha u tehnološkim procesima unutar elektrana na gas, deponijski gas ili biomasu. U periodu godine kada je spoljašnja temperatura manja od ambijentalne temperature (21 °C), za hlađenje DC-a se dominantno koristi *free cooling* sistem. Dodatna električna energija upotrebljava se za hlađenje fluida koji se distribuira u skladišta. Kada je spoljašnja temperatura iznad ambijentalne temperature, za hlađenje DC-a se dominantno koristi ohlađeni fluid iz skladišta, dok se odstranjena toplota tj. zagrijani fluid distribuira u skladište tople vode. Vrijednost relativne vlažnosti vazduha u DC-u treba uvijek biti u granicama 55% ± 5% što se postiže upotrebom ovlaživača/odvlaživača vazduha.

4. SISTEMI ICT U DATA CENTRU

Veliki DC-i podrazumijevaju korišćenje isključivo optičke komunikacije u *cloud* okruženju. Jedan od razloga je potreba za velikim brzinama, praktično u svakom segmentu, a drugi otpornost na elektromagnetne uticaje. Komunikacija ka spoljašnjim entitetima treba biti omogućena sa velikim brzinama i na velikim daljinama. Jedini medijum za prenos informacija koji ispunjava ove zahtjeve je optički kabal. Potrebno je dizajnirati dva hardverski i softverski odvojena ICT rješenja. Prvo se odnosi na servisnu ICT, a drugo na ICT za nadzor i upravljanje.

U praksi se koriste različita rješenja servisne računarske mreže DC-a tj. DC *network* (DCN) [22]. U hardverskom smislu, svaka topologija koja omogućava 2N+2 putanje za prenos informacija unutar DC-a, odnosno 2N+1 putanje za prenos informacija između DC-a i spoljašnjih entiteta je prihvatljiva, a koja će topologija konkretno biti odabrana zavisi od namjene i načina realizacije ICT servisa koje DC pruža. Na slici 5 prikazan je predlog rješenja servisne ICT infrastrukture u 2+2 konfiguraciji. Unutrašnja optička infrastruktura treba biti realizovana upotrebom optičkih kablova sa *single mode* (SM) vlaknima pri čemu trasa svake konekcije do svakog uređaja treba biti fizički nezavisna od ostalih trasa (u ovom slučaju od ostalih 3). Veze sa spoljašnjim entitetima trebaju biti realizovane nezavisnim optičkim trasama u 2+1 konfiguraciji. Po mogućnosti, treba koristi različite načine postavljanja optičkih kablova (u zemlji ili vazdušno).

Osim redundanse na nivou mreže, potrebno je da najbitniji hardverski elementi svakog entiteta *cloud*-a budu redundantni u konfiguraciji 2N+2. Ovo se, prije svega, odnosi na servere (*nodes*) i *storage* sisteme, odnosno procesore, RAM module i diskove tj. *redundant array of independent disks* (RAID) u njima.

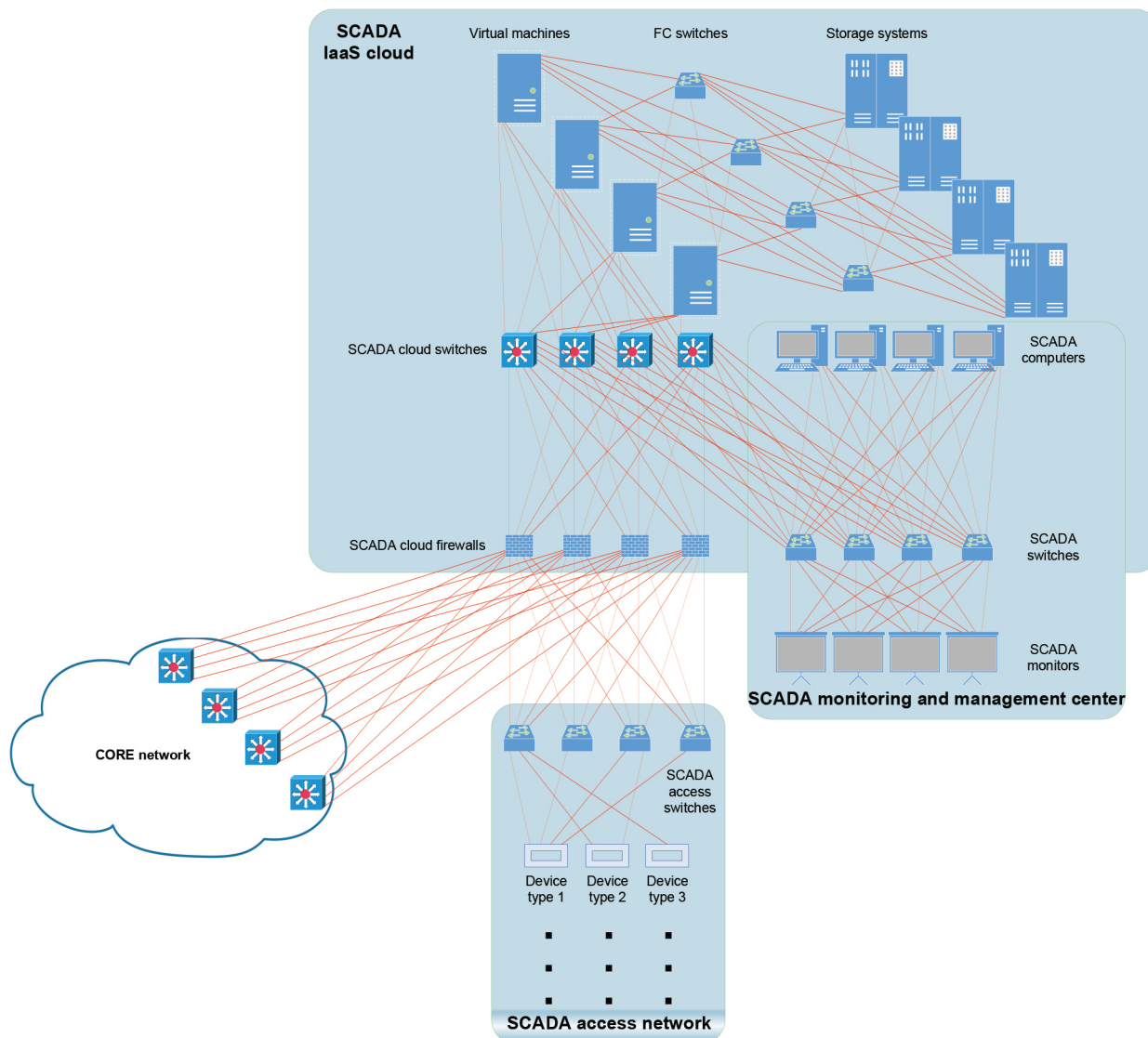


Slika 5. Predlog dizajna servisne ICT infrastrukture data centra

Za nadzor i upravljanje svim sistemima i pojedinačnim uređajima u sklopu DC-a, izuzev ICT opreme, neophodna je implementacija jednog ili više Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) sistema. Dizajn SCADA-e u *cloud* okruženju objedinjava više komponenti [23]. Na slici 6 prikazan je predlog rješenja ICT infrastrukture za nadzor i upravljanje tj. SCADA sistema u konfiguraciji 2+2. Tipovi uređaja razlikuju se po tome koliko konekcija imaju sa SCADA sistemom. Kada je uređaj od velike važnosti za rad ICT opreme DC-a (veliki UPS ili ispravljački sistem, čiler, unutrašnja HVAC jedinica i td.) potrebno je da ima minimalno 2+2 optičkih veza sa mrežom SCADA-e (Device type 1). Uređaji čiji rad nije direktno vezan za ICT opremu, ali su važni za funkcionisanje DC-a (sigurnosni sistemi, motorni pogoni i td.) povezuju se preko 1+1 optičkih veza sa mrežom SCADA (Device type 2). U slučaju pasivnih uređaja (napojne letve u rekovima, automatske sklopke itd.) dovoljna je jedna optička veza sa mrežom SCADA.

5. FIZIČKA ZAŠTITA DATA CENTRA

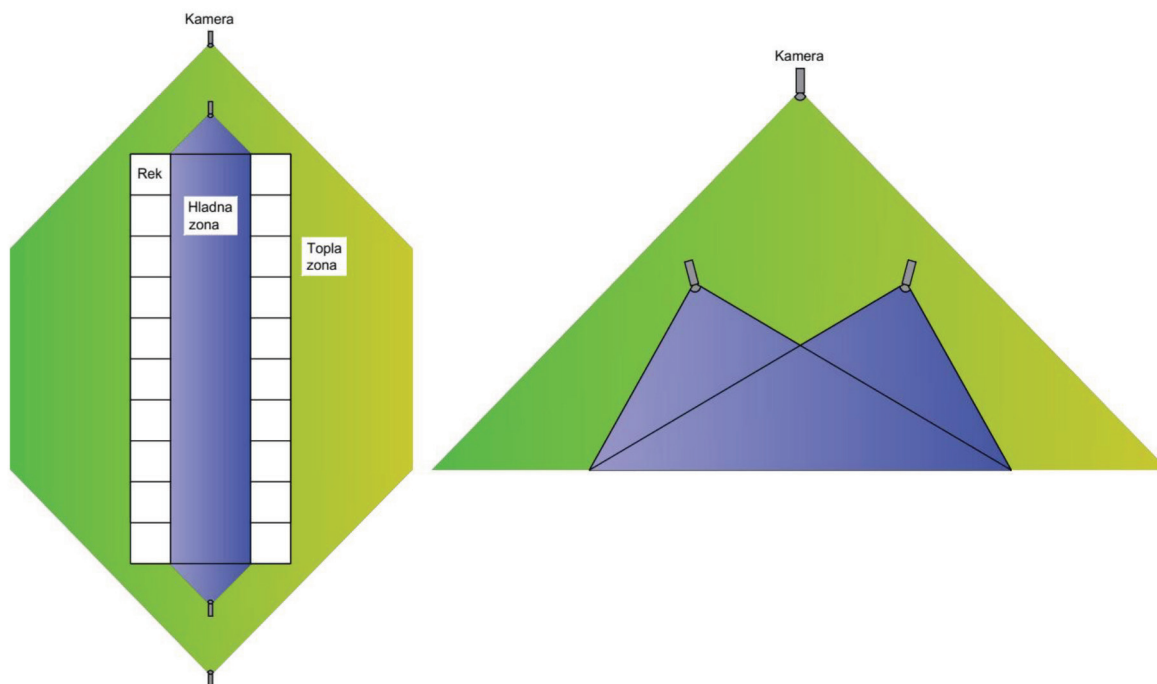
Kako bi oprema i sistemi u DC-u, kao i sam objekat DC-a bili adekvatno fizički zaštićeni, neophodno je, prije svega, pridržavati se opštih standarda i propisa fizičke bezbjednosti objekata [24]. Kao i u svim prethodno opisanim sistemima, potrebno je postići 2N+2 redundansu unutar objekta i 2N+1 redundansu van objekta. U ovom radu zastupljena su tri sistema fizičke zaštite objekta: video nadzor, kontrola pristupa i protiv provalni sistem. Sistem dojava i gašenja požara zahtijeva niz mjera i radnji koje moraju biti ispunjene za svaki konkretni slučaj (objekat) posebno i nije tema ovog rada.



Slika 6. Predlog dizajna SCADA sistema data centra

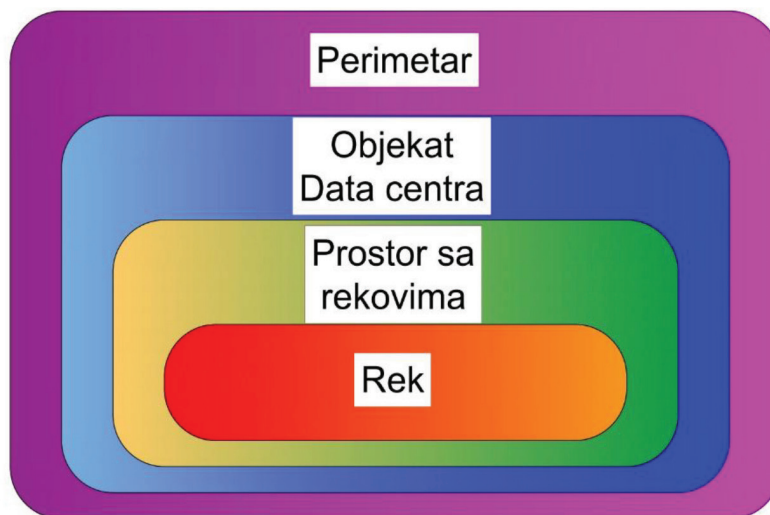
Za sistem video nadzora u unutrašnjosti objekta, u svakoj prostoriji ili dijelu prostorije (hladna zona između dva reda rekova), potrebno je obezbijediti pokrivenost cijelog prostora iz $2N$ različitih uglova (sa različitih kamera), a u slučaju nefunkcionalnosti nekog prikaza, snimanje sa redundantne kamere za svaku od N grana. Na slici 7 lijevo prikazana je unutrašnja $2+2$ konfiguracija sistema video nadzora. Van objekta DC-a potrebno je obezbijediti pokrivenost prostora sa $2N$ različitih kamera, a u slučaju nefunkcionalnosti nekog prikaza, jednu redundantnu kameru za $2N$ grana. Na slici 7 desno prikazana je $2+1$ spoljašnja konfiguracija.

Sa stanovišta fizičkog pristupa DC-u definisana su četiri nivoa kao što je prikazano na slici 8 [25]. Osiguranje redundanse u sistemu kontrole pristupa može se ostvariti kombinacijom kategorija identifikacije. Upotrebom lozinke (ono što znaš) i identifikacione kartice (ono što imaš) ili *postal index number* (PIN) koda (ono što znaš) i tokena (ono što imaš) i prepoznavanjem lica (ono što si na osnovu nasljeđa). Time je postignuta $2N+1$ ($2+1$) konfiguracija za prolazak perimetra. Za identifikaciju prilikom ulaska u sam objekat DC-a koriste se kombinacije: lozinka i identifikaciona kartica koji su različiti od onih koji se koriste za prolazak perimetra ili PIN kod i token kartica koji su različiti od onih koji se koriste za prolazak perimetra, kao i čitač otiska prsta (ono što si na osnovu nasljeđa), odnosno skeniranje rožnjače (ono što si na osnovu nasljeđa) kao dodatne kategorije [26]. Ovo je $2N+2$ ($2+2$) konfiguracija za pristup objektu DC-a.



Slika 7. Sistem video nadzora data centra u konfiguraciji 2+2 (lijevo) i 2+1 (desno)

Zavisno od dodijeljenih prava pristupa prostorijama unutar objekta DC-a (tehničke prostorije, servisne prostorije, prostor sa rekovima itd.) dodjeljuju se i različiti nivoi identifikacije. Za prostor sa rekovima potrebno je obezbijediti takođe 2N+2 (2+2) redundansu. Osim lozinke i identifikacione kartice, odnosno PIN coda i tokena koji se razlikuju od prethodno navedenih, koriste se i sistemi za prepoznavanje glasa (ono što si na osnovu bioloških osobina), odnosno senzori otkucaja srca (ono što si na osnovu bioloških osobina). Kategorije identifikacije pristupa uređajima u reku zavise od konkretne namjene tih uređaja i mogu biti različitih nivoa i to od ključa za otključavanje brave na reku pa do biometrijskih metoda.



Slika 8. Nivoi fizičkog pristupa data centru [25].

U nekim slučajevima, pristup uređajima u jednom ili više rekovima (zasebna cjelina) može biti odobren samo ako dva lica, u isto vrijeme tj. veoma kratkom vremenskom periodu, unesu lozinke, odnosno PIN kodove, zatim u isto vrijeme prinesu identifikacione kartice, odnosno tokene čitačima, a na kraju, opet u isto vrijeme, pristupe biometrijskim očitavanjima. Svakom od lica poznati

su i dostupni samo njegovi podaci, odnosno identifikaciona sredstva. Svaki pristup ili pokušaj pristupa bilo kom dijelu DC-a ili okoline objekta evidentira se putem logova, analizira u relanom vremenu i smješta u bazama podataka.

Protivprovalni sistem omogućava detekciju pokušaja neovlašćenog pristupa okolini objekta ili samom objektu. Sistem treba biti tako dizajniran da potencijalni neovlašćeni pristup bude spriječen od strane obezbjeđenja objekta prije nego što osoba koja pokušava neovlašćeno pristupiti dostigne svoj cilj [27]. Za zaštitu perimetra u konfiguraciji 2N+1 (2+1) koriste se: *passive infrared* (PIR) senzori koji detektuju promjenu temperature u svojoj okolini, senzori seizmičkih aktivnosti ili optički kablovi koji detektuju kretanje na površini i *infrared* (IR) svjetlosne barijere kod kojih se detektuju prekidi svjetlosnog snopa. Za zaštitu unutar objekta DC-a u konfiguraciji 2N+2 (2+2) koriste se: ultrazvučni senzori koji detektuje kretanje u svojoj okolini na osnovu Doplerovog efekta, mikrotalasni senzori koji detektuje promjenu elektromagnetnog polja između predajnika i prijemnika, senzori vibracija koji detektuju određene tipove vibracija (bušilice, štemalice, brusilice i sličan alat) i senzori zvuka koji detektuju zvučne talase u frekventnog opsegu čovječijeg uha (detektori kretanja, govora, šapata, lomljenja stakla itd.).

Fizičku zaštitu DC-a dodatno efikasnom čini integralno funkcionisanje opisana tri sistema. Jedan od načina komunikacije između pomenutih sistema je sljedeći: Prilazak jedne ili više osoba perimetru DC-a registruju kamere, a snimanje se fokusira na lica osoba. Unosom lozinke i očitavanjem identifikacione kartice, odnosno prepoznavanjem lica, privremeno se prekidaju funkcionalnosti senzora protivprovalnog sistema i to samo u određenom vremenskom periodu i na određenoj putanji. U toku prilaska objektu DC-a, bez prestanka, iz više uglova (sa više kamera) vrši se snimanje kretanja osoba koje su prošle kontrolu perimetra. Po dolasku do ulaza samog objekta DC-a, kada to potvrde snimci sa kamera i početak unosa PIN koda, odnosno očitavanje tokena, aktiviraju se senzori protivprovalnog sistema čije su funkcionalnosti prethodno bile prekinute. Kada se očitaju biometrijski podaci i osobama potvrdi mogućnost ulaska u objekat, kamere unutrašnjeg sistema video nadzora neprekidno snimaju kretanje osoba, a senzori sistema protivprovale su privremeno van funkcije samo na putanji kojom osobe trebaju da se kreću kako bi došle do lokacije kojoj im je odobren pristup. Poslije unosa lozinke ili PIN-a, identifikacije kartice ili tokena te prepoznavanja bioloških osobina osoba za pristup lokaciji, senzori se ponovo aktiviraju. Unutar lokacije je opet prisutno stalno snimanje, a senzori su nefunkcionalni samo na određenom dijelu i određeni vremenski period. Izlazak sa lokacije podrazumijeva isti redosljed koraka, samo u suprotnom smjeru.

6. ZAKLJUČAK

Funkcionalnost velikog DC-a omogućava širok dijapazon ICT servisa različitim klijentima uz visok procenat dostupnosti, pouzdanosti i sigurnosti. Da bi takav nivo servisa mogao biti ispunjen potrebno je obezbijediti visok stepen redundanse. Za sisteme unutar objekta, uključujući i ICT opremu, odgovarajuća konfiguracija je 2N+2 tj. svaki sistem treba biti realizovan sa minimalno 2+2 konfiguracijom. U neposrednoj okolini objekta ili u vezama sa spoljašnjim entitetima, potrebno je obezdijediti 2N+1, odnosno, minimalno 2+1 konfiguraciju.

Sistem napajanja DC-a obuhvata tri cjeline. Prvi dio čine uređaji unutar objekta DC-a koji direktno napajaju ICT sisteme ili uređaje neophodne za funkcionisanje ICT opreme u konfiguraciji 2+2 na naponskom nivou od 0,4 kV. Niskonaponska, srednjenaponska i visokonaponska postrojenja od nivoa 0,4 kV do nivoa 400 kV pripadaju drugom dijelu sistema napajanja. Treću cjelinu čine obnovljivi izvori električne energije i baterijski kapaciteti.

Klimatizacija i ventilacija unutar objekta DC-a podrazumijeva sisteme koji održavaju povoljne (ambijentalne) uslove za rad ICT opreme. I ovaj sistem čine tri cjeline. Unutrašnje jedinice klimatizacije imaju ulogu distribucije ohlađenog ili vazduha iz okoline unutar: prostorije sa rekovi-ma, hladne zone između rekova, reka ili pojedinačnog uređaja. Spoljašnje jedinice omogućavaju

odstranjivanje zagrijanog vazduha iz prostorija DC-a koji nastaje usljed toplotne disipacije ICT ili drugih uređaja. Sistemi za skladištenje ohlađenog i zagrijanog fluida osiguravaju mogućnost korišćenja akumulisane toplotne energije kada se za to ukaže potreba ili kada je to ekonomski isplativo.

Sistemi ICT infrastrukture omogućavaju realizaciju servisa koje nudi DC i nadzor i upravljanje sistemima, odnosno uređajima, čija je uloga obezbjeđivanje adekvatnih uslova za nesmetano i kontinualno funkcionisanje ICT opreme. Ova dva sistema se hardverski i softverski realizuju odvojeno, ali su međusobno povezani na nivou mreže.

Fizička zaštita samog objekta DC-a, odnosno sistema, uređaja i opreme u njemu treba biti realizovana integralno, preko tri sistema: video nadzor, kontrola pristupa i protivprovalni sistem. Sistem video nadzora objekta i okoline DC-a omogućava neprekidno snimanje svakog dijela prostora u visokoj rezoluciji, sa automatskim fokusiranjem na pozicije promjene ambijenta (prilazak osoba, detekcija pokušaja neovlašćenog pristupa itd.). Kontrola pristupa služi za provjeru i evidenciju svakog pristupa objektu DC-a kao cjelini i svim djelovima unutar njega (tehničke prostorije, servisne prostorije, prostorije sa ICT opremom itd.). Pokušaj neovlašćenog pristupa pokreće alarmna stanja, preko protivprovalnog sistema, radi uzbunjivanja osoba koje obezbjeđuju objekat.

Definisanjem preciznih instrukcija i standardizacijom postupaka, odnosno radnji potrebnih za dizajniranje velikih DC-a postiže se značajno povećanje efikasnosti i performansi sistema DC-a, a u isto vrijeme smanjuje vrijeme potrebno za realizaciju projekta. Primjena vještačke inteligencije u vidu algoritama neuralnih mreža omogućava preciznija predviđanja mogućih događaja, a samim tim i preventivne reakcije na promjene stanja. Kako neuralne mreže daju bolje rezultate što je veća baza podataka koju koriste to će povećanje rezolucije mjerenja vrijednosti definisanih parametara sistema omogućiti efikasnije korišćenje resursa. Dodatno povećanje dostupnosti, pouzdanosti i sigurnosti servisa koje nudi DC postiže se izgradnjom i povezivanjem *disaster recovery site* (DRS) koji pruža kontinuitet dijela ili svih servisa u slučaju da primarna lokacija (DC) postane nefunkcionalna.

LITERATURA

1. P.Powell, I. Smalley, "What is a hyperscale data center?"; IBM, march 2024, available on: <https://www.ibm.com/topics/hyperscale-data-center>.
2. M. Zhang, "Data Center power: A comprehensive overview of energy"; Dgtl Infra, march 2024, available on: <https://dgtlinfra.com/data-center-power/>.
3. K. M. U. Ahmed, M. H. J. Bollen, M. Alvarez, "A review of data centers energy consumption and reliability modeling", IEEE Access 2021, vol. 9, pp. 152536–152563, November 2021.
4. X. Jin, F. Zhang, A. V. Vasilakos, Z. Liu, "Green Data Centers: A Survey, Perspectives, and Future Directions", arXiv preprint arXiv:1608.00687, 2016.
5. J. Ni, X. Bai, "A review of air conditioning energy performance in data centers", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 625–640, January 2017.
6. Y. Zhao, et al, "Optical switching data center networks: understanding techniques and challenges", Computer Networks and Communications, vol. 1, Issue 2, pp. 272 – 291, September 2023.
7. A. Katal, S. Dahiya, T. Choudhury, "Energy efficiency in cloud computing data center: a survey on hardware technologies", Cluster Computing, vol. 25, pp. 675–705, October 2021.
8. C. Jones, et al, "Data center physical security guidelines", Open Compute Project Summit, San Jose, California, USA, October 2022.
9. W. P. Turner IV, P. E., J. H. Seader, P. E, K. G. Brill, "Tier classifications define site infrastructure performance", The Uptime institute, 2001.
10. Switch, "Tier 5 platinum data centers: The new standard of excellence", Switch company,

available on: www.switch.com/tier-5/. Accessed: 07.06.2024.

11. ISO/IEC TS 22237-3:2021, "Information technology – Data centre facilities and infrastructures – Part 3: Power distribution", 2021.
12. EN 50600-2-2:2019, "Information technology – Data centre facilities and infrastructures – Part 2–2: Power supply and distribution", 2019.
13. ANSI/BICSI 002-2024, "Data Center Design and Implementation Best Practices", 2024.
14. I. Vujović, Z. Stojanović, Ž. Đurišić, "Predlog realizacije razvodnih postrojenja velikih data centara", *Energija, Ekonomija, Ekologija*, vol. 24, No. 1, pp. 1–7, mart 2022.
15. C. Nadjahi, H. Louahlia, S. Lemasson, "A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center", *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 19, pp. 14–28, September 2018.
16. A. Capozzoli, G. Primiceri, "Cooling systems in data centers: state of art and emerging technologies", *The 7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings*, *Energy Procedia*, vol. 83, pp. 484–493, December 2015.
17. H. Zhang, S. Shao, H. Xu, H. Zou, C. Tian, "Free cooling of data centers: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 171–182, July 2014.
18. Y. Zhang, Z. Wei, M. Zhang, "Free cooling technologies for data centers: energy saving mechanism and applications", *World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference*, *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 410–415, December 2017.
19. H. Selvnes, Y. Allouche, R. I. Manescu, A. Hafner, "Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 22, May 2021.
20. A. M. Sedeq, "Energy Storage Systems: A Comprehensive Guide", Independently published, September 2023.
21. G. Drenkelfort, S. Kieseler, A. Pasemann, F. Behrendt, "Aquifer thermal energy storages as a cooling option for German data centers", *Energy Efficiency*, vol. 8, Issue 2, pp. 385–402, Springer, April 2015.
22. H. QI, et al, "Data center network architecture in cloud computing: review, taxonomy, and open research issues", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics)*, vol. 15, Issue 9, pp. 776–793, September 2014.
23. M. D. Stojanović, S. V. B. Rakas, J. D. M. Petrović, "SCADA systems in the cloud and fog environments: Migration scenarios and security issues", *FACTA UNIVERSITATIS*, series: Electronics and Energetics, Vol. 32 Issue 3, pp. 345–358, September 2019.
24. L. J. Fennelly, "Effective physical security", Elsevier Inc., 5th edition, 2017.
25. Anixter, "The four layers of Data center physical security for a comprehensive and integrated approach", Glenview, Illinois, USA, October 2012.
26. M. Papathanasaki, L. Maglaras, N. Ayres, "Modern Authentication Methods: A Comprehensive Survey", *AI, Computer Science and Robotics Technology*, vol. 2022, pp. 1–24, June 2022.
27. G. Yatman, S. Üzumcü, A. Pahsa, A. A. Mert, "Intrusion detection sensors used by electronic security systems for critical facilities and infrastructures: a review", *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 151, pp. 131–141, May 2015.

DETEKCIJA KVAROVA U JEDNOFAZNIM ENERGETSKIM TRANSFORMATORIMA ZASNOVANA NA RAVNOTEŽI MAGNETOPOBUDNIH SILA

Veselin Ilić

Mojkovac

KRATAK SADRŽAJ:

U ovom radu je opisan numerički algoritam za detektovanje zemljospojeva i određivanje mjesta kvara u primarnom i/ili sekundarnom namotaju jednofaznih transformatora zasnovanog na jednačinama ravnoteže magnetopobudnih sila. Algoritam je baziran na obradi signala struja u namotajima primara i sekundara i struje kvara koja protiče kroz zemljovodno uže transformatorskog suda. Nepoznati parametar modela, relativni položaj mjesta kvara, računa se primjenom metode najmanje kvadratne greške. Algoritam je uspješno testiran kompjuterskim numeričkim simulacijama i laboratorijskim testovima.

Ključne riječi: Kućište, Magnetopobudna sila, Zaštita, Transformator

1. UVOD

Za zaštitu od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva-zemljospojeva koristi se takozvana kućišna zaštita [1]. Ova zaštita je razvijena i za male i velike transformatore. Da bi se kućišna zaštita mogla primijeniti potrebno je da transformatorski sud (kućište) bude uzemljen samo u jednoj tački, odnosno samo preko jednog provodnika u koji se instalije jednofazni strujni transformator [1]. Pri zemljospojevima unutar transformatora, struja će teći kroz zemljovodno uže transformatorskog suda, što znači da se, preko na njemu instalisanog strujnog transformatora, može mjeriti struja kvara [2]. Struja kvara može biti struja električnog luka (u početnom trenutku nastanka kvara) ili struja metalnog kvara.

Ovdje je prikazan jedan nov pristup detektovanja mjesta unutrašnjeg zemljospoja u primaru i/

ili sekundaru. Ideja je da se otkrivanje mjesta kvara ostvari mjerenjem struja: primara (i_1), sekundara (i_2) i struje kvara (i_k). Pristup je baziran na određenom broju uzoraka procesiranih signala u vremenskom domenu, a zatim se uz primjenu metode najmanjih kvadrata jednostavno određuje mjesto kvara [3].

2. IZVOĐENJE ALGORITMA ZA KVAR NA PRIMARU

Zemljospoj, koji se pojavio u primaru i/ili sekundaru jednofaznog transformatora sa transformatorskim sudom, prikazan je na sl.1.

Jednačina ravnoteže magnetopobudnih sila, za slučaj kvara na primaru ima oblik:

$$N_1(1-\alpha)i_1 + \alpha N_1(i_1 - i_k) - N_2 i_2 = N_1 i'_\mu \quad (1)$$

gdje su:

N_1 - broj navojaka na primaru,

N_2 - broj navojaka na sekundaru,

i_1 - struja primara,

i_2 - struja sekundara,

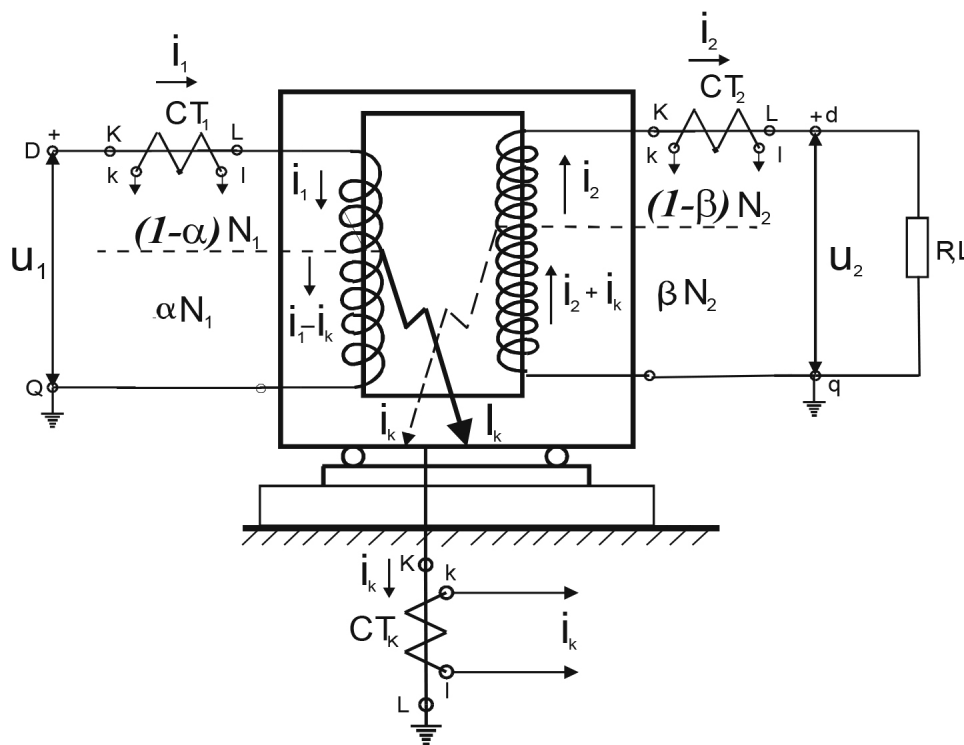
α - relativni položaj mjesta kvara na primaru (udaljenje mjesta kvara na primaru od Q priključka),

i_k - struja kvara i

i'_μ - struja magnećenja.

Smatrajući da je u toku kvara struja magnećenja mala, $i'_\mu \approx 0$, dobijamo:

$$i_1 - \frac{i_2}{m} = \alpha i_k \quad (2)$$



Slika 1. Zemljospoj u primaru i/ili sekundaru jednofaznog transformatora

Relacija (2) sadrži jednu nepoznatu- α . Za svaki set odbiraka primarne i sekundarne struje i struje kvara izraz (2) može se napisati kao jedna jednačina sa jednom nepoznatom. Da bi se izraz (2) mogao napisati N puta potrebno je uzorkovati N puta strujne signale. Ako je odabiranje struja uniformno, sa korakom odabiranja T , te uvođenjem greške ε (koja obuhvata greške mjerenja i zanemarenje struje magnećenja), za n -ti uzorak ($n=1, 2, \dots, N$) se dobija :

$$i_n + \varepsilon_n = \alpha \cdot i_{kn} \quad (3)$$

Jednačinu (3), za N odbiraka struja, možemo napisati N puta, odnosno u matricnom obliku kao:

$$[I] + [\varepsilon] = \alpha [I_k] \quad (4)$$

gdje su:

$$[I] = [i_{(1)}, i_{(2)}, \dots, i_{(N)}]^T, [\varepsilon] = [\varepsilon_{(1)}, \varepsilon_{(2)}, \dots, \varepsilon_{(N)}]^T$$

$$[I_k] = [i_{k(1)}, i_{k(2)}, \dots, i_{k(N)}]^T$$

Ako se iz relacije (4) eksplicitno izračuna vektor greške, zatim formira kriterijumska funkcija:

$$F[\alpha] = [\varepsilon]^T [\varepsilon] \quad (5)$$

i izjednači njen izvod sa nulom:

$$\frac{dF(\alpha)}{d\alpha} = 0 \quad (6)$$

dobija se:

$$\alpha = \frac{E}{C} \quad (7)$$

gdje su:

$$E = [I_k]^T [I] = \sum_{n=1}^N [i_{k(n)}] \left[i_{1(n)} - \frac{i_{2(n)}}{m} \right] \quad (8)$$

$$C = [I_k]^T [I_k] = \sum_{n=1}^N [i_{k(n)}]^2 \quad (9)$$

$$m = \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

m - odnos transformacije.

3. IZVOĐENJE ALGORITMA ZA ZA KVAR NA SEKUNDARU

Jednačina ravnoteže magnetopobudnih sila za slučaj kvara na sekundaru glasi:

$$N_1 i_1 - N_2(1 - \beta) i_2 - \beta N_2 (i_2 + i_k) = N_1 i'_\mu \quad (11)$$

Kao u odeljku 2, uz $i\mu' \approx 0$, dobijamo:

$$m \cdot i_1 - i_2 = \beta i_k \quad (12)$$

Analogno proceduri u predhodnom odeljku može se napisati:

$$\beta = \frac{E}{C} \quad (13)$$

$$E = [I_k]^T [I] = \sum_{n=1}^N [i_{k(n)}] [m i_{1(n)} - i_{2(n)}] \quad (14)$$

$$C = [I_k]^T [I_k] = \sum_{n=1}^N [i_{k(n)}]^2 \quad (15)$$

4. TESTIRANJE ALGORITMA NA RAČUNARU

Obavljeno je kompjutersko testiranje opisanog algoritma i njegova konvergencija za vrijeme prelaznog procesa tokom kvara u monofaznom transformatoru, korišćenjem generisanih ulaznih struja u primaru i sekundaru kao i struje kvara pomoću programa za simulaciju prelaznog režima. Simulacije su sprovedene za jednofazni transformator sa podacima:

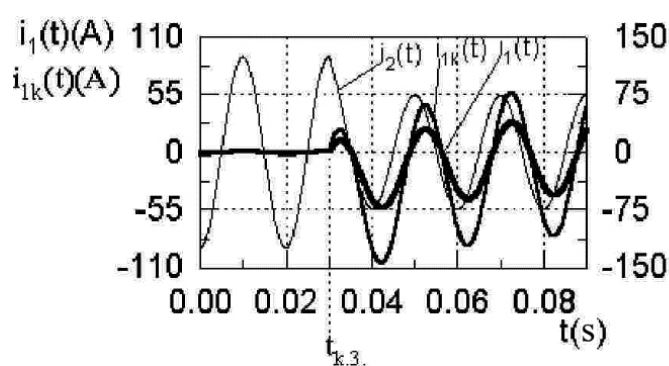
$U_1 = 25\,000\text{V} \pm 5\%$; $I_1 = 0,8\text{A}$; $U_2 = 220\text{V}$; $I_2 = 90\text{A}$; $S = 20\text{KVA}$; $u_k = 4\%$.

Od mnogih kvarova na primaru i sekundaru izdvojeni su sljedeći rezultati:

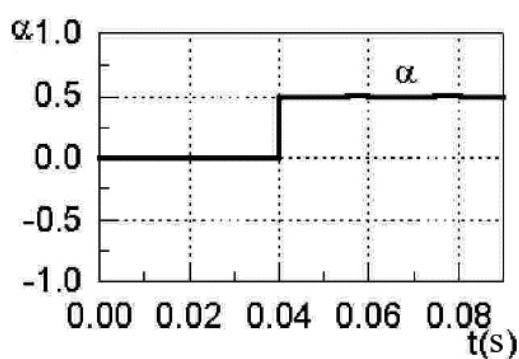
1. Kvar sa električnim lukom na primaru: $\alpha = 0,5$ - Slika 3.

2. Kvar sa električnim lukom na sekundaru: $\beta = 0,5$ - Slika 5.

Ovi rezultati (slika 3 i slika 5) dobijeni su korišćenjem prozora podataka $T_{dw} = 10\text{ms}$ sa 100 odbiraka u prozoru ($f_{sem} = 10\text{KHz}$).

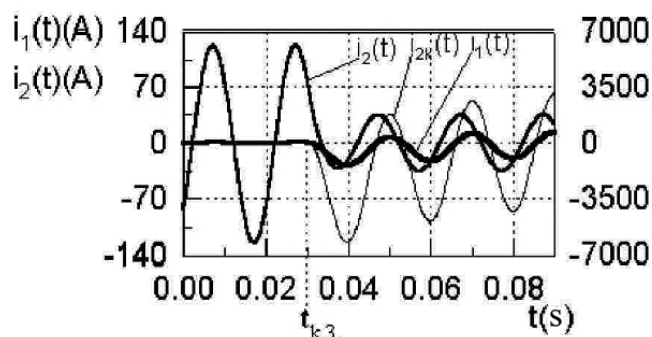


Slika 2. Struja primara i sekundara i struja kvara za slučaj lučnog kvara na primaru ($\alpha = 0,5$)

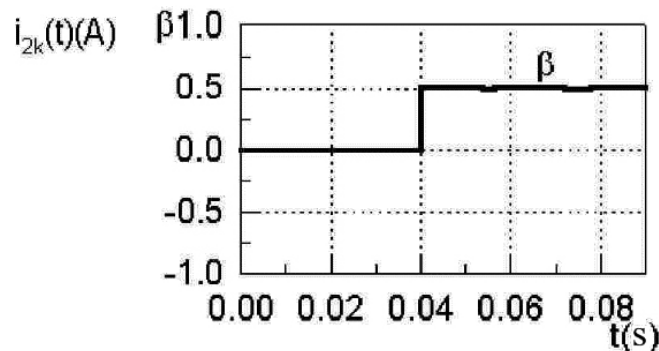


Slika 3. Izračunata vrijednost relativnog položaja mjesta lučnog kvara na primaru ($\alpha = 0,5$)

Za trenutak nastanka kvara uzet je trenutak $t_{k3} = 0,03\text{s}$ (slika 2 i slika 4). Transformator je prije kvara bio nominalno opterećen.

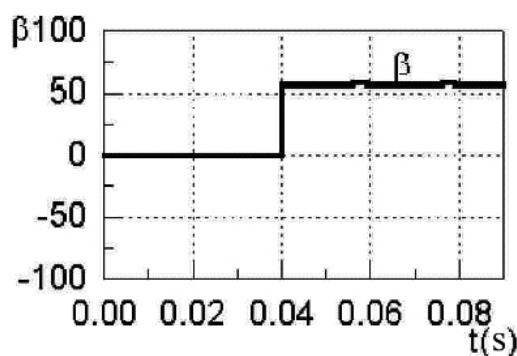


Slika 4. Struja primara i sekundara i struja kvara za slučaj lučnog kvara na sekundaru ($\beta=0,5$)

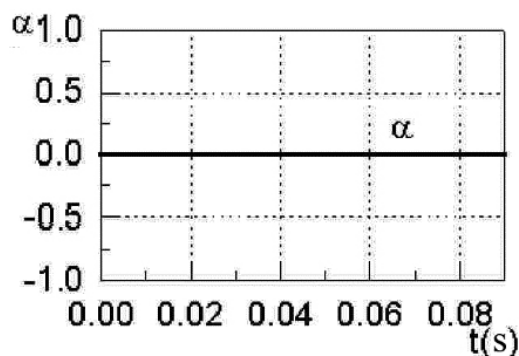


Slika 5. Izračunata vrijednost relativnog položaja mjesta lučnog kvara na sekundaru ($\beta=0,5$)

Izlazi algoritma (α i β), nakon kvara, su u intervalu: $0 < \alpha \leq 1$ i $0 < \beta \leq 1$ i estimirani su sa visokom tačnošću. Vrijeme konvergencije veličina α i β iznosi 10ms. Postavlja se pitanje šta "vidi" algoritam za detekciju kvarova na sekundaru pri kvaru na primaru, i obrnuto? Izlazi algoritama za ove slučajeve dati su na slikama 6 i 7.



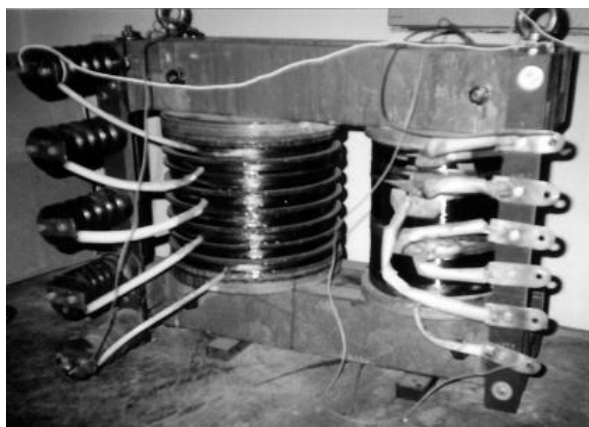
Slika 6. Estimirana vrijednost β , u kompjuterskom testu, koju "vidi" algoritam za sekundarni namotaj za lični kvar na primaru: $\alpha=0,5$



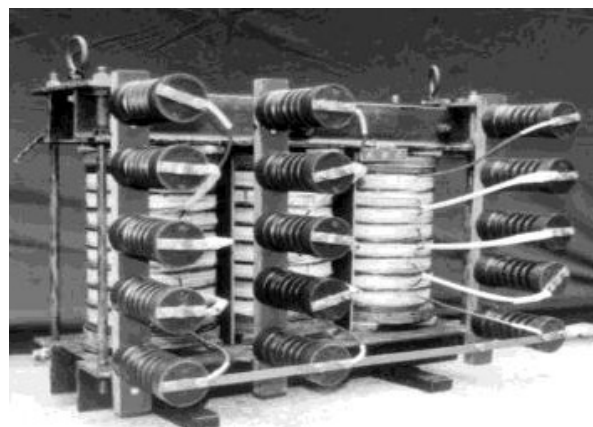
Slika 7. Estimirana vrijednost α , u kompjuterskom testu, koju "vidi" algoritam za primarni namotaj za lučni kvar na sekundaru: $\beta=0,5$

5. TESTIRANJE ALGORITAMA POMOĆU LABORATORIJSKIH SNIMAKA KVAROVA

Da bi se provjerila tačnost ovog digitalnog algoritma u realnim uslovima korišćeni su podaci, dobijeni iz eksperimenata u visokonaponskoj laboratoriji sa kratkim spojevima na fizičkim modelima - slike 8 i 9.



Slika 8. Model monofaznog transformatora ($U_1=380V$; $I_1=15,19A$; $U_2=10000V$; $I_2=0,577A$; $S=100VA$; $uk=3,45\%$)



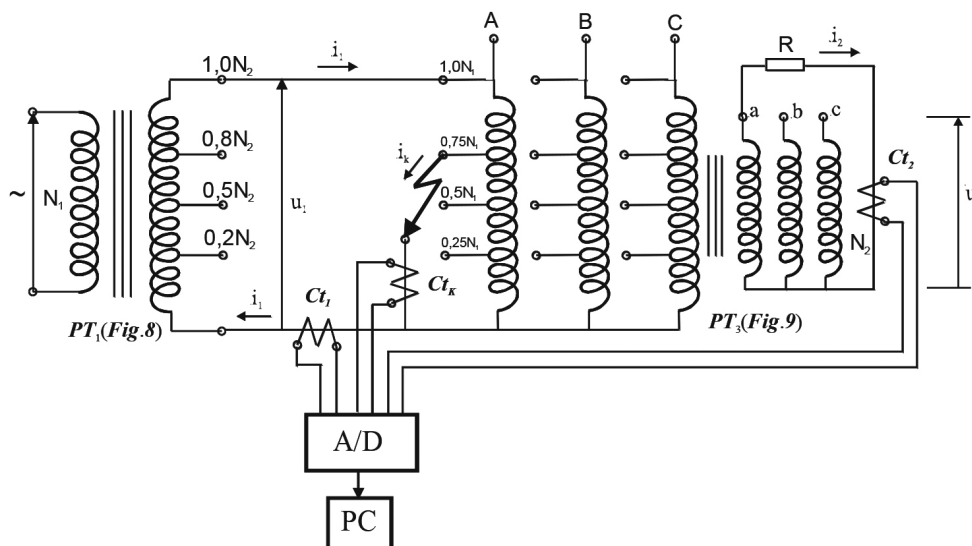
Slika 9. Model trofaznog transformatora ($U_1=380V$; $I_1=15,19A$; $U_2=10000V$; $I_2=0,577A$; $S=10KVA$; $uk=4\%$)

Digitalizovani signali struja i_1 , i_2 i i_k dobijeni su pomoću kola-šema prikazanih na slikama 10 i 17. Podaci (signali) su snimljeni korišćenjem uređaja za snimanje prelaznih pojava sa frekvencijom semplovanja (odabiranja) $f_{sem.} = 2,5 \text{ kHz}$.

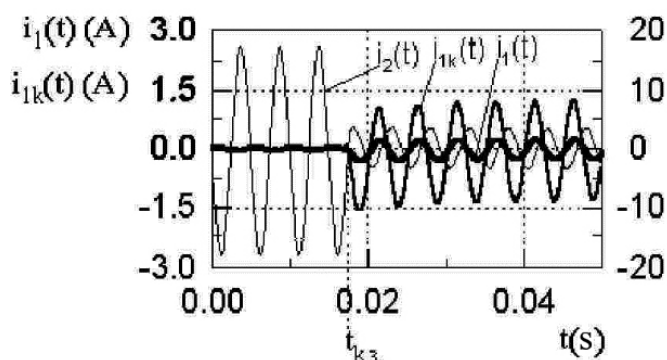
5.1. Kvar na primaru trofaznog transformatora

Šema veza i mjerna oprema, pri ovim eksperimentima, prikazani su na sl. 10. Strujni signali: primara $i_1(t)$, sekundara $i_2(t)$ i kućišta $i_k(t)$, trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina, tokom prelaznog procesa za:

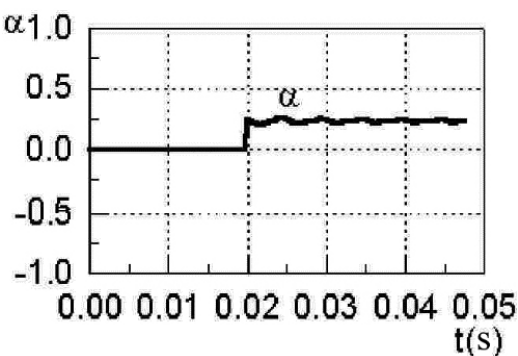
- metalni kvar na mjestu $0,25N_1$ i
 - lučni kvar na mjestu $0,75N_1$, dati su na slikama 11 i 13. Ovdje je: t_{k3} - trenutak nastanka kvara.
- Estimirane vrijednosti relativnog položaja mjesta kvara na primaru α prikazani su na slikama 12 i 14.



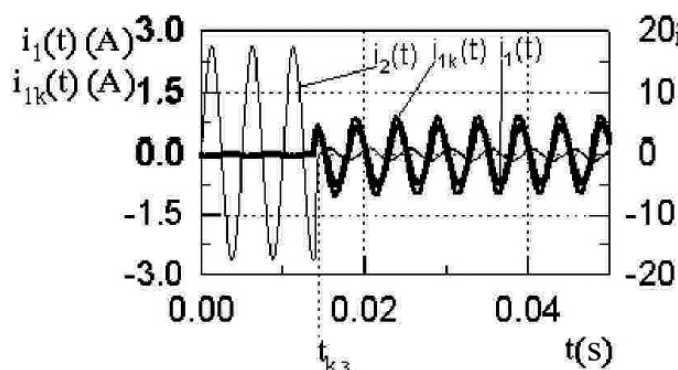
Slika 10. Laboratorijska šema veza za slučaj kvara na primaru trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina



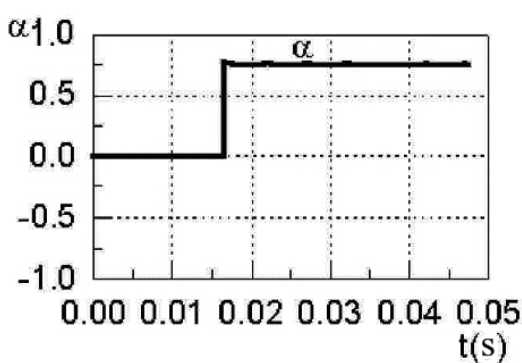
Slika 11. Struje primara i sekundara i struja kvara pri metalnom kvaru na primarnom namotaju $\alpha=0,25$



Slika 12. Estimirani parametar α za metalni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,25$

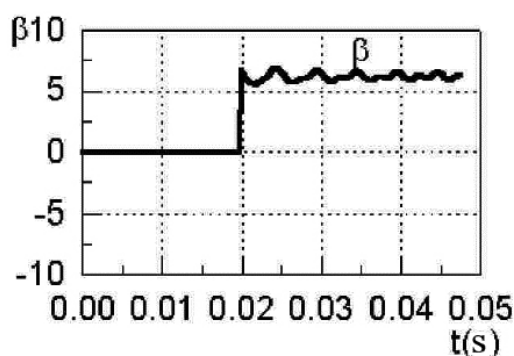


Slika 13. Struje primara i sekundara i struja kvara pri lučnom kvaru na primarnom namotaju $\alpha=0,75$

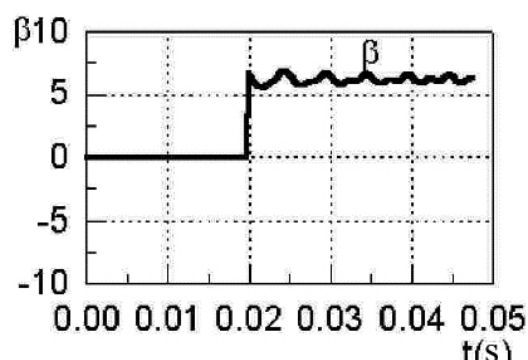


Slika 14. Estimirani parametar α za lučni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,75$

Sa stanovišta estimacije relativnog položaja mjesta kvara α postignuta je visoka tačnost i stabilna konvergencija. Ono što "vidi" algoritam za detekciju kvarova na sekundaru, za kvar na primaru, prikazano je na slikama 15 i 16.



Slika 15 Estimirani parametar β koji "vidi" algoritam za sekundarni namotaj, za metalni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,25$



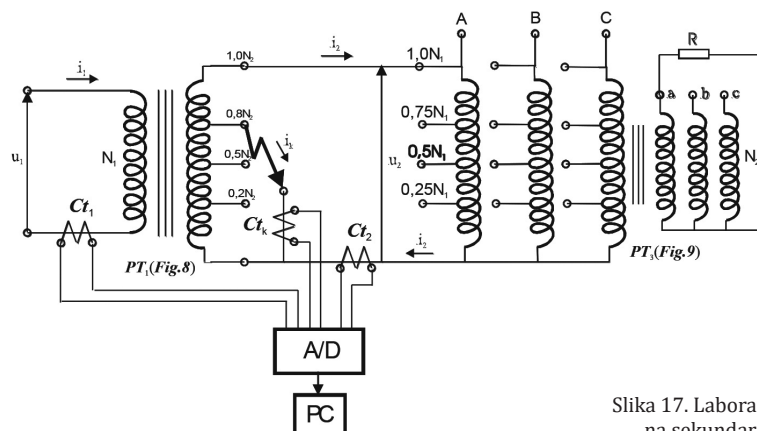
Slika 16. Estimirani parametar β koji "vidi" algoritam za sekundarni namotaj, za lučni kvar na primarnom namotaju $\alpha=0,75$

5.2. Kvar na sekundaru monofaznog transformatora

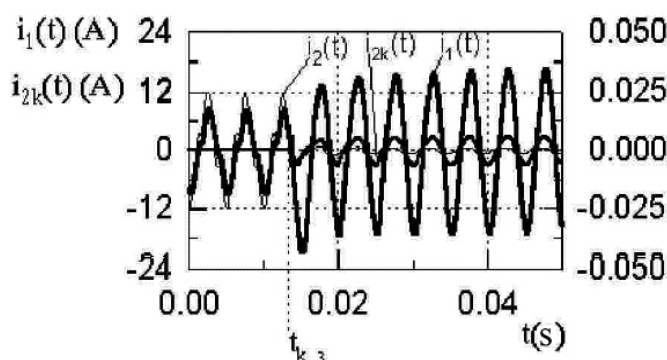
Kao u odeljku 5.1 odgovarajući strujni signali (dobijeni iz eksperimenata - sl.17) tokom prelaznog procesa za:

- metalni kvar na mjestu $0,2N_2$ i
- lučni kvar na mjestu $0,8N_2$, prikazani su na slikama 18 i 20.

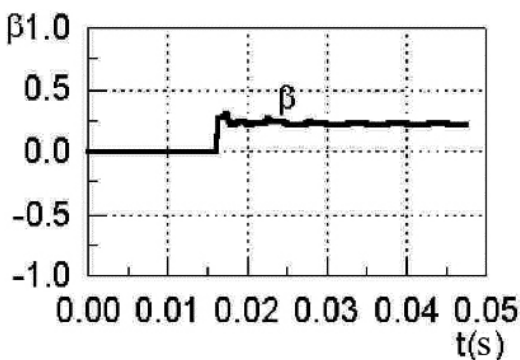
Izračunate vrijednosti relativnog položaja mjesta kvara na sekundaru β prikazane su na slikama 19 i 21. Može se konstatovati da estimirane vrijednosti relativnog položaja mjesta kvara β na sekundaru konvergiraju sa zadovoljavajućom tačnošću i brzinom (10ms). Ono što "vidi" algoritam za detekciju kvarova na primaru, za kvar na sekundaru, prikazano je na slikama 22 i 23.



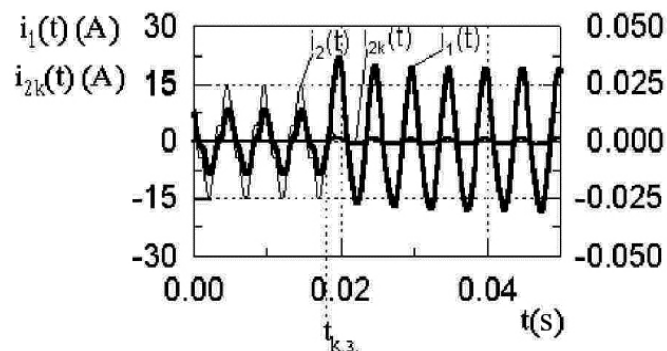
Slika 17. Laboratorijska šema veza za slučaj kvara na sekundaru monofaznog transformatora



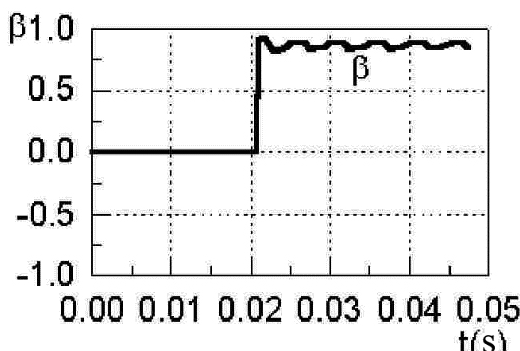
Slika 18. Struje primara i sekundara i struja kvara pri metalnom kvaru na sekundarnom namotaju $\beta=0,2$



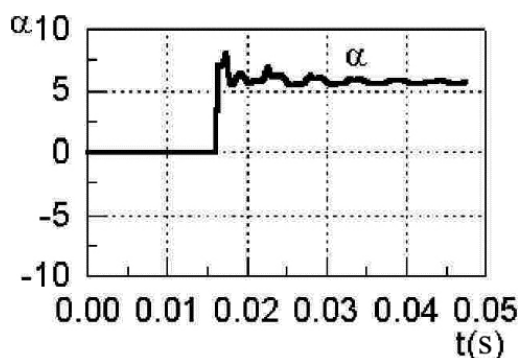
Slika 19. Estimirani parametar β za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,2$



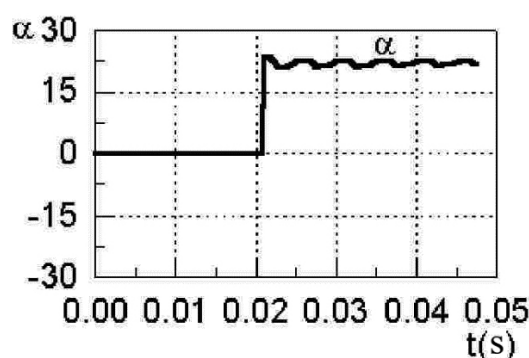
Slika 20. Struje primara i sekundara i struja kvara pri lučnom kvaru na sekundarnom namotaju $\beta=0,8$



Slika 21. Estimirani parametar β za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,8$



Slika 22. Estimirani parametar α koji "vidi" algoritam za primarni namotaj, za metalni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,2$

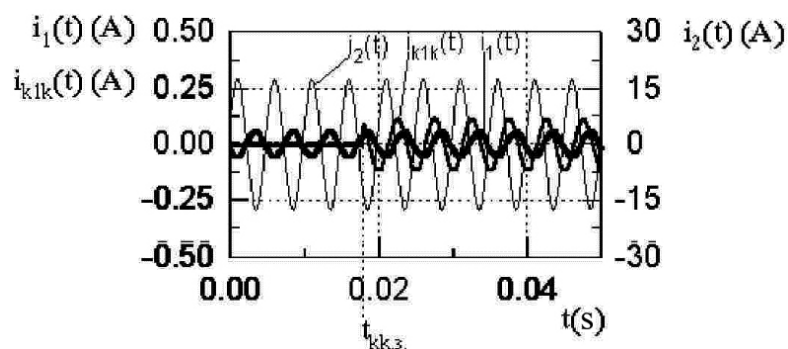


Slika 23. Estimirani parametar α koji "vidi" algoritam za primarni namotaj, za lučni kvar na sekundarnom namotaju $\beta=0,8$

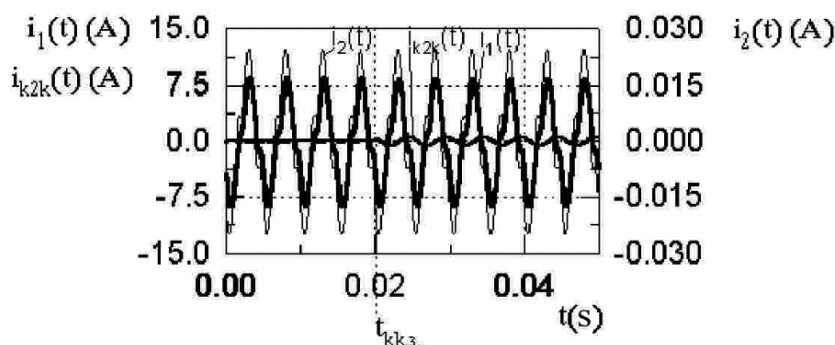
5.3. Testiranje algoritma na "lažne struje"

Opisani digitalni algoritam provjeren je na takozvane "lažne struje" koje se mogu pojaviti u kućištu transformatora (kvar na niskonaponskoj opremi montirane na kućištu). Ovdje se misli na kvarove elektromotora koji pokreću ventilatore, za prinudno vazdušno hlađenje, i pumpe prinudne cirkulacije ulja. "Lažne struje" su inicirane iz posebnog izvora, koji je bio priključen u kolo sekundara strujnog transformatora Ct_k - slikama 10 i 17. Vremenski tok "lažnih struja" kroz kućište trofaznog i monofaznog transformatora prikazan je na slikama 24 i 25. Ovdje su: t_{kk3} - trenutak nastanka "lažne struje" kroz kućište; i_{k1k} i_{k2k} - "lažne struje" kvara kroz kućište transformatora.

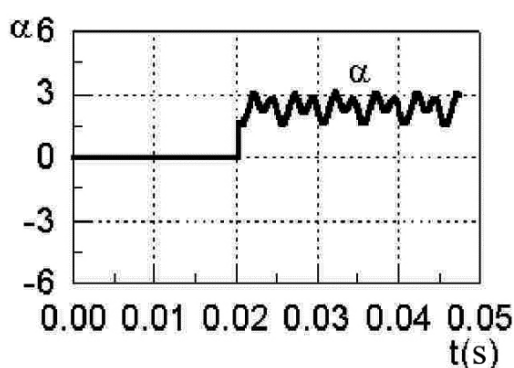
Izlazi prezentiranog digitalnog algoritma dati su na slikama 26, 27, 28 i 29. Ovi rezultati "govore" da je izloženi digitalni algoritam selektivan. Algoritam precizno određuje relativni položaj mjesta kvara kako na primarnom tako i na sekundarnom namotaju monofaznog energetskog transformatora. Algoritam je neosjetljiv na uticaj jednosmjerne komponente u struji kvara.



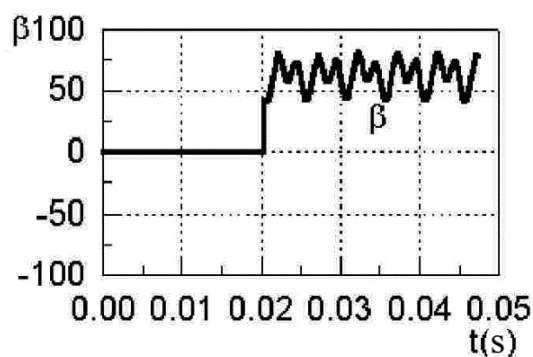
Slika 24. "Lažna struja" kvara kroz kućište trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina



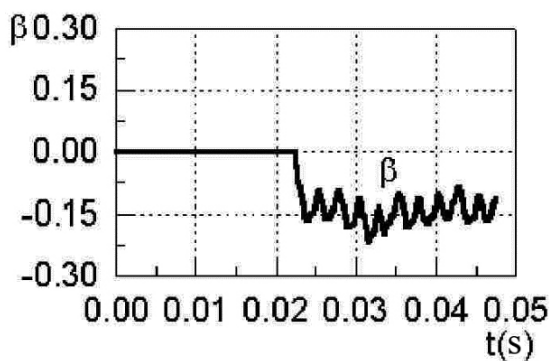
Slika 25. "Lažna struja" kvara kroz kućište monofaznog transformatora



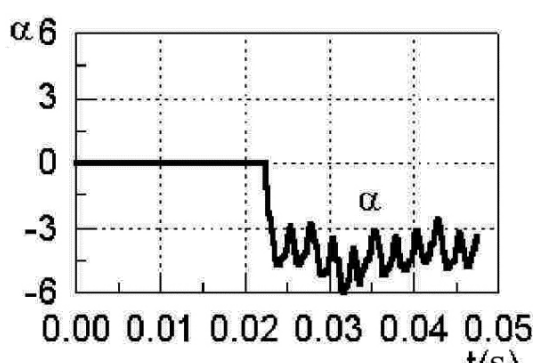
Slika 26. Estimirana vrijednost α za slučaj "lažne struje" kvara u kućištu trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina



Slika 27. Estimirana vrijednost β za slučaj "lažne struje" kvara u kućištu monofaznog transformatora



Slika 28. Estimirani parametar β koji "vidi" algoritam za sekundarni namotaj, pri "lažnoj struji" kvara u kućištu trofaznog transformatora, koji je radio kao jednofazna mašina



Slika 29. Estimirani parametar α koji "vidi" algoritam za primarni namotaj, pri "lažnoj struji" kvara u kućištu monofaznog transformatora

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prezentirani su rezultati kompjuterskih simulacija i laboratorijskog testiranja digitalnog algoritma za detekciju unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva-zemljospojeva u monofaznim energetske transformatorima, zasnovanog na jednačinama ravnoteže magnetopobudnih sila. Eksperimentalni rezultati testiranja na primaru i sekundaru fizičkih modela, pri generisanju zemljospojeva sa i bez električnog luka, pokazali su visoku tačnost, brzinu (10ms) i stabilnu konvergenciju algoritma. Algoritam je neosjetljiv na uticaj jednosmjerne komponente u struji kvara. Izloženi digitalni algoritam testiran je u vremenskom domenu. Selektivnost pri detekciji unutrašnjih jednofaznih kvarova potvrđuje njegovu originalnost i praktičnu primenljivost.

LITERATURA

1. V. N. Ilić, Detekcija kvarova sa električnim lukom u energetske transformatorima, doktorska disertacija, Beograd, 2004.
2. M. B. Đurić, Tehnika zaštite u elektroenergetici, ETF, Beograd, 1997.
3. M. B. Đurić, V. V. Terzija, "A new approach to the arcing faults detection for autoreclosure in transmission systems", IEEE/PES Winter Meeting, January 29 to February 2, 1995, New York, 95 WM 027- PWRD.

NESTANDARDNA ZAŠTITA OD POŽARA U INDUSTRIJI UPRAVLJANJA OTPADOM

Siniša Teodosić

BS-PROJEKT 2009 d.o.o. Valjevo, Republika Srbija
Zarja elektronika d.o.o. Kamnik, Republika Slovenija

KRATAK SADRŽAJ

Industrija upravljanja otpadom suočava se s posebnim izazovima u pogledu zaštite od požara. Odlagališta i prerade otpada su visoko rizični objekti za izbijanje požara, što potvrđuju statistike koje pokazuju strm rast broja požara u posljednjih nekoliko godina. Glavni uzroci požara uključuju samopaljenje, zapaljive tečnosti i materije, pregrijani pogoni i motori, trenje, greške u komponentama uređaja, te nepravilno odložene baterije koje mogu izazvati požare kada dođu u uređaje za mlevenje. Kombinacija velikih količina zapaljivih stvari i često neuređenih protivpožarnih sektora čini ove objekte izrazito opasnim. U cilju poboljšanja zaštite od požara u centrima za prikupljanje otpada, ovaj rad pruža smernice za odabir specijalne opreme za rano otkrivanje i dojavu požara. Ključni elementi uključuju termografske kamere, infracrvene detektore toplote, detektore dima, aspiracijske javljače dima, detektore plamena i detektore gasova. Važno je pravilno odabrati lokacije za postavljanje opreme, uzimajući u obzir kritične tačke kao što su prijemno područje, područje obrade, skladišno područje i bunker za otpad.

Primena ovih smernica osigurava bolju zaštitu od požara i minimalizira rizike povezane s obradom i skladištenjem otpada, čime se štiti osoblje, infrastruktura i okoliš od potencijalno katastrofalnih požara.

Ključne reči: Upravljanje otpadom, Požarna sigurnost, Detekcija požara, Termografske kamere, Aspiracijski javljači dima, Infracrveni (IR) detektori toplote, Detektori plamena

1. UVOD

Odlagališta i prerade otpada su objekti vrlo ugroženi požarima, što potvrđuju i razne statistike. Broj požara na tim objektima u poslednjih nekoliko godina strmo raste, što se s sigurnošću može pripisati povećanju količine otpada iz godine u godinu, kao i sve većoj upotrebi baterija, prvenstveno litijumskih i srodnih tehnologija. Razlozi za požar su mnogobrojni, a glavni, odnos-

no specifični za ovu vrstu objekata su: samopaljenje (prvenstveno hemijsko i biološko), zapaljive tečnosti i materijali, pregrejani pogoni i motori, trenje i greške u pojedinim komponentama uređaja. Posebno opasne su nepravilno odložene baterije i akumulatori, pogotovo ako “zađu” u uređaje za mlevenje. U kombinaciji s velikom količinom zapaljivih stvari i često neuređenim i prevelikim (ako uopšte) protivpožarnim sektorima, takvi su objekti “tempirane bombe”. U slučaju požara, on se brzo razvija u neobuzdan požar koji se može proširiti na veći deo objekta. Osim finansijske štete, kao posledice zastoja u proizvodnji i troška obnove, kod takvih objekata nastupa i specifičan problem - okolno stanovništvo, koje se brzo organizuje u razne civilne inicijative, koje, ako već ne spreče, barem odlažu ponovno pokretanje rada. To je često glavni problem požara i često veći od ostalih direktno finansijskih, da ne govorimo o uticaju na okolinu. Stoga je na takvim objektima rano otkrivanje požara izuzetno važno, ali i vrlo zahtevno za izvedbu.

1.1. Definicije ključnih termina

Objekat za upravljanje otpadom je postrojenje za prikupljanje otpada, uključujući skladište otpada, transfer stanicu i reciklažno dvorište, postrojenje za prečišćavanje otpada, uključujući deponiju, centar za upravljanje otpadom i reciklažno dvorište za građevinski otpad.

Centar za sakupljanje otpada jeste mesto određeno odlukom opštine, grada, odnosno grada Beograda (u daljem tekstu: jedinica lokalne samouprave), na koje građani donose otpad i kabasti otpad (nameštaj i bela tehnika, baštenski otpad, materijal pogodan za reciklažu, uključujući i opasan otpad iz domaćinstva). [1]

Od 2010. godine izgrađeno je osam regionalnih deponija u okviru regionalnih centara za upravljanje otpadom, a ukupno je 12 sanitarnih deponija, što je nedovoljno. Zbog nedostatka prostora za dalje odlaganje otpada usled zapunjenih deponija, pojedine opštine svoj komunalni otpad preusmeravaju na susedne regionalne deponije. Za period od 2010. godine urađena su 32 projekta sanacije, zatvaranja i rekultivacije smetlišta. Urađeno je 18 od 26 regionalnih planova upravljanja otpadom. Procenat stanovnika obuhvaćenih organizovanim prikupljanjem otpada pokazuje trend porasta. Stopa reciklaže je i dalje nedovoljna. Nije se mnogo postiglo na razvijanju sistema finansiranja upravljanja otpadom i primeni ekonomskih instrumenata

1.2. Upravljanje otpadom u Srbiji

Trenutno stanje

U Srbiji se godišnje proizvede oko 12 miliona tona otpada, što je oko 1,8 tona po osobi. U Srbiji je praktično jedini način upravljanja otpadom odlaganje na lokalne deponije, koje, uz vrlo retke izuzetke, ne ispunjavaju ni osnovne higijenske i tehničko-tehnološke uslove, a pored toga, neke od postojećih deponija su praktično popunjene. U Srbiji, prema trenutnoj situaciji, vrlo je malo deponija koje se mogu uvrstiti u sanitarne deponije.

Novi planovi i akcije

Zakonom o upravljanju otpadom („Sl. glasnik RS“, br. 36/2009, 88/2010, 14/2016, 95/2018 - dr. zakon i 35/2023) uređuju se: vrste i klasifikacija otpada; planiranje upravljanja otpadom; subjekti upravljanja otpadom; odgovornosti i obaveze u upravljanju otpadom; organizovanje upravljanja otpadom; upravljanje posebnim tokovima otpada; uslovi i postupak izdavanja dozvola; prekogranično kretanje otpada; izveštavanje o otpadu i baza podataka; finansiranje upravljanja otpadom; nadzor, kao i druga pitanja od značaja za upravljanje otpadom.

Cilj ovog zakona je da se obezbede i osiguraju uslovi za:

- Upravljanje otpadom na način kojim se ne ugrožava zdravlje ljudi i životna sredina;
- Prevenciju nastajanja otpada, razvojem čistijih tehnologija i racionalnim korišćen-

jem prirodnih bogatstava, kao i otklanjanje opasnosti od njegovog štetnog dejstva na zdravlje ljudi i životnu sredinu;

- Ponovno iskorišćenje i reciklažu otpada, izdvajanje sekundarnih sirovina iz otpada i korišćenje otpada kao energenta;
- Razvoj postupaka i metoda za odlaganje otpada;
- Sanaciju neuređenih deponija;
- Praćenje stanja postojećih i novoformiranih sanitarnih deponija;
- Razvijanje svesti o upravljanju otpadom. [2]

Najavljene infrastrukturne investicije u upravljanju otpadom u RS

Infrastruktura za upravljanje opasnim otpadom će se razviti investiranjem uglavnom privatnog sektora. Ove investicije moraju biti izvršene u skladu sa principom "zagađivač plaća". Sva postrojenja za tretman opasnog otpada moraju biti izgrađena u skladu sa međunarodnim standardima. Uzimajući u obzir procenu količine otpada za period od 2021. do 2031. godine i upoređujući ove količine sa trenutno dostupnom infrastrukturom, obezbeđenje odgovarajućeg tretmana opasnog i industrijskog otpada će se steći uspostavljanjem sledeće infrastrukture:

1) uspostavljanje centara za sakupljanje opasnog otpada iz domaćinstava (otpadnih ulja, otpadnih električnih i elektronskih aparata, otpadnih baterija i dr.) u svakoj lokalnoj samoupravi;

2) izgradnja regionalnih skladišta opasnog otpada za njegovo bezbedno sakupljanje i čuvanje do tretmana u pet regiona u Republici Srbiji;

3) izgradnja postrojenja za fizičko-hemijski tretman neorganskog i organskog opasnog otpada i mulja i njegovo skladištenje (ovo će uključivati transport ostataka na dalji tretman (priprema goriva iz otpada/RDF, odlaganje na deponije ili izvoz); planira se izgradnja dva postrojenja za fizičko-hemijski tretman, kapaciteta 50.000 t/godišnje. Ostaci se šalju na dalji tretman (npr. priprema goriva iz otpada), na propisne deponije, ili se izvoze iz Republike Srbije;

4) uspostavljanje kapaciteta za spaljivanje organskog industrijskog i medicinskog otpada (insineratora), u kombinaciji sa kapacitetima za pripremu goriva iz otpada (RDF); planira se jedno postrojenje kapaciteta oko 30.000 t/godišnje, a za određene vrste opasnog otpada, delimično se može realizovati koinsineracijom u industrijskim postrojenjima;

5) izgradnja jedne deponije za odlaganje neorganskog industrijskog opasnog otpada, kombinovano sa kapacitetima za solidifikaciju muljeva iz tokova opasnog otpada, kapaciteta 28.000-38.000 t/godišnje;

6) izgradnja kasete na regionalnim sanitarnim deponijama, za prihvatanje otpada od azbesta.1.3. [3]

Rizici i uzroci požara

Sa povećanjem broja deponija i količine nagomilanog otpada povećava se rizik od požara i smanjuje nivo požarne bezbednosti. Implementacija „Programa upravljanja otpadom u Republici Srbiji za period od 2022. do 2031. godine“ i ulaganja u izgradnju centara za upravljanje otpadom dodatno će povećati potrebu za naprednim rešenjima u oblasti zaštite od požara. Specijalizovani objekti za upravljanje otpadom imaju kritične tačke (više u nastavku) u procesima rada koje predstavljaju potencijalne izvore požara.

Česti požari u sabirnim centrima ukazuju na nedovoljno regulisanje zaštite od požara pri skladištenju i preradi otpada. Sadašnji nivo zaštite od požara je u velikoj meri prepušten vlasnicima, koji bi trebalo da ulože značajna sredstva u prevenciju požara i aktivnu zaštitu, uključujući automatsku detekciju i alarmiranje požara, alarme i automatske sisteme za gašenje.

Otpadne požare karakteriše brzo širenje, velike količine dima, toksičnost, veliko požarno opterećenje, dugotrajni požari i teško gašenje. Takođe im je potrebna velika količina vode za gašenje, što može dovesti do nestašice vode, i uzrokovati zagađenje vazduha, zemljišta i vode.

Posledice otpadnog požara mogu biti ozbiljne. Rizik od smrti i ozbiljnih povreda usled visoke

toplotne energije i udisanja dima, zagađenje vazduha koje može izazvati zdravstvene probleme i zagađenje vode koje ugrožava vodosnabdevanje i javno zdravlje samo su neki od problema. Materijalna šteta može biti značajna, a pravne posledice uključuju visoke novčane kazne i zatvorske kazne za odgovorne. Troškovi čišćenja, prekidi poslovanja, povećane premije osiguranja i troškovi reputacije su takođe značajni.

Najčešći uzroci požara na deponijama su samozapaljenje, ponovno paljenje od prethodnih požara, ljudska aktivnost (nenamerna, kao što je rad na visokim temperaturama, ili namerna, kao što je paljenje), kao i tehnički i električni kvarovi. Samozapaljenje često uključuje samozagrevanje i požare izazvane trenjem. Utvrđivanje uzroka požara može biti izazovno, a u mnogim slučajevima uzroci ostaju nepoznati.

2. PROJEKTOVANJE ZAŠTITE OD POŽARA U SABIRNOM CENTRU OTPADA

Osnovno polazište za projektovanje sistema za gašenje požara svakako je Elaborat zaštite od požara, u kom se analizira objekat u celini, požarna opterećenja i požarne rizike i odlučuje se kako da se postigne odgovarajuća (potrebna) protivpožarna bezbednost.

Elaborat zaštite od požara često, posebno kod adaptacija objekata, nije dostupan. U takvom slučaju, projektant sistema zaštite od požara mora se posavetovati sa investitorom, osiguravačem, tehnolozima proizvodnog procesa, predstavnicima vlasti (nezavisni stručnjaci i/ili požarnim inspektorima), kako bi utvrdio sve okolnosti koje utiču na ispravnu odluku u vezi sistema, izbora elemenata, njihove raspodele, kao i organizacije alarma, to jest upravljanja sistemima za sprečavanje širenja požara i automatskog gašenja, alarmiranja i prenosa alarma.

Ključni cilj automatskog sistema za detekciju i alarmiranje požara je da otkrije požar u najranijoj fazi, tokom pregrevanja ili tinjanja. Rani požar se može ugaziti „čашom vode“, dok se razvijeni požar može proširiti do ogromnih razmera i katastrofalno opteretiti životnu sredinu. [3]

2.1. Odabir tipa specijalne opreme za rano otkrivanje i dojavu požara

Izbor odgovarajuće specijalne opreme za rano otkrivanje i uzbuđivanje požara je od ključnog značaja za efikasnu prevenciju i intervenciju. Prilikom izbora opreme polazimo od procesa i njihovih svojstava kako bismo obezbedili optimalnu zaštitu. Definisane probleme i pažljivo razmatranje različitih aspekata omogućava optimalan izbor opreme i njeno pravilno postavljanje. (slika 1)

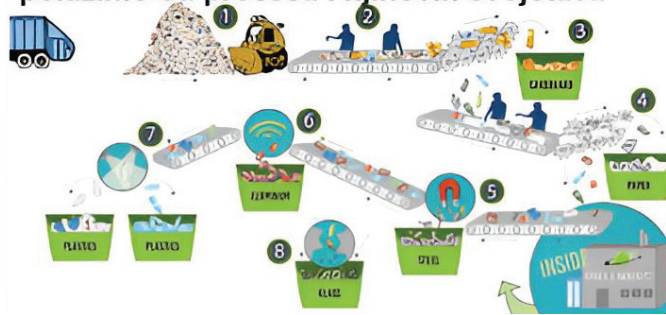
Važno je uzeti u obzir sledeće faktore:

- Brzina odziva: Potrebna brzina odgovora (vreme).
- Sva goriva: Gasovi i materijali koji su potencijalni izvori požara ili rizika.
- Veličina požara: Veličina vatre koju treba otkriti.
- Udaljenost detekcije: Potrebna udaljenost (domet) detekcije.
- Izvori smetnji: Svi prisutni izvori smetnji zračenja.
- Uslovi okoline: Uslovi okoline koji mogu uticati na rad opreme.

Pažljivim sagledavanjem ovih faktora, polazeći od specifičnih procesa i njihovih osobina, moguće je izabrati najpogodniju specijalnu opremu za rano otkrivanje i alarmiranje požara i optimalno je postaviti za maksimalnu bezbednost.

Prilikom izbora opreme polazimo od procesa i njihovih svojstava kako bismo obezbedili optimalnu zaštitu.

Prilikom planiranja aktivne zaštite od požara polazimo od procesa i njihovih svojstava



Slika 1. Proces upravljanja otpadom

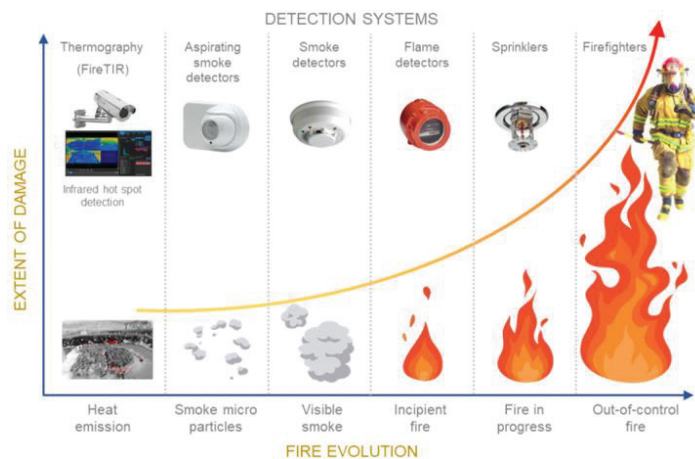
2.2. Izbor opreme po vremenu detekcije požara

S obzirom na to da znamo da je većina požara u postrojenjima za tretman otpada uzrokovana spontanom sagorevanjem, brza reakcija je neophodna za otkrivanje požara u ranoj fazi i sprečavanje njihovog širenja.

U nastavku ćemo istražiti faze požara i odgovarajuće sisteme detekcije za svaku od njih.

Uopšteno govoreći, možemo identifikovati pet faza požara (slika 2):

- Faza zagrevanja (pedsagorevanje).
- Faza inicijacije: paljenje i početno sagorevanje.
- Faza razvoja: rast i ekspanzija.
- Faza stabilizacije: kontrola i suzbijanje.
- Faza izumiranja: otklanjanje opasnosti.



Slika 2. Faze razvoja požara

Faza grejanja (pred sagorevanje)

Toplota je nusproizvod sortiranja otpada i akumulira se u vrućim zonama na određenim lokacijama prerade. Ova područja mogu postati opasna ako se zanemare, jer nagomilavanje toplote može izazvati požare unutar postrojenja za sortiranje otpada, ugrožavajući osoblje i objekat.

Termalne kamere: Ove napredne kamere detektuju temperaturne razlike na površinama i mogu identifikovati područja abnormalnog zagrevanja, što bi moglo da ukaže na početni požar. Pošto se ove kamere oslanjaju na infracrveno (IR) svetlo umesto na vidljivo svetlo, ovaj sistem može da pruži zaštitu od požara danju i noću, bez obzira na uslove osvetljenja.

Mnogi sistemi za termoviziju obezbeđuju brza ažuriranja podataka o temperaturi koji mogu pokrenuti alarme kada toplota poraste opasno visoko, omogućavajući preduzećima da zaštite ma-

terijale ili isključe opremu koja bi mogla izazvati ili proširiti požar. Kada se identifikuje žarište, kamera može automatski da pokrene odgovor koji ste definisali. Odgovor može biti da se upozori upravnik objekta ili određeni službenik obezbeđenja, ili da se aktivira sistem za kontrolu požara, kao što je automatsko aktiviranje aparata za gašenje požara i obaveštavanje nadležnih organa. (slika 3)

Termalno snimanje: Tačno locira izvor požara čak i okružen dimom, pokazujući raspodelu temperature i žarišta za efikasno gašenje. Kontinuirano praćenje: Nadzire toplotu i temperaturu opreme kao što su transporteri, ležajevi i motori, aktivirajući alarm prilikom pregrevanja da obavesti osoblje o mogućim kvarovima i rizicima od požara.

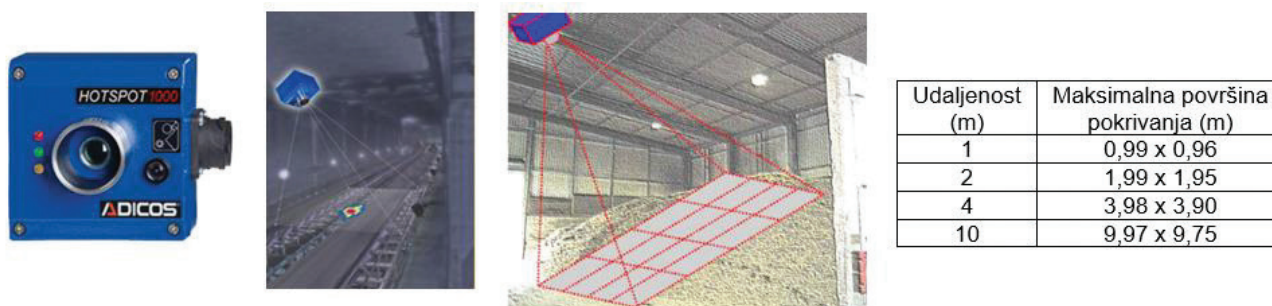
Nadzor 24/7: Automatski otkriva i locira upade i pretnje u teškim uslovima, snimajući jasne slike čak i u mraku. Omogućava kontinuirano praćenje objekata i fabrika otpada, poboljšavajući bezbednost.



Slika 3. Detekcija vrućih površina pomoću termalne kamere

Infracrveni detektori toplote: Sistemi za detekciju za ovu fazu uključuju detektor koji koristi termovizijski senzor da detektuje raspodelu temperature objekta i detektuje tinjajuću vatru i otvorenu vatru u početnoj fazi. Pored infracrvenog senzora, ugrađena je i konvencionalna kamera za lakše poravnanje i orijentaciju. Sa rezolucijom od 1000 piksela osetljivih na toplotu, celokupno vidno polje termografskog detektora može se parametrizovati kriterijumima alarma.

Zarja ima veoma pozitivna iskustva sa Adicos 1000 IR hot spot. (slika 4)

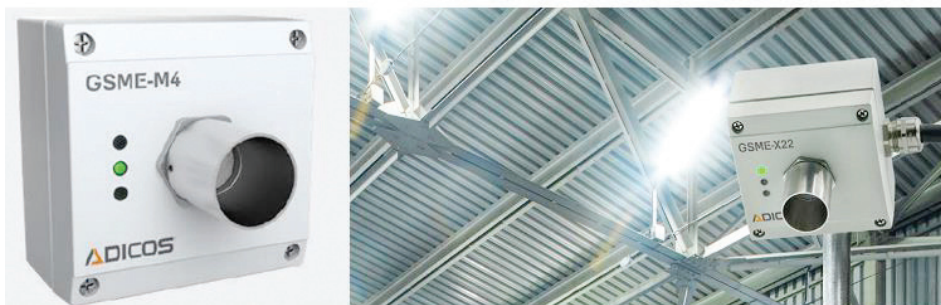


Slika 4: Detekcija vrućih tački pomoću infracrvenog detektora toplote

Faza inicijacije: paljenje i početno sagorevanje. U ovoj početnoj fazi vatra počinje da se razvija iz izvora paljenja. Sistemi za detekciju za ovu fazu uključuju:

Detektore gasa: Detektori gasa su ključni uređaji koji mogu da upozore na prisustvo gasa, rani znak izbijanja požara. U industriji upravljanja otpadom, detekcija gasa je od suštinskog značaja za zaštitu dobrobiti radnika u različitim objektima. Idealni detektori za otkrivanje požara duž zatvorenih transportnih traka, rezervoara, silosa i sličnih konstrukcija su detektori požarnog gasa.

Deponije, na primer, stvaraju gasove kao što su metan (CH₄) i vodonik sulfid (H₂S) tokom razlaganja organskog otpada. Ovi gasovi mogu biti zapaljivi, toksični ili oboje, predstavljajući ozbiljan rizik za radnike. Gasni detektori kontinuirano prate kvalitet vazduha i odmah otkrivaju prisustvo opasnih gasova. Rano upozorenje sa ovih detektora omogućava radnicima da preduzmu hitne mere, kao što je evakuacija ili nošenje odgovarajuće lične zaštitne opreme, čime se smanjuje rizik od izlaganja i potencijalne štete. (slika 5)



Slika 5. Detekcija gasova kritičnih za razvoj požara

Nove generacije detektora imaju četiri poluprovodnička gasna senzora, čija se podešavanja mogu menjati. Koristeći višekriterijumsku tehnologiju, oni prate i procenjuju profil koncentracije karakterističnih požarnih gasova. Njihova robusna konstrukcija štiti ih od oštećenja izazvanih prašinom, prljavštinom i vlagom. Višekriterijumska procena omogućava tačnu identifikaciju smetnji izazvanih prirodnom prašinom ili izduvnim gasovima transportnih vozila i radnih mašina. Uzimajući u obzir uslove na objektima (protok vazduha i sl.), detektori se mogu koristiti u skoro svim delovima unutrašnjeg sistema.

Aspiracioni detektori dima: U velikim skladištima, ključni element zaštite je visoko osetljiv aspiracioni detektor dima. Jedan detektor može pokriti površinu veću od 5.000m², idealno za okruženja sa niskim temperaturama, opasnostima od eksplozije ili područja sa visokim zagađenjem i vlažnošću.

Ventilator usisava vazduh iz posmatrane oblasti ili predmeta kroz otvore za uzorke. Usisani vazduh se kroz cev dovodi do jedinice za evaluaciju procesa, gde ugrađeni senzor dima kontinuirano analizira prisustvo čestica dima i na osnovu parametara izdaje požarni alarm.

Aspiracioni detektor dima može da radi kao samostalna jedinica, da se poveže na mrežu više jedinica ili da bude direktno povezan na sistem za dojavu požara.

Detektori toplote: Detektori toplote su efikasni u otkrivanju naglih promena temperature u oblastima gde se toplota normalno stvara, kao što su kuhinje.

Detektori plamena: Ovi detektori mogu da otkriju ultraljubičasto i infracrveno zračenje koje emituje plamen u ranim fazama razvoja, pružajući dodatno upozorenje o prisustvu požara. (slika 6)



Slika 6. Detekcija požara u ranoj fazi razvoja korišćenjem UV/IR detektora plamena

Ultraljubičasti detektori

Ultraljubičasti (UV) detektori su dobri detektori požara za sve namene jer skoro svi požari emituju UV zračenje. Snop svetlosti se usmerava kroz oblast koju detektor nadgleda, a ako bilo koji objekat blokira svetlost, to će prouzrokovati da se snop prekine i aktivira alarm. Međutim, UV detektori su poznati po svojoj osetljivosti na lažne alarme izazvane elektrolučnim zavarivanjem, rendgenskim zračenjem, munjama i zračenjem iz baklji, bilo direktnog ili reflektovanog zračenja. Ulja i maziva koja formiraju filmove na prozorima instrumenta, koji mogu biti izazvani uljnim prskanjem iz gasnih turbina ili dizel goriva, mogu zaslepiti detektor, kao i niske koncentracije rastvarača u atmosferi. UV detektori plamena su takođe skloni ozbiljnoj degradaciji usled dima.

UV detektori plamena se danas retko koriste zbog širokog spektra izvora lažnih alarma i faktora koji mogu onemogućiti rad uređaja kada je to najpotrebnije.

Jednofrekventni infracrveni detektori

Infracrveni (IR) detektori su uvedeni da bi se ublažili problemi povezani sa UV detektorima. Oni rade tako što detektuju toplotni element vatre (infracrveno zračenje/toplota koju emituje plamen); analizirajući amplitudu i frekvenciju oscilacija plamena. IR detektori plamena rešavaju mnoge probleme lažnih alarma povezanih sa UV detekcijom. Na njih ne utiču ugljovodonični filmovi; međutim, zračenje crnog tela izaziva lažne alarme, a voda na optičkoj površini smanjuje toplotnu energiju vatre, što rezultira smanjenom osetljivošću uređaja. Ogromna većina IR uređaja je dizajnirana da detektuje produkte sagorevanja ugljovodonika – vruće emisije CO₂ i koristi talasnu dužinu detekcije od oko 4,3 / 4,4 mikrona. To dovodi do toga da su neki uređaji osetljivi samo na požar ugljovodonika.

Ovaj tip uređaja može da odbaci prolazne ili periodične izvore infracrvenog zračenja, a da pritom ostane osetljiv na stvarne požare. Međutim, ovaj pristup ne može odbaciti infracrveno zračenje povezano sa refleksijama baklji ili izduvnim gasovima turbine, što može dovesti do lažnih alarma. Ova detekcija takođe omogućava relativno kratke udaljenosti gledanja čak i pre nego što dođe do desenzibilizacije. U okviru svojih dobro shvaćenih ograničenja, ovo je pouzdana i robusna tehnologija.

Kombinovani ultraljubičasti infracrveni UV/IR detektori

UV/IR detektori plamena se široko koriste u industriji zbog visokog nivoa otpornosti na lažne alarme, pošto kombinovane tehnologije nemaju skoro nikakav zajednički izvor lažnih alarma. Ograničenje korišćenja kombinovanih tehnologija takođe može biti značajno jer sve što ometa IR ili UV detektor takođe će uticati na kombinovani uređaj. UV deo uređaja je sklon kontaminaciji uljnom maglom i prljavštinom i često signalizira kvar. U slučaju požara unutar zatvorenog prostora, dim će verovatno „zaslepiti“ UV deo detektora. UV/IR detektori takođe imaju nedostatke IC detektora za jednokratnu upotrebu (lažna uzbuna zbog crnog tela, zaslepljivanje zbog magle/vode) i stoga se tehnologija najbolje koristi u čistim sredinama gde su udaljenosti detekcije obično znatno manje od 30m, u oblastima gde postoje varnice ili plamen, kao što su kuhinje, kupatila, garaže, kotlarnice i radionice. [5]

2.1.2. Izbor opreme prema vrsti goriva

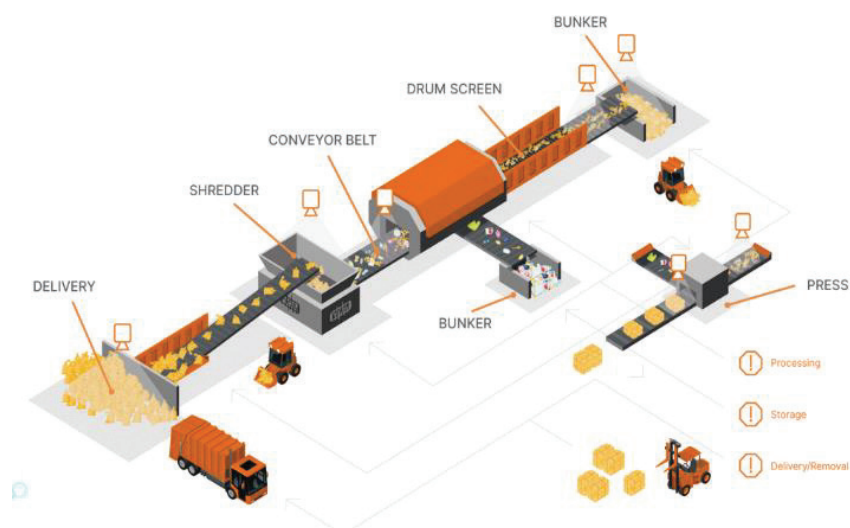
Prilikom odabira detektora plamena, važno je razmotriti hoće li potencijalni plamen biti ugljikovodičnog porekla (eng. Hydrocarbon-based) ili neorganski. Kod ugljikovodičnih plamenova, kombinacija prirodnih gasova i kiseonika proizvodi ugljen-dioksid i vodu. Ova vrsta požara stvara UV signal na 0,2 mikrona i IR signal na 2,7 mikrona i 4,5 mikrona.

Metan i ugljen-dioksid čine 90 do 98% gasa u odlagalištima otpada. Preostalih 2 do 10% uključuje azot, kiseonik, amonijak, sulfidi, vodonik i razni drugi gasovi.

Plamen vodonika proizvodi samo molekule vode i stoga ne vidimo isti CO₂ vrh koji je poznat za plamen ugljovodonika. Odabir detektora plamena koji je podešen za vašu vrstu goriva i intenzitet zračenja obezbediće preciznije otkrivanje plamena. [6]

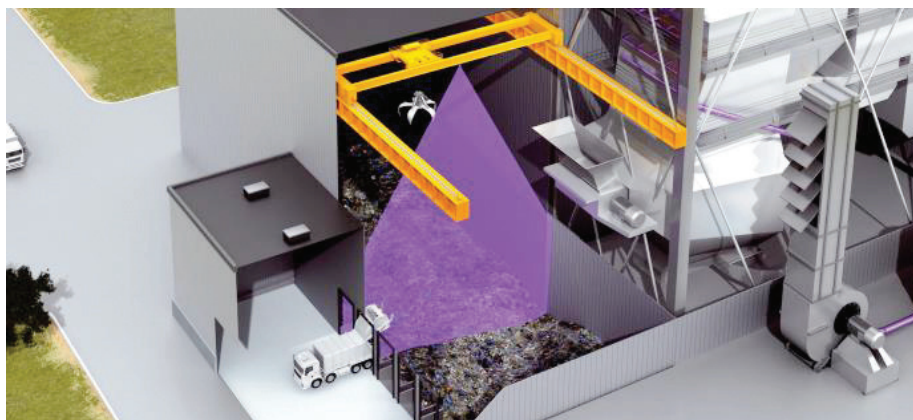
2.1.3. Izbor kritične lokacije za „nadgledanje“ za rano otkrivanje požara i alarm

U industriji upravljanja otpadom, identifikacija i upravljanje kritičnim područjima od velike su važnosti za osiguranje sigurnosti i prevenciju požara. Pet glavnih kritičnih područja unutar ovih objekata predstavljaju značajne rizike i zahtevaju posebnu pažnju i mere zaštite. (slika 7)



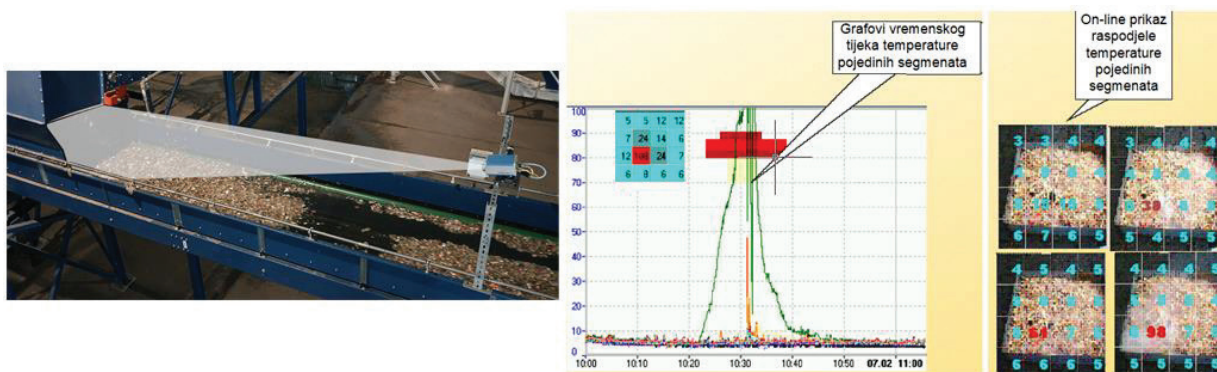
Slika 7. Postrojenje za obradu otpada

Prijemno područje je prvo mesto gdje se otpad prima i istovara. U ovom području često dolazi do brzog nakupljanja velike količine otpada, što može stvoriti rizik od požara zbog trenja i zagrevanja materijala. (slika 8)



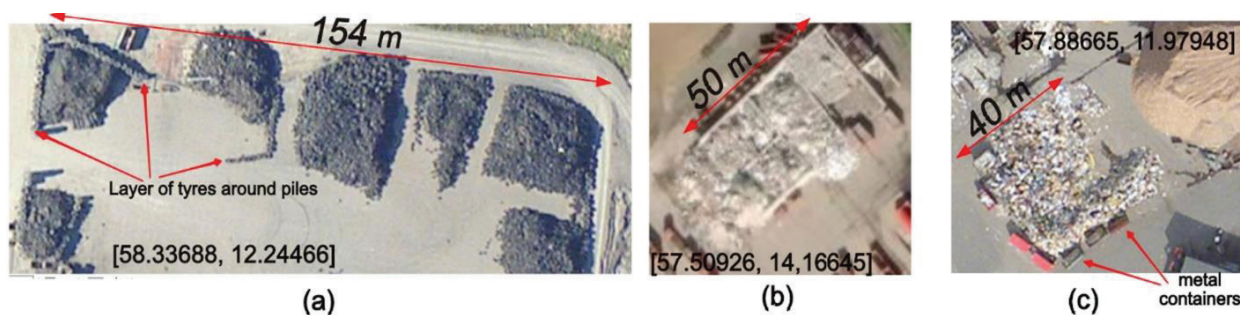
Slika 8. Pozicioniranje detektora za rano otkrivanje požara (detektor toplote ili termalna kamera) na industrijskim dizalicama [7]

Područje obrade/prerade obuhvata razvrstavanje, usitnjavanje, sušenje i dalju preradu otpada. Mašine i oprema koji se koriste u ovim procesima mogu generisati toplotu, što povećava rizik od požara. Mlinovi dizajnirani za fino mlevenje treba da budu pregledani od strane kvalifikovane osobe za potencijalne opasnosti od eksplozije u skladu sa zahtevima za zaštitu od eksplozije. One zavise od dizajna mlina, verovatnoće akumulacije prašine i bezbednosnih karakteristika materijala koji se obrađuju. Tipično kritične lokacije su na pokretnim trakama, koje bi trebalo da se mogu uključiti i isključiti pomoću uređaja za hitno zaustavljanje sa bezbedne lokacije. (slika 9)



Slika 9. Zaštita transportnih traka korišćenjem inteligentnog ranog otkrivanja požara [8]

Skladišno područje je mesto gde se otpad privremeno skladišti pre daljeg transporta ili obrade. Neodgovarajuće skladištenje različitih vrsta otpada može dovesti do spontanog zapaljenja, što predstavlja značajnu pretnju. Spoljna skladišna područja su kritična područja gde se često skladišti velika količina otpada, što predstavlja značajan požarni rizik. Zbog otvorenog prostora i uticaja različitih vremenskih uslova, kao što su vetar i visoke temperature, požari se mogu brzo proširiti, ugrožavajući ne samo sam otpad, već i infrastrukturu, opremu i osoblje na lokaciji. (slika 10)



Slika 10. primer privremenog skladišta otpada

Bunker za otpad su kritična područja zbog kontinuiranog punjenja i pražnjenja, što može uzrokovati trenje i stvaranje toplote, čime se povećava rizik od požara. Prisutnost različitih zapaljivih materijala dodatno povećava opasnost.

Područja za skladištenje goriva iz otpada skladište otpad visoke kalorične vrednosti. Požari u ovim područjima mogu biti izuzetno intenzivni i teški za kontrolu, što predstavlja veliku opasnost za objekte i osoblje.

Uvođenjem odgovarajućih mera zaštite i naprednih sistema za rano otkrivanje požara, moguće je značajno smanjiti rizik i osigurati sigurnost unutar objekata za gospodarenje otpadom.

Uvođenjem odgovarajućih mera zaštite i naprednih sustava za rano otkrivanje požara, moguće je značajno smanjiti rizik i osigurati sigurnost unutar objekata za upravljanje otpadom.

2.1.3. Izbor pozicije montiranja opreme za rano otkrivanje i dojavu požara

Odabir odgovarajuće pozicije za montiranje opreme ključan je za osiguranje pravovremene i učinkovite detekcije požara. Potrebno je uzeti u obzir raspon detekcije, veličinu požara, vrstu goriva i konus vidnog polja detektora.

Preporuke Waste Industry Safety and Health (WISH) Foruma pretočene su u smernice MUP-a koje uključuju:

Minimalna udaljenost između otpada i zgrada: 10 metara (osim ako je zgrada zaštićena siste-

mom za gašenje vodom ili ako je otpad u zatvorenom prostoru).

Minimalna udaljenost između dve gomile otpada - pet metara.

Maksimalni volumen pojedinih gomila - 2000m³ za rasuti otpad.

- 1600m³ za balirani otpad (važi za zatvoreni prostor).

Maksimalna visina hrpa - pet metara za rasuti otpad, četiri metra za balirani otpad (vredi i za zatvoreni prostor).

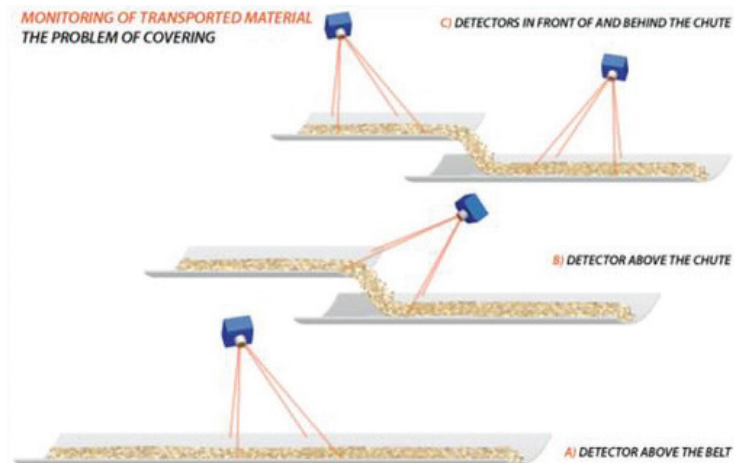
Maksimalna širina pojedinačne gomile - 40 metara ako je moguće pristupiti s obe strane (maksimalna površina 40m x 10m), 20 metara ako je moguće pristupiti samo s jedne strane (maksimalna površina 20m x 20m).

Maksimalna površina pojedinačne gomile - 400m².

Parametri za više redova otpada:

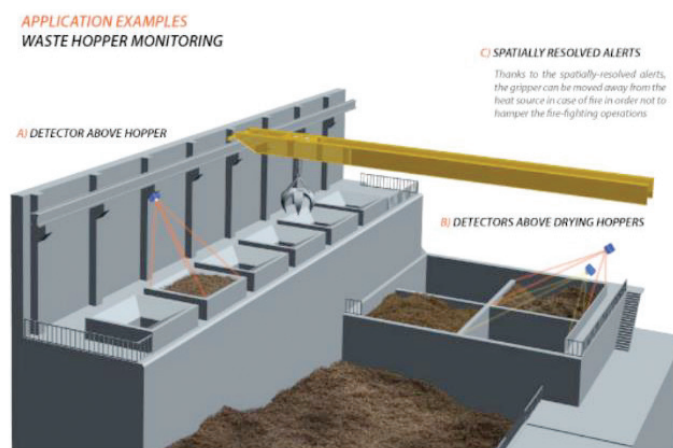
Maksimalno 1600m², četiri reda međusobno udaljena najmanje pet metara. Udaljenost između redova otpada iznosi 20 metara, osim ako je postavljen sistem zaštite. Ako je prostor ispunjen negorivim materijalom, mora biti omogućen pristup vatrogasnim vozilima.

Vidljivost: Detektoru mora uvek imati jasan, nesmetan pogled na instalaciju koja se nadzire. Ako je objekt koji se nadzire zaklonjen ili nije u vidokrugu, uređaj neće moći detektovati nikakve izvore toplote i pokrenuti alarm. Prilikom transporta zapaljivih stvari na sistemima za transport, uvek postoji rizik od širenja vrućih tačka. (slika 12)



Slika 12. Praćenje transportovanog materijala. Problem vidljivosti

Ako se iskrice unesu iz oštećenih mlinova ili ako je materijal već zapaljen, potrebno je izvršiti pouzdanu detekciju pre skladištenja. U tu svrhu, korištenje infracrvenih detektorskih nizova je proverena metoda. Zahvaljujući brznoj brzini odgovora u kombinaciji s visokom osetljivošću i lokalnom rezolucijom, može se otkriti tinjanje blizu površine.



Slika 13. Praćenje rezervoara za otpad

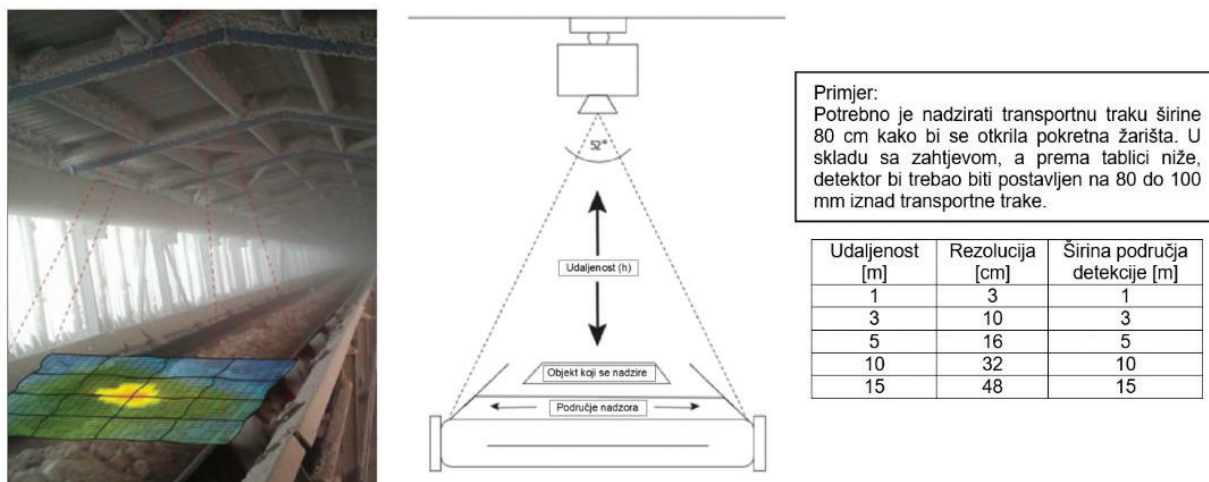
Moguće prekrivanje tinjajućeg materijala nezapaljenim materijalom treba uzeti u obzir. Iako je u takvim slučajevima moguće da se materijal koji je iznad takođe zagreje na način da postane vidljiv na površini, detektori se mogu postaviti na način da, na primer, nadgledaju izlaznu paraboličnu putanju iz kontejnera kako bi se osigurala pouzdana detekcija i u drugim slučajevima. Alternativa koja je manje sklona kontaminaciji je postavljanje dva detektora neposredno ispred i iza kontejnera. Ovaj raspored koristi činjenicu da je vruća tačka koja je verovatno skrivena na prvom transporteru barem delimično vidljiva na površini nakon prenosa i stoga postaje detektabilna.

Za rano otkrivanje oštećenja postrojenja, npr. na sistemu za transport u prostorijama s visokim plafonima, jakom ventilacijom ili na otvorenom, koriste se infracrveni detektorski nizovi. Pri tome se fokus stavlja na scenarije oštećenja poput pregrevanja pogonskih valjaka, pregrevanja motora. Zahvaljujući odgovarajućoj parametriizaciji pojedinačnih polja niza, detektor pravovremeno reaguje pre nadolazećeg pregrevanja postrojenja te dodatno upozorava u slučaju požara u okolini postrojenja ili ako se transportuje materijal koji tinja.

Međutim, u svakom slučaju treba uzeti u obzir da se nadziru samo oni objekti koji imaju „vizuelni kontakt“ s detektorom. U slučaju velikih osenčenih površina, detektori s različitim uglovima gledanja treba da se postave gde je to potrebno. (slika 13)

Udaljenost i područje detekcije

Područje detekcije određuje se prema udaljenosti između detektora i objekta koji se nadzire. Stoga bi udaljenost ili mesto postavljanja trebalo odabrati tako da detektor svojim vidnim poljem može u potpunosti pokriti objekt/područje koji se nadzire. Time se osigurava maksimalna osetljivost. (slika 14)



Slika 14. Primer detekcije vrućih tačaka upotrebom detektora toplote

3. ZAKLJUČAK

Kako bi se efikasno smanjili rizici i osigurala bolja zaštita u industriji upravljanja otpada, potrebno je implementirati specijalizovane sisteme za rano otkrivanje i dojavu požara. Aspiracijski sistemi, termografske kamere, infracrveni detektori toplote, detektori plamena i detektori gasova ključni su elementi ovih sistema. Ova oprema omogućuje rano otkrivanje požara u fazama pregrevanja ili tinjanja, što je ključno za sprečavanje širenja požara na veći deo objekta i minimaliziranje šteta.

Uvođenje ovih sistema zahteva pažljiv odabir i postavljanje opreme na kritične tačke, kao što su prijemna područja, područja obrade, skladišna područja i bunker za otpad. Rano otkrivanje požara omogućuje brzu reakciju i gašenje požara u njegovoj najranijoj fazi, čime se smanjuje rizik za osoblje, infrastrukturu i okolinu.

Primjenom smernica opisanih u ovom radu, ne samo da se poboljšava sigurnost objekata i ljudi, već se i smanjuju finansijski gubici uzrokovani zastojećima u radu i troškovima obnove, pomaže se u održavanju stabilnosti poslovanja. S obzirom na složenost i opasnosti povezane s industrijom gospodarenja otpadom, ulaganje u napredne sisteme za detekciju i prevenciju požara predstavlja ključni korak prema održivom i sigurnom poslovanju.

LITERATURA

[1] Zakon o upravljanju otpadom, „Službeni glasnik RS”, br. 36 od 15. maja 2009, 88 od 23. novembra 2010, 14 od 22. februara 2016, 95 od 8. decembra 2018 - dr. zakon, 35 od 29. aprila 2023., Preuzeto 23.05.2024. s:

(<https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2009/36/14/reg>)

[2] Program upravljanja otpadom u Republici Srbiji za period 2022-2031. godine

(“Sl. glasnik RS”, br. 12/2022) Preuzeto 15.07.2024. s:

http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2022_02/SG_012_2022_010.htm

[3] Agencija za zaštitu životne sredine, Upravljanje otpadom, Preuzeto 15.07.2024. s: <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=207&id=202&akcija=showXlinked>

[4] O. Linden, „FIRE ALARM TECHNOLOGY Technologies for combating false alarmsI”, Wagner Group GmbH, Basepoint Business Centre, 2015. Preuzeto 23.5.2024. s :

<https://www.wagnergroup.com/en-gb/knowledge/knowledge-portal/fire-alarm-technology.html>

[5] E. Naranjo, „Select the right flame detector“, Emerson Automation Solutions, 2019. Preuzeto 16.07.2024. s: <https://www.emerson.com/documents/automation/article-select-right-flame-detector-en-5429708.pdf>

[6] Shalom education, „Combustion of Fossil Fuels“, educational service provide, b.d. Preuzeto 16.07.2024. s: <https://www.shalom-education.com/courses/gcsechemistry/lessons/earths-and-atmospheric-science/topic/combustion-of-fossil-fuels/>

[7] SICK Sensor Intelligence, „Industrial crane positioning in waste bunkers“, SICK Sensor Intelligence, b.d. Preuzeto 17.06.2024. s: <https://www.sick.com/tr/en/catalog/process-automation/waste-and-recycling/industrial-crane-positioning-in-waste-bunkers/c/p371203>

[8] ORGLMEISTER Infrarot-Systeme, „Waste disposal and recycling Systematic fire prevention for highly dynamic fire loading“, ORGLMEISTER Infrarot-Systeme, b.d. Preuzeto 18.07.2024.

s: <https://www.orglmeister.de/en/fire-prevention-waste-recycling/>

TEHNIČKO OBRAZOVANJE I INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE

Ranko Vojinović

Podgorica

KRATAK SADRŽAJ

Razvoj ljudske misli, odnosno obrazovanje, tijesno je povezano sa tehnološkim napretkom. Nova saznanja utiču na stvaranje novih tehnoloških rješenja koja mijenjaju svijet. Važi i obrnuto, tehnološki napredak utiče i mijenja način obrazovanja. Naime, tehnološke promjene nužno prate promjene zanimanja sa novim znanjima. To zahtijeva promjene u obrazovanju, fleksibilnost nastavnih programa i novu opremu.

U ovom radu će biti analizirani međusobni uticaji procesa obrazovanja sa tehnološkim razvojem, odnosno industrijskim revolucijama, uz naglašavanje potrebe za približavanje obrazovnog procesa ljudskoj prirodi, odnosno potrebi da se obrazovni proces što više humanizuje.

Ključne riječi: Industrijske revolucije, Obrazovanje, Digitalna revolucija, Humanizacija obrazovanja

1. UVOD

Promjene u procesu razvoja ljudske misli dovode i do promjena u naučno-tehnološkom napretku ljudskog društva. U dosadašnjem razvoju društva primjena znanja na različita područja ljudske djelatnosti uslovlila su nastanak četiri koncepcije razvoja: (1) poljoprivredno društvo, u kojem su znanja primijenjena na sredstva za pojačavanje fizičke snage čovjeka; (2) industrijsko društvo, u kojem je znanje primijenjeno na proizvodne procese i proizvode; (3) informatičko društvo, u kojem je znanje primijenjeno na sredstva za umnožavanje snage ljudskog uma i (4) društvo znanja, u kojem je znanje primijenjeno za jačanje mašte i kreativnosti čovjeka.

Tehnička revolucija označava skokovitu promjenu koja donosi značajne promjene tehnologije, proizvoda, procesa i načina rada. Tehnološki razvoj bilježi četiri industrijske revolucije. Prva revolucija je bila zasnovana na snazi vode, druga na snazi električne energije, treća na razvoju računara, telekomunikacija i Interneta. Četvrta revolucija, ne zasniva se na posebnom revolucionar-

nom skoku, već označava pokretanje potpune automatizacije procesa proizvodnje, koji integrišu računarske tehnologije, prenos i obradu podataka, sa savremenim mehaničkim sistemima.

U ovom radu će biti analizirani međusobni uticaji razvoja ljudske misli, odnosno procesa obrazovanja sa tehnološkim razvojem, odnosno industrijskim revolucijama. Pregled razvoja ljudske misli dat je u odjeljku 2. Pisanje ovog odjeljka je zasnovano na kapitalnom djelu M. Perovića Istorija matematike, [1], u kojem je prikazan istorijski pregled, ne samo matematike, već i ostalih dostignuća ljudske misli, iz oblasti filozofije, umjetnosti i religije. U odjeljku 3, uz pomoć referenci [2], [3], [4], [5] i [6] dat je pregled i osnovne karakteristike industrijskih revolucija, U odjeljku 4, uz oslanjanje na reference [7], [8], [9], [10], [11], [12], i [13], je analizirana međusobna povezanost savremenog obrazovanja sa četvrtom tehnološkom revolucijom, uz naglašavanje potrebe za približavanje obrazovnog procesa ljudskoj prirodi, odnosno potrebi da se obrazovni proces što više humanizuje.

2. RAZVOJ LJUDSKE MISLI

U razvoju ljudskog društva, razlikuju se dvije epohe: istorijska i predistorijska epoha. Predistorijska epoha, o kojoj znamo na osnovu arheoloških istraživanja, trajala je znatno duže od istorijske, i ona obuhvata period od pojave čovjeka kao razumnog bića, sve do pojave pisma, odnosno sve do pojave prvih istorijskih izvora.

U predistorijskoj epohi, čovjek je najviše vremena proveo u kamenom dobu, nazvanom po oruđima i oružjima od kamena koje je pravio u tom periodu. Početkom petog milenijuma prije nove ere (p.n.e), počinje metalno doba, u kojem čovjek proizvodi metal i pravi metalna oruđa i oružja. Tada se javljaju i prve civilizacije, odnosno ljudska društva sa pravilima i institucijama, a onda, oko 3.200 godina p.n.e i prva pisma.

Smatra se da su prve civilizacije nastale u Egiptu i Mesopotamiji. U Egiptu je, prije pojave pisma, napravljen prvi kalendar, iz čega zaključujemo da je i prije pojave pisma egipatska civilizacija posjedovala znanja iz astronomije i matematike. Egipatsko pismo, nastalo početkom trećeg milenijuma p.n.e je bilo slikovno, pri čemu je svaka sličica predstavljala riječ ili glas. Egipatski vladari, faraoni, su tokom trećeg milenijuma p.n.e sagradili piramide, građevine koje po svojoj arhitektonskoj složenosti i impozantnoj veličini, i u današnjem vremenu predstavljaju građevinsko čudo.

Mesopotamijska civilizacija, možda i starija od egipatske, je nastala između rijeka Tigra i Eufrat. U plodnoj ravnici, na raskršću važnih trgovačkih puteva, naseljenom različitim narodima, oko 3.000 godina p.n.e. nastaju i prvi gradovi, od kojih je najpoznatiji Vavilon. Vavilon je dostigao svoj vrhunac oko 1.700 godine p.n.e, za vrijeme Hamurabija, poznatog po zakonu koji je počivao na surovom principu "oko za oko, zub za zub".

Nastanak nauke, filozofije i matematike, vezan je za grčku civilizaciju. Grčka (antička) civilizacija obuhvata period između VI vijeka p.n.e. do VI vijeka nove ere. Jedna od glavnih karakteristika grčke civilizacije je stvaranje slike svijeta zasnovanom na iskustvu i razumu. Iako su istovremeno, u drugim krajevima svijeta, (Kina-Konfučije, Indija-Buda) događaju velike promjene u razvoju ljudske misli, nijedna od njih nije u toj mjeri zasnovana na racionalizmu kao grčka kultura, filozofija i nauka.

Grčka literatura, kao glavni element grčke kulture, predstavlja osnov za kasniji razvoj svjetske književnosti. Homer, pisac Ilijade i Odiseje, je ova remek-djela stvorio osam stoljeća p.n.e. Racionalizam se kod Homera ogleda u tome što se bogovi ponašaju kao ljudi, vole, mrze, svađaju se, teže da zadovolje sopstvene interese, i od njih se suštinski razlikuju po tome što su besmrtni.

Jonski Grci, koji su u XX vijeku p.n.e. naselili Malu Aziju, bili su prvi matematičari. Tales, koji je otkrio najstariju pojavu u vezi sa elektricitetom, osnovao je prvu filozofsku i matematičku školu u vremenu između 640. i 546. godine p.n.e. Pitagora (585. godine p.n.e), koji se smatra začetnikom savremene matematike, je ustanovio deduktivni metod zaključivanja, kao osnov na kojem mora

biti zasnovana matematika i nauka uopšte. Osnovao je zatvoreno filozofsko društvo, gdje se izučavala filozofija i matematika. Društvo je bilo prototip škole kao institucije, i trajalo je vijek i po.

Grčka nauka i kultura dostižu vrhunac u doba Perikla (495-429. p.n.e). Nepojmljivo je da je Atina, sa nekoliko stotina hiljada stanovnika, stvorila toliko značajnih djela u nauci i kulturi, čime je postavila temelje današnje evropske civilizacije. Pisci Eshil, Sofokle i Euripid, filozofi Sokrat, Platon i Aristotel, postavili su obrasce književnosti i filozofije koji važe i danas.

Platon je 388. godine p.n.e. izgradio sopstvenu školu, u šumi koja je nosila ime mitološkog junaka Akadema. Zato je škola dobila naziv Akademija, i od nje potiče termin akademsko obrazovanje. Akademija je bila preteča evropskih univerziteta, jer su se u njoj izučavale sve postojeće nauke. Trajala je oko 800 godina, sve dok je nije 529. godine ukinuo vizantijski car Justinijan, štiteći hrišćanske dogme od slobodoumnih učenja u Akademiji.

Helenska epoha se završava oko 340. godine p.n.e, osvajanjem Grčke od strane Filipa Makedonskog. Njegov sin Aleksandar, počinje sa osvajanjima koje svijet do tada nije vidio. Da bi mogao kontrolisati ogromno carstvo koje je stvorio, Aleksandar ujedinjuje Grke i narode sa osvojenih teritorija, i na taj način stapa njihove kulture sa grčkom. Na ušću Nila u Sredozemno more, gradi Aleksandriju, koja je postala glavni centar tadašnje civilizacije. Glavno obilježje novog, velikog grada je bila biblioteka i prvi univerzitet u istoriji - Muzej. Muzej je bio državna ustanova, gdje su živjeli i radili naučnici, ljekari, astronomi, geografi, matematičari, lišeni svih svakodnevnih briga, posvećeni jedino nauci.

Pored Muzeja se nalazila biblioteka, svjetsko čudo tadašnjeg svijeta. U njoj su se nalazile skoro sve knjige tadašnjeg svijeta, u kojima su bila sadržana sva dotadašnja znanja koje je čovjek spoznao. U njoj su radili takvi umovi kao što je Ptolomej i Eratosten. Uništenje aleksandrijske biblioteke, prouzrokovano propašću tadašnje civilizacije, predstavlja jednu od najvećih katastrofa koje je zadesilo čovječanstvo u njegovoj istoriji. Trebalo je hiljadu godina, poslije te katastrofe, da se naučna misao oporavi.

Zlatni vijek antičke matematike veže se za aleksandrijsku matematičku školu, koja je trajala skoro osam vjekova. Euklid (330-270. p.n.e) i Arhimed (287-212. p.n.e), smatraju se najvećim umovima koji su živjeli na zemlji. Euklidovi Elementi, predstavljaju osnov moderne geometrije, koja se i danas izučava. Arhimed, sa svojim otkrićima iz matematike, fizike i tehnike se smatra jednim od najvećih matematičara i fizičara u ljudskoj istoriji. Matematičarima je trebalo dvije hiljade godina da odu dalje od Arhimeda. Stvorio je osnove diferencijalnog računa, koji će usavršiti evropski matematičari dvadeset vjekova kasnije. Otkrio je zakon poluge, čime je postavio osnove statike. Arhimedov zakon iz hidrostatičke predstavlja temeljni zakon mehanike fluida. Arhimedova nasilna smrt od strane rimskog vojnika, je označila kraj grčke matematike i predstavlja simbol njene smrti u Rimskoj imperiji.

Rimsko carstvo, najmoćnije u ljudskoj istoriji, doživjelo je svoj uspon za vrijeme iveratora Oktavijana (63. p.n.e - 71. n.e). Moćna imperija je razvijala moćnu arhitekturu i građevinske projekte. U Rimu je sagrađen amfiteatar za 50.000 gledalaca (Koloseum), veliki broj puteva i akvaduta kojim su se veliki gradovi snabdijevali vodom.

Rimsko obrazovanje se svodilo na korisne, praktične, vještine. Za razliku od Grčke, nijesu se cijele matematika, prirodne nauke, filozofija i literatura. Za dvanaest vjekova svoje istorije, Rimljani nijesu dali ni jednog značajnog matematičara ni prirodnjaka.

Rimski car Teodosije je 380. g. prihvatio hrišćanstvo kao državnu religiju rimskog carstva. Zabranio je mnogobožstvo, i naredio rušenje grčkih hramova. Problemi koje su mučili veliku imperiju u opadanju, bolesti, glad, ratovi, netrpeljivost hrišćanstva prema svim ostalim religijama, doprinijeli su i uništenju Aleksandrije. Zadnja upravnica aleksandrijske biblioteke je bila Hepatija, žena-matematičar. Optužena je da je vještica, i po nalogu aleksandrijskog episkopa Kirila, rastrgnuta je na ulici. Njena smrt je označila netolerantnost hrišćanske crkve prema svakom nezavisnom razmišljanju i naučnom mišljenju. Svijet je počeo da tone u srednjovjekovni mrak.

Raspadom Rimskog carstva, stvorene su tri cjeline sa različitim kulturama. U zapadnoj Evropi, hišćanska kultura na latinskom jeziku, sa središtem u Rimu. U Vizantiji, istočnom dijelu bivše rimske imperije, hrišćanska kultura na grčkom jeziku, sa središtem u Konstantinopolju (Carigradu). Na srednjem istoku i afričkoj obali Sredozemnog mora, vladali su Arapi, i razvijala se islamska kultura na arapskom jeziku. Islamska nauka i kultura se oslanjala na antičku. Arapi su u matematici uveli brojeve koji se i danas koriste, naučili kako se pravi papir, i razvijali su izdavačku djelatnost. Biblioteka u Kairu je imala preko dva miliona knjiga. U Fesu (Maroko), 859. godine, je osnovana medresa sa doktoratom kao najvišim stepenom stečenih znanja. Arapi su sačuvali djela antičkih klasika, kada su vizantijski carevi na istoku, zbog hrišćanskih dogmi, unštavali ostatke grčke kulture.

Srednji vijek je bilo vrijeme kada je ljudski duh bio sapet, a um okovan. Vrijeme u kojem su sva odstupanja od dogmatskih učenja koja je propisivala crkva, bila surovo kažnjavana. U nauci nije postojala ni mogućnost primisli da su u osnovi prirodnih pojava zakoni fizike.

Svijetlo u srednjovjekovnom mraku se počelo nazirati otvaranjem prvog univerziteta u svijetu, u Bolonji 1088. godine, koji je utro put za njihova dalja osnivanja. U prilogu 1. navedeno je pet najstarijih svjetskih univerziteta. Božanstvena komedija Dantea, 1300. godine, najavljuje izlazak iz srednjovjekovnog mraka. Gutenberg je 1447. je napravio mašinu za štampanje. Ovaj pronalazak predstavlja jedan od najznačajnijih događaja u ljudskoj istoriji. Knjige su se do tada samo prepisivale. To su obično radili sveštenici u manastirima, i proces prepisivanja je trajao mjesecima. Zbog toga su knjige bile veoma rijetke i skupe. Praktično je cjelokupno dostupno znanje bilo u rukama bogatih ljudi i crkve. Običan narod nije mogao doći do knjige, pa je bio primoran da se oslanja na svoje pamćenje i usmena predanja, dok su mu svaka druga znanja bila nedostupna i uskraćena. Nije bilo razmjene ideja i znanja. Razvoj ljudske misli, i razvoj ljudskog društva bio je zbog toga veoma spor. Ova nova tehnologija je bila revolucionarni pronalazak. Knjige su se mogle lako štampati i objavljivati, i postale su svima dostupne. Pismenost se širila, i sa njome i ideje renesanse, prekretnice u razvoju ljudske misli, nauke i umjetnosti.

Renesansa je započela u XIV vijeku u Firenci. Renesansa označava promjene u umjetnosti i kulturi, čovjek se oslobađa okova dogmi, okreće sebi, i svojim željama za slobodom i za spoznajom svijeta. Kultura proistekla iz renesanse, humanizam, potpuno je okrenuta čovjeku i njegovom životu na zemlji.

Leonardo da Vinči je bio glavna ličnost renesanse. Slikarski genije, koji je mogao da piše istovremeno sa obje ruke, bio je i matematičar, anatom, izumitelj, i bio je jedan od najvećih ljudi u istoriji čovječanstva.

Renesansa je stvorila preduslove za naučnu revoluciju. Ovaj termin se pojavio krajem sedamnaestog vijeka, i od tog vremena počinje moderni čovjek i moderna istorija.

Kopernik postavlja heliocentričnu teoriju, po kojoj se, nasuprot dotadašnjem učenju, Zemlja okreće oko Sunca. Kepler definiše zakone kretanja planeta, a Galilej u nauku uvodi eksperiment, i postavlja temelje modernoj fizici.

Isak Njutn 1687. godine objavljuje knjigu Matematički principi prirodne filozofije, najuticajnijiu knjigu iz nauke, ikada napisanu. U njoj je formulisao tri zakona kretanja (osnovne zakone mehanike) i zakon gravitacije. Ova knjiga predstavlja konačan trijumf nauke, i označava početak njene ere, u obliku kojeg danas poznajemo. Njutn, vjerovatno najpametniji čovjek koji je hodao zemljom, zajedno sa Lajbnicom, daje osnove diferencijalnog i integralnog računa, najmoćnijeg alata nauke, kojeg je stvorio čovjek, i koji je inicirao, poslije hiljadugodišnjeg zastoja, eksplozivni razvoj matematike, a samim tim i fizike i tehnike, a samim tim i ljudskog društva.

Kepler i Njutn su bili nosioci još jednog preokreta u ljudskoj istoriji: otkrili su da prirodom upravljaju jednostavni zakoni, koji se mogu opisati matematičkim formulama, i da ti isti zakoni važe i na Zemlji i na nebesima. Takođe su otkrili da postoji usaglašenost između načina na koji čovjek misli i načina na koji priroda djeluje. Sadašnja civilizacija, naš pogled na svijet i naše sadašnje djelatnosti,

u potpunosti počivaju na njihovoj genijalnosti.

Naučna revolucija je dovela do naglog razvoja nauke i tehnike. i do početka industrijskih revolucija. Na zakonima termodinamike, koje otkrivaju Bolcman i Karno, zasniva se razvoj toplotnih mašina. Na osnovu radova Ampera i Faradeja, Maksvel formuliše svoje četiri jednačine elektrodinamike, koje se po značaju mogu uporediti sa Njutnovim zakonima kretanja. Teslini pronalasci iz radiotehnike, a posebno iz oblasti naizmjeničnih struja, iz korijena mijenjaju proizvodne procese i način života ljudi. Ajnštajnovi radovi, iz oblasti izučavanja prirode svjetlosti, prostora i vremena, s početka dvadesetog vijeka, unose još jednu revoluciju u način razmišljanja čovjeka, i utiru put novim pravcima razvoja fizike: nuklearnoj i kvantnoj fizici, odnosno pronalascima tranzistora i mikroprocesora. Počinje digitalno doba. Otkriće Interneta čini informacije i znanja lako dostupnim. Razvija se novi oblik ljudskog društva - društvo znanja.

3. INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE

Revolucija (latinski *revolutio*-preokret) je pojam koji definiše promjenu moći ili organizacione strukture, koja se odvija u vrlo kratkom vremenskom periodu. Revolucije, koje su se dešavale u istoriji, obično su bile oružane, i imale su za posljedicu velike promjene u društvu, političkom sistemu, ekonomiji i kulturi.

Revolucije nijesu bile samo vezane za oružane prevrate i promjene političkog sistema. Primjer za to su industrijske revolucije. One su imale ogromni uticaj na razvoj ljudskog društva, tako da ih neki ekonomski historičari tretiraju kao događaje uporedive sa otkrićem vatre, točka, pripitomljavanjem životinja i uzgojem biljaka.

Industrijska revolucija označavaju preokret u proizvodnoj tehnici izazvan pronalascima i primjenom novih uređaja za rad i proizvodnju, koji su omogućili organizaciju proizvodnje u velikim razmjerima.

U istoriji se prepoznaju četiri industrijske revolucije.

Prva industrijska revolucija nastala je u Engleskoj u XVIII vijeku u tekstilnoj industriji. Njenim pokretačem se smatra parna mašina, koju je izumio Džejms Vat 1769. godine. Druga industrijska revolucija nastala je u SAD-u u drugoj polovini XIX vijeka. Karakterišu je nafta i posebno električna energija, kao nove pogonske sile. Pokretačem druge industrijske revolucije smatra se trofazni sistem naizmjenične struje, kojeg je pronašao Nikola Tesla 1887. Treća industrijska revolucija, ili Digitalna revolucija, počinje pedesetih godina prošlog vijeka, prelaskom sa analogne elektronike i mehaničkih uređaja na digitalne tehnologije. U toku je Četvrta industrijska revolucija, ili Industrija 4.0 započeta u XXI vijeku, koja predstavlja nastavak digitalne revolucije. Karakterišu je napredni roboti, virtuelna stvarnost, vještačka inteligencija i napredni materijali.

3.1. Prva industrijska revolucija (1760-1830)

Prije prve industrijske revolucije većina ljudi je živjela u malim, ruralnim zajednicama, i to od stočarstva i poljoprivrede. Proizvodnja se zasnivala na zanatstvu, i odvijala se u kućama ili malim zanatskim radionicama. Pri tome su korišćeni ručni alati ili vrlo jednostavne mašine. Kao što smo rekli, prva industrijska revolucija započela je u Engleskoj u XVIII vijeku. Engleska je u to doba bila jedna od najmoćnijih država u svijetu. Predstavljala je stabilno političko društvo, i imala je brojne kolonije. Kolonije je koristila kao izvor sirovina, naročito uglja i gvožđa, ali isto tako i kao veliko tržište za proizvedenu robu. Zbog tih razloga, nije slučajno što je prva industrijska revolucija nastala baš u Engleskoj.

Kako je zbog povećane potražnje rasla i potreba za povećanjem količine proizvedene robe, odnosno za bržim i efikasnijim načinom proizvodnje, javila se fabrička proizvodnja. Kako je u tom vremenu proizvodnja tekstila bila jedna od najrazvijenijih grana privrede, prvo se u njoj javila

potreba za unapređenjem načina proizvodnje, odnosno za uvođenjem mašina koje će zamijeniti rad ljudi. Javila se potreba za industrijalizacijom. Pronalazak koji je pokrenuo prvu industrijsku revoluciju bila je parna mašina. Parna mašina je zamijenila snagu čovjeka, na kojoj se uglavnom bazirao rad dotadašnjih mašina. Korišćenjem parne mašine za pokretanje drugih mašina, dovelo je do daljeg razvoja u industriji. Dalji iskorak u industrijskom razvoju je bila primjena parne mašine kao pogonskog sredstva za pokretanje lokomotiva i brodova. Na taj način, počeo se naglo razvijati saobraćaj i transport. Sirovine i proizvedena roba se mogla brzo prevoziti u razne krajeve svijeta, a ljudi su mogli putovati brže i udobnije.

Industrijalizacija se iz Engleske brzo proširila na Belgiju, Francusku, Njemačku, i na kraju na Sjedinjene Američke Države. Do početka XX vijeka, SAD su pretekle Englesku, i postale vodeća svjetska industrijska sila.

Prva industrijska revolucija donijela je veću količinu i raznolikost proizvoda, ali isto tako je podigla i životni standard ljudima, posebno pripadnicima srednje i više klase. Zbog migracija stanovništva sa sela u gradove, došlo je razvoja urbanizacije, i stvaranja velikih gradova.

Međutim, iako je industrijalizacija povećala ukupnu ekonomsku proizvodnju i poboljšala životni standard srednje i više klase, siromašnijem sloju stanovništva, kao i najvećem broju radnika u proizvodnji, život je i dalje bio težak. Mehanizacija rada stvorena tehnološkim inovacijama učinila je rad u fabrikama jednoličnim i često opasnim, a mnogi radnici bili su prisiljeni raditi satima za bijedne plate. Takve dramatične promjene podstakle su protivljenje industrijalizaciji.¹

Razvoj industrije, osim podizanja standarda, imao je još jednu bitnu posljedicu: potrebu za novim znanjima i promjenu načina obrazovanja. Naime, kako je rukovanje sve složenijim mašinama, iziskivalo potrebu za novim radnim vještinama, pojavila su se nova zanimanja. Trebalo je ljude za njih osposobljavati. Osim toga, bila su potrebna i nova znanja neophodna za dalje usavršavanje mašina i unapređenje tehnoloških procesa. Zbog toga se i način obrazovanja morao prilagođavati novim okolnostima, proizašlim iz prve industrijske revolucije.

3.2. Druga industrijska revolucija (1870-1914)

Druga industrijska revolucija je zbog brojnih tehnoloških pronalazaka poznata i pod nazivom tehnološka revolucija.

Sva značajna otkrića, vezana za drugu industrijsku revoluciju, desila su se u kratkom vremenskom periodu. Na primjer, Besmerov proces proizvodnje čelika iz 1856. godine, čime počinje razvoj novih materijala, pronalazak benzinskog motora sa unutrašnjim sagorijevanjem 1862, koji je postao osnov za kasniji razvoj automobilske industrije, te otkriće telefona 1876. godine, kojim počinje era razvoja telekomunikacija, desili su se u razmaku od dvadeset godina.

Međutim, kao glavni pokretač druge industrijske revolucije smatra se električna energija. Najznačajniji pronalasci iz ove oblasti, vezani su za naizmjenični sistem višefazne struje, koji je Nikola Tesla patentirao 1888. godine. Tesla je svojim pronalaskom obrtnog magnetnog polja, generatora naizmjenične struje, visokonaponskog transformatora i asinhronog motora, stvorio uslove za generisanje električne energije, njenog prenosa na daljinu, i njenog korišćenja kao pogonskog sredstva.

Zahvaljujući mašinama na električni pogon, Druga tehnološka revolucija je uvela masovnu proizvodnju. Širenje mreže željeznica sa lokomotivama na električni pogon, doprinijelo je drastičnom povećanju mobilnosti ljudi i protoka roba. Javili su se telegrafi, električne mreže, avioni. Drugom industrijskom revolucijom, najavljen je početak globalizacije. Dakle, druga industrijska revolucija je imala integralnu ulogu u postavljanju temelja modernog društva - kakvo danas poznajemo.

¹ Po nasilnom otporu promjenama u engleskoj tekstilnoj industriji, isticali su se "luditi". Ovaj naziv potiče od grupe engleskih radnika s početka XX vijeka, koji su napadali fabrike i kao sredstvo protesta, uništavali mašine, i koje je navodno predvodio čovjek po imenu Ned Ludd.

Jedna od najvažnijih karakteristika druge industrijske revolucije je ta, da su nauka i tehnologija postale međusobno neraskidivo povezane. Neraskidiva veza između nauke i tehnologije, otpočela u ovom periodu, proistekla je iz činjenice da u ovom vremenu počinje savremeni proces istraživanja i razvoja, baziranim na naučnim metodama, pri čemu nauka postaje glavnim temeljom daljeg procesa razvoja privrede, i uopšte ljudskog društva.

Usavršavanje i promjene u procesu obrazovanja, koji je suštinski osnov i razvoja nauke, morale su biti u snažnoj sprezi sa tehnološkom revolucijom.

3.3. Treća industrijska revolucija (1950- još traje)

Treća industrijska revolucija, ili Digitalna revolucija, označava prelaz sa analogne elektronike i mehaničkih uređaja, na digitalnu tehnologiju. Glavne su joj karakteristike masovna proizvodnja, široka upotreba digitalnih korisničkih uređaja - računara, mobilnih telefona, i korišćenje interneta.²

Matematičar Klod Šenon je svojim radom Matematička teorija komunikacija, objavljenim 1948. godine, postavio temelje digitalizacije, Osnovni pronalazak na kojoj je zasnovana Digitalna revolucija, bio je pronalazak tranzistora 1947. godine, a nešto kasnije i razvoj integrisanih kola i mikroprocesora. Godine 1949. razvijen je prvi programski jezik visokog nivoa. Ovi elementi su predstavljali osnov za prekretnicu u tehnologiji – razvoj personalnih računara.

Pedesetih i šezdesetih godina prošlog vijeka, vojska i velike privredne organizacije u razvijenim zemljama koriste su računarske sisteme, a prvi lični računari pojavljuju se sedamdesetih godina. Osamdesetih godina prošlog vijeka, milioni ljudi koriste personalne računare. Tih godina, dolazi i do naglog razvoja industrije zabave, muzika i video zapisi se pretvaraju u digitalne podatke i skladište na optičkim diskovima, kreiraju se video-igrice, i slično.

Godine 1989. Tim Berns LI je izmislio World Wide Web, a 1992. Internet, globalna mreža svih računarskih mreža, zasnovan na Webu pušten je u javnost. Daljim razvojem integrisanih kola, povećanjem stepena integracije i brzine njihovog rada, kao i razvojem odgovarajućih softvera, dolazi do eksplozivnog razvoja i širenja Interneta. Do 1999. skoro svaka zemlja je imala konekciju na Internet.

Mogućnost komunikacije iz pokreta javlja se razvojem mobilne telefonije. Mobilni telefoni i tableti postaju mini-računari sa pristupom Internetu. Komuniciranje pomoću mobilnih telefona, i pristup Internet stranicama je postao standard u digitalnoj komunikaciji. U okviru digitalne revolucije, odvija se i proces korišćenja obnovljivih izvora energije, kao i tehnologija koje štite prirodnu sredinu od zagađenosti, i odvija se borba protiv globalnog zagrijavanja.³

Tehnološke promjene su u potpuno zasnovane na naglom razvoju nauke. Međutim, one su direktno uticale i na promjene u sistemima obrazovanja. Taj proces više nije bilo moguće zasnivati na zastarjelim metodama. Razvoj savremenih digitalnih tehnologija utiče na to da proces obrazovanja mora da razvija i digitalnu pismenost, što, između ostalog, podrazumijeva primjenu digitalnih tehnologija u procesu nastave i učenja.

² Procjenjuje se da je 2010. godine u svijetu bilo 4 milijarde (67% tadašnje svjetske populacije), korisnika mobilnih telefona, i 1,8 milijardi (26,6% tadašnje svjetske populacije) korisnika Interneta

³ U literaturi [2] su navedeni uslovi na kojima bi trebala biti utemeljena treća industrijska revolucija. To su (1) Upotreba obnovljivih izvora energije, (2) Upotreba tehnologija koje su u mogućnosti skladištiti energiju i distribuirati je kada je potrebna, (3) Decentralizacija proizvodnje energije u kojoj bi stambene zgrade bile elektrane koje proizvode energiju za svoje potrebe, ali i potrebe drugih korisnika i (4). Povezivanje proizvođača i korisnika u jedinstvenu energetska mrežu.

3.4. Četvrta industrijska revolucija (započeta u XXI vijeku)

Četvrta industrijska revolucija, pod nazivom Industrija 4.0 promovisana je na Sajmu tehnike u Hannoveru 2011, kao nova njemačka strategija razvoja industrije. Karakterišu je procesi potpune automatizacije, nezavisni od čovjeka, globalno umrežavanje, virtualna stvarnost, vještačka inteligencija, napredni materijali, biotehnologije, masovno prilagođavanje proizvoda potrebama korisnika, i mnoge druge promjene. Industrija 4.0 spaja digitalne, fizičke i biološke sisteme i zasniva se na kombinovanju dostignuća u polju informaciono-komunikacionih tehnologija sa jedne i naučnih saznanja sa druge strane.

Četvrta industrijska revolucija je nastavak Treće industrijske revolucije, pri čemu između njih nema skokovitih prelaza, odnosno nema nekog značajnog datuma vezanog za revolucionarni pronalazak, proizvod ili postupak koji može obilježiti novi pristup u procesima proizvodnje ili organizacije rada u industriji. Zbog toga neki autori smatraju da se u ovom slučaju ne radi o novoj industrijskoj revoluciji, jer se ona ne oslanja na nešto novo otkriveno, što je podstaklo skokovit razvoj industrije i društva, pošto su sve tehnike na koje se ona oslanja već izmišljene i već se koriste. To mišljenje može biti i prihvatljivo, jer se Industrija 4.0 ne temelji na posebnom revolucionarnom skoku, već označava pokretanje potpune automatizacije procesa proizvodnje, korišćenjem računarskih sistema, sistema za prenos i obradu podataka, integrisanih sa savremenim mehaničkim sistemima.

Ipak, postoje važni razlozi zbog kojih se sadašnji procesi i promjene, izdvajaju od treće industrijske revolucije. To su, prije svega, brzina kojom se promjene odvijaju, nezabilježene u ljudskoj istoriji. Ako su dosadašnje revolucije donosile promjene koje su se odvijale približno linearno, sadašnje se odvijaju po eksponencijalnom zakonu. Drugi razlog je obim promjena. Sadašnje se, za razliku od prethodnih, odvijaju na svim kontinentima, u svim državama svijeta. I treći razlog je značaj promjena. Naime, sadašnje promjene su takve da dubina i njihov uticaj snažno mijenjaju život ljudi, društvene i socijalne odnose, kao i obrazovni sistem.

4. OBRAZOVANJE U USLOVIMA DIGITALNE REVOLUCIJE

Svaka industrijska revolucija je korjenito mijenjala svijet. Sve do pojave Prve industrijske revolucije vladalo je mišljenje da se ekonomski napredak može ostvariti jedino otkrivanjem ili osvajanjem drugih teritorija, kao i pronalaženjem novih ruda i materijala, odnosno izvora energije. Pojavom industrijskih revolucija, došlo se do spoznaje da je znanje zapravo najvažniji resurs. Znanje omogućuje da se pronalaze novi materijali, nove tehnologije i novi izvori energije. Jedino se znanje kao resurs, sa većim korišćenjem sve više povećava, za razliku od materijala i izvora energije koji se sa većim korišćenjem sve više smanjuju.

Digitalna revolucija je donijela društvu mnoge prednosti. Svijet je sada povezaniji nego ikada ranije, što povećava produktivnost, dostup informacijama i kvalitet života. Međutim, isto kao i prethodne, i ova revolucija stvara mnoge izazove, posebno za ljude čija radna mjesta nestaju zbog automatizacije i vještačke inteligencije.⁴ Izazovi su sad još i veći. Nekada se čovjek velikim društvenim promjenama u svom životu trebao prilagoditi jednom ili možda ni jednom. S obzirom da je svijet povezaniji nego ikad ranije, da se nove ideje šire velikom brzinom, da se nove tehnologije implementiraju brže nego ikad ranije, da automatizacija i vještačka inteligencija dodatno ubrzavaju promjene, to znači da se čovjek danas, praktično neprekidno, mora prilagođavati promjenama. Znanje, kao najvažniji resurs, stiže se obrazovanjem. Obrazovanje je jedan od ključnih faktora razvoja. Način obrazovanja treba prilagoditi svijetu digitalne revolucije. Međutim, pri tome treba

⁴ Prema nekim autorima, gubitak velikog broja radnih mjesta se očekuje u zdravstvenom sektoru, zbog napretka telemedicine, čiji će razvoj smanjiti broj poslova u zdravstvu, kao i u energetici i finansijama. Manje su ugrožena zanimanja u kojima se traži kreativnost, poput istraživača, inženjera, pisaca, kompozitora, modnih dizajnera, pjevača, glumaca, i slično.

zadržati i humanu komponentu obrazovanja. U daljem tekstu je dat kratak pregled IT obrazovnih sistema u zemljama Evropske unije, u SAD-u i Velikoj Britaniji, a zatim su prikazane karakteristike obrazovnog sistema, koje bi, uz zadržavanje humanih komponenti, po mom mišljenju, mogle pomoći njegovom prilagođavanju tom svijetu.

4.1. IT obrazovanje u zemljama Evropske unije

Visoko obrazovanje u oblasti informacionih tehnologija (IT) u EU predstavlja osnov za dalji tehnološki napredak, inovacije i konkurentnost na globalnom tržištu, u skladu sa izazovima četvrte tehnološke revolucije [14]. Sistem je koncipiran sa snažnim naglaskom na digitalizaciju i podršku istraživanjima, a takođe nudi mnogo mogućnosti za studente, kako iz EU, tako i iz cijelog svijeta. Visoko obrazovanje u oblasti informacionih tehnologija u zemljama Evropske unije ima ključnu ulogu u razvoju digitalne ekonomije i jačanju konkurentnosti na globalnom tržištu. EU je uložila značajna sredstva u unapređenje IT sektora kroz obrazovni sistem, inovacije i istraživanja. Raznovrsnost obrazovnih sistema je jedan od ključnih aspekata IT obrazovanja u EU. Zemlje EU imaju različite obrazovne sisteme, ali postoje i zajednički standardi, naročito kroz Bolonjski proces, koji omogućava harmonizaciju visokoškolskog obrazovanja širom Evrope. To znači da se diplome stečene u jednoj priznaju u različitim zemljama članicama, a studenti često koriste programe kao što je Erasmus+ za razmjenu znanja i vještina između univerziteta.

Mnoge zemlje u EU imaju univerzitete koji su međunarodno priznati po svojim IT programima. [17] U Njemačkoj su to tehnički univerziteti u Minhenu i Berlinu koji su poznati po tome što nude visokokvalitetne IT studije orijentisane na istraživačke programe. U Fransuskoj École Polytechnique i Sorbona u Parizu imaju prestižne IT studije sa naglaskom na vještačku inteligenciju i nauke iz oblasti obrade podataka. Kraljevski institut za tehnologiju (KTH) u Stokholmu nudi vrhunske programe iz oblasti računarskih nauka. Tehnički univerzitet u Delftu i Univerzitet u Amsterdamu (Holandija) poznati su po IT programima sa snažnim fokusom na inovacije. Alto Univerzitet u Finskoj je poznat po IT inovacijama i povezivanju tehnologije sa preduzetništvom.

Tehničko obrazovanje u razvijenim zemljama EU je usmjereno ka digitalnim vještinama i inovacijama. IT studijski programi često uključuju sljedeće oblasti: Vještačka inteligencija (AI), Sajber bezbjednost, Obrada velikih podataka (Big Data), Razvoj softvera i veb aplikacija, Internet stvari (IoT) i Blockchain tehnologije.

Evropska komisija finansira brojne istraživačke projekte kroz programe koji pomažu univerzitetima i istraživačima da rade na projektima u oblasti IT-a, poput vještačke inteligencije, robotike i pametnih gradova. Mnogi univerziteti saraduju sa IT industrijom i tehnološkim kompanijama u cilju razvoja novih rješenja.

Na univerzitetima se forsira praktična primjena znanja i saradnja sa industrijom. Veliki broj univerziteta u EU ima uspostavljene partnerstva sa IT kompanijama koje omogućavaju studentima da rade na stvarnim projektima, stažiraju i steknu praktična iskustva. Ovo omogućuje studentima da razvijaju kritične vještine u IT oblastima i da se lakše zapošljavaju. Mnoge zemlje EU nude povoljne uslove za strane studente koji žele da studiraju IT. Većina programa na master i doktorskim studijama dostupna je na engleskom jeziku. U pojedinim zemljama, poput Njemačke i Finske, obrazovanje je često besplatno ili uz minimalne troškove čak i za strane studente. Naši studenti ovu mogućnost često koriste u okviru međunarodnih razmjena studenata. Iako EU snažno promovise digitalizaciju, postoje izazovi kao što su: nedostatak stručnjaka i neravnomjerna digitalizacija. Uprkos brojnim programima, mnoge zemlje EU se suočavaju sa nedostatkom kvalifikovanih IT stručnjaka, što ukazuje na potrebu za daljim ulaganjima u obrazovanje. Zemlje poput Njemačke, Holandije i Skandinavskih zemalja prednjače u IT obrazovanju, dok su druge, posebno u jugoistočnoj Evropi, nešto sporije u razvoju IT sektora.

4.2. IT obrazovanje u Sjedinjenim Američkim Državama

Visoko obrazovanje u oblasti informacionih tehnologija (IT) u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) je jedno od najnaprednijih i najcjenjenijih u svijetu [15]. U SAD-u su mnogi prestižni univerziteti i istraživački centri koji oblikuju globalne tokove u IT industriji. Visoko obrazovanje u oblasti IT u SAD-u pruža studentima priliku da uče od najboljih svjetskih stručnjaka, da pristupaju najmodernijim tehnologijama i istraživanjima, te da izgrade karijere u vodećim svjetskim kompanijama. SAD su poznate po velikom broju vrhunskih univerziteta koji nude programe iz IT-a i računarskih nauka. [17] Massachusetts Institute of Technology (MIT) je lider u oblasti informacionih tehnologija, poznat po inovacijama u vještačkoj inteligenciji, robotici, mašinskom učenju i računarstvu. Stanford University se nalazi u Silicijumskoj dolini i ima snažne veze sa tehnološkim kompanijama poput Google-a, Apple-a i Facebook-a. Stanford je jedan od najuticajnijih univerziteta u oblasti IT-a i preduzetništva. Carnegie Mellon University je svjetski poznat po istraživanjima u oblastima vještačke inteligencije, robotike i softverskog inženjeringa. California Institute of Technology (Caltech) je poznat po naučnim istraživanjima i inovacijama u oblasti informacionih tehnologija. University of California, Berkeley je još jedan vodeći univerzitet, sa snažnim programima iz računarskih nauka i istraživanja u oblastima kao što su sajber bezbjednost i obrada velikih podataka (Big Data).

IT programi na američki univerzitetima pokrivaju širok spektar disciplina unutar informacionih tehnologija. Oblast računarskih nauka (Computer Science) u izučavanje uključuje programiranje, algoritme, strukture podataka i teoriju računanja. Mnogi univerziteti nude specijalizovane kurseve u oblasti zaštite podataka i mreža. Oblast vještačke inteligencija (AI) i mašinskog učenja se razvija brzo, sa usmjerenjem na razvoj algoritama za autonomne sisteme i analizu podataka. Programi u oblasti velikih podataka (Big Data) i analitike, pripremaju studente za rad sa ogromnim količinama podataka i njihovom analizom. Segment koji se odnosi na razvoj softvera obuhvata dizajn i razvoj aplikacija, veb servisa i softverskih alata.

Univerziteti u SAD-u blisko sarađuju sa vodećim IT kompanijama, daju studentima priliku da rade na praktičnim projektima i steknu iskustvo u stvarnom svijetu. Mnogi fakulteti podstiču stažiranje (Internships) u kompanijama poput Google-a, Microsoft-a, Amazon-a i Apple-a, gdje studenti mogu direktno primijeniti svoje znanje i razvijati profesionalne vještine. Pored toga, univerziteti kao što su MIT i Stanford promovišu startapove i podržavaju studente u osnivanju sopstvenih tehnoloških kompanija. SAD su lider u istraživanjima u IT sektoru, a mnogi univerziteti učestvuju u pionirskim projektima u oblastima kao što su kvantno računanje, blockchain, bioinformatika i vještačka inteligencija. Nacionalna naučna fondacija (National Science Foundation, NSF) i druge institucije često finansiraju ovakva istraživanja, omogućavajući univerzitetima da ostanu u vrhu tehnološkog napretka. Sistemi visokog obrazovanja u SAD nude veliku fleksibilnost u dizajniranju programa studija. Studenti često imaju mogućnost da biraju između različitih specijalizacija i da prilagođavaju svoje kurseve prema ličnim interesima. Postoje i brojne opcije za online učenje i hibridne programe, koji omogućavaju studentima da prate kurseve na daljinu.

SAD privlače veliki broj stranih studenata zahvaljujući vrhunskim univerzitetima i programima, ali i mogućnostima za profesionalni razvoj u tehnološkim centrima. IT programi često nude stipendije, a mnogi univerziteti pružaju podršku stranim studentima kroz savjete o vizama i karijernom razvoju.

Završetak studija sa IT programa na prestižnim univerzitetima u SAD-u otvara vrata svršenim studentima za rad i u nekim od najvećih i najinovativnijih kompanija na svijetu, uključujući Google, Apple, Amazon, Microsoft, Facebook i druge. IT stručnjaci su traženi u SAD, i mnogi univerziteti imaju razvijene karijerne centre koji pomažu studentima u pronalaženju posla ili stažiranja već tokom studija. Iako je IT obrazovanje u SAD izuzetno kvalitetno, postoje izazovi kao što su visoka

cijena školovanja i konkurencija. Studije u SAD su često skupe, posebno na prestižnim univerzitetima. Međutim, mnogi studenti uspijevaju da dobiju stipendije ili finansijsku pomoć. Zbog visoke potražnje za IT obrazovanjem, ulazak na najprestižnije programe može biti veoma konkurentan, zahtijevajući visoke akademske rezultate i vanredne aktivnosti.

4.3. IT obrazovanje u Velikoj Britaniji

Obrazovanje u oblasti informacionih tehnologija u Velikoj Britaniji je veoma razvijeno i nudi veliki broj mogućnosti za studente na različitim nivoima – od osnovnih studija, preko master programa, do doktorskih istraživanja [16]. Osnovne studije (Bachelor's Degree) traju tri ili četiri godine sa praksom u industriji. Programi obuhvataju širok spektar oblasti, uključujući programiranje, mreže, baze podataka, vještačku inteligenciju i razvoj softvera. Master studije (Master's Degree) obično traju godinu dana i obično su usmjerene na specijalizovane teme kao što su sajber bezbjednost, mašinsko učenje, razvoj softvera, analiza podataka i slično. Doktorske studije (PhD) nude mnoge doktorske programe u oblasti IT-a, uključujući vještačku inteligenciju, kvantno računarstvo, biomedicinsko računarstvo i druga polja naprednog istraživanja. Obrazovni sistem je dobro povezan sa industrijom, inovacijama i istraživanjima. Studijski programi omogućuju sticanje teorijskog znanja i praktičnih vještina. Studenti prolaze kroz niz praktičnih projekata, uključujući timske projekte i mogućnosti za industrijsku praksu. Mnogi univerziteti nude opciju "placement year" ili "sandwich year", gdje studenti provode godinu dana radeći u industriji, stičući praktično iskustvo u nekoj IT firmi. Na master i doktorskom nivou, istraživački projekti su važan dio obrazovanja. Studenti rade na stvarnim problemima i koriste najnovije tehnologije. IT obrazovanja obuhvata različite oblasti. Programiranje i softverski razvoj omogućavaju studentima da uče različite programske jezike, algoritme i metodologije za razvoj softvera. Vještačka inteligencija i mašinsko učenje su popularne oblasti koje se izučavaju na većini univerziteta u Velikoj Britaniji, s obzirom na rastuću potrebu za vještačkom inteligencijom u privredi. Univerziteti nude specijalizovane kurseve i programe u oblasti bezbjednosti informacija, što postaje sve značajnija tema u savremenom svijetu IT-a. Studenti izučavaju mrežne tehnologije, protokole i načine kako da implementiraju sigurne i efikasne komunikacione sisteme. Oblast analize podataka i velike baze podataka se fokusira na prikupljanje, obradu i analizu velikih skupova podataka (Big Data), kao i na vještine analitike. Studenti se mogu specijalizovati i za razvoj IoT sistema, uključujući povezane uređaje i mreže. Univerziteti često saraduju sa velikim kompanijama iz IT industrije, kao što su Microsoft, Google, IBM, kao i sa mnogim startup kompanijama. Ova saradnja omogućava studentima da rade na stvarnim projektima i da lakše nađu posao nakon diplomiranja. Mnogi univerziteti nude fleksibilne programe koji omogućavaju studentima da biraju predmete koji ih najviše interesuju i da personalizuju svoje obrazovanje prema svojim interesima i potrebama.

Engleska ima nekoliko vodećih univerziteta koji su poznati po svojim IT orijentisanim programima [17]. Kembridž je jedan od najprestižnijih univerziteta na svijetu i poznat je po svom odsjeku za informatiku i inženjering. Njihovi programi pokrivaju teme kao što su vještačka inteligencija, mašinsko učenje, računarstvo visokih performansi i mnoge druge. Univerzitet Oksford nudi vrhunske programe u oblastima računarstva, uključujući kriptografiju, analizu podataka i razvoj softvera. Programi su često interdisciplinarni, povezujući informatiku sa matematikom i inženjeringom.

Imperijal Koledž iz Londona ima jednu od najboljih škola za računarstvo u Velikoj Britaniji. Njihovi programi su fokusirani na napredne tehnologije poput vještačke inteligencije, mašinskog učenja i mrežne bezbjednosti.

Univerzitet u Edinburgu, Škotska, spada među vodeće britanske univerzitete u oblasti IT. Njihov odsjek za informatiku je među najjačima u Evropi i pokriva širok spektar oblasti kao što su bioinformatika, obrada prirodnog jezika i kognitivne nauke.

Na kraju ovog odjeljka, navodim pet najstarijih univerziteta na svijetu.

1. Univerzitet u Bolonji (Italija), osnovan 1088. godine

Univerzitet u Bolonji, koji ima svoj moto na latinskom "Majka hraniteljica svih učenosti", osnovan je 1088. i nikad nije prestajao da radi, najstariji je univerzitet na svijetu. Ima oko 85.000 upisanih studenata od kojih 30.000 postdiplomaca. Trojica papa, su pohađali ovaj univerzitet.

2. Univerzitet u Oksfordu, Engleska, osnovan 1096-1167. godine

S obzirom na to da se na listi diplomaca nalazi 26 premijera Engleske, 20 anglikanskih nadbiskupa, 12 svetaca, 47 dobitnika Nobelove nagrade, ovaj univerzitet je jednako poštovan koliko je star. Trenutno se nalazi na petom mjestu na svjetskoj rang listi, a pohađa ga oko 22.000 studenata. Ima najveću univerzitetsku štampu na svijetu.

3. Univerzitet u Salamanki, Španija, osnovan 1134. godine

U ovoj instituciji Kristofer Kolumbo je zatražio kraljevsku podršku da ode na ekspediciju ka Indijskom okeanu, u kasnim godinama XV vijeka. Danas se ovaj univerzitet ima preko 30.000 studenata.

4. Univerzitet u Parizu, Francuska, osnovan 1160-1250. godine

Univerzitet u Parizu poznat kao "Sorbona", smatra se jednim od prvih univerziteta u Evropi. Danas je ovaj univerzitet raštrkan po cijelom Parizu, podijeljen na 13 autonomnih institucija.

5. Univerzitet u Kembridžu, Engleska, osnovan 1209. godine

Grupa naučnika je 1209. godine osnovala Univerzitet u Kembridžu nakon što su napustili Univerzitet u Oksfordu zbog političkih razloga. Danas ovaj univerzitet prednjači, nalazeći se na drugom mjestu na svijetu. Kembridž ima više od 18.000 studenata, od kojih su 6.000 postdiplomci. Moto Univerziteta je *Hinc lucem et pocula sacra* (Odavde svjetlost i dragocjeno znanje).



Slika 1. Univerzitet u Bolonji



Slika 2. Univerzitet u Oksfordu



Slika 3. Univerzitet u Salamanki



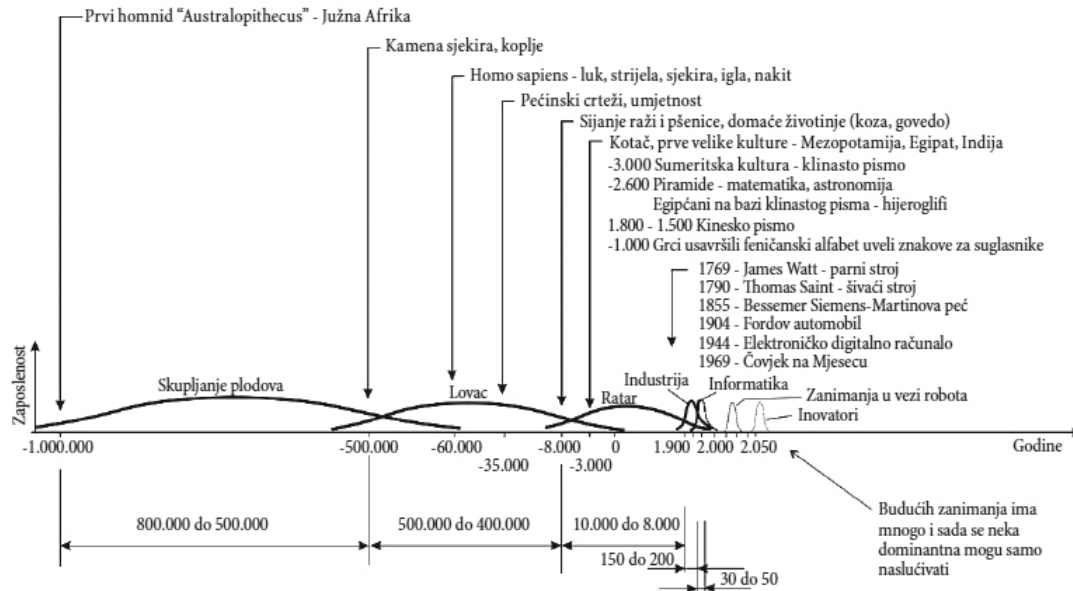
Slika 4. Univerzitet u Parizu



Slika 5. Univerzitet u Kembridžu

4.4. Cjeloživotno učenje

Inovacije se dešavaju sve brže, opisi poslova na radnim mjestima mijenjaju se isto tako brzo. Mnoga današnja zanimanja podrazumijevaju poznavanje alata i mehanizama koji su u stalnoj promjeni. Na slici 6 dat je prikaz promjena dominantnih zanimanja tokom istorije [5].



Slika 6. Prikaz promjena dominantnih zanimanja tokom istorije

Bez obzira na godine i iskustvo, tehnologija toliko brzo mijenja moderno tržište rada da stečena znanja mogu postati beskorisna. Zbog toga je važno stalno učenje. Kako se svijet mijenja brzo, i korekcije obrazovnih programa treba da slijede taj tempo, kako bi se obrazovanje približilo poslovnim ciklusima promjena. Ako su promjene u obrazovnom sistemu spore, obrazovni sistem rizikuje da izgubi dodir s tržištem rada, i samim tim i da izgubi moć stvaranja kompetentnog kadra.

Međutim, i u procesu cjeloživotnog učenja treba imati mjeru. Cjeloživotno učenje treba shvatiti kao nešto što se podrazumijeva, jer se ionako svakim danom života nešto novo nauči. Agresivno nametanje cjeloživotnog učenja kao obaveze, može negativno da utiče na psihi čovjeka: da se osjeća nesigurno, da bude pod stalnim pritiskom da nije dovoljno dobar, da osjeća da treba još nešto da dostigne. Ne ostaje mu vremena da bude samo običan čovjek, da se posveti porodici, hobijima, talentima, druženju, sportu. Jasno je da čovjek ne može dostići sve što želi i što se od njega traži, i to treba da shvati. Život je jednostavno kratak i pun drugih vrijednosti. Izgleda, da nas je na ovo htjela upozoriti i korona.

4.5. Digitalizacija obrazovnih procesa

Razvoj savremenih digitalnih tehnologija doveo do toga da digitalna pismenost postane jedna od ključnih ciljeva procesa obrazovanja.

Digitalna kompetencija uključuje sigurnu i odgovornu upotrebu digitalnih tehnologija i njihovog korišćenja za učenje, rad, zabavu, kao i korišćenja u svakodnevnom životu. Ona uključuje informatičku pismenost, medijsku pismenost, stvaranje digitalnih sadržaja, kompetencije povezane sa sajber bezbjednosšću, pitanja povezana s intelektualnim vlasništvom, i kritičko mišljenje.

Od Wikipedije pa sve do ogromnih online baza znanja koje su razvile najbolje škole i univerziteti – znanje postaje sve lakše dostupno. To znači da će lakše i brže napredovati ljudi koji su inteligentni, radoznali i koji brzo uče.

Digitalizacija obrazovanja podrazumeva da učenje postaje sve više kolaborativno. Privikavanje nastavnika i studenata na rad u virtuelnom okruženju, kroz e-učionice, virtuelne laboratorije, virtuelne timove i intenzivna upotreba platformi za učenje na daljinu, posebno kada su u pitanju inženjerske nauke, omogućava adekvatnu pripremu za zahteve Industrije 4.0.

Primjena informacionih i komunikacionih tehnologija u nastavi i upotreba platforme za elektronsko učenje (e-učenje) učenje, predstavljaju ključne komponente u procesu osavremenjivanja nastavnog sadržaja i metodologije izvođenja nastave. Upotreba platformi za e-učenje omogućava učenicima/studentima da pristupaju nastavnim materijalima, u vrijeme kada im to odgovara, sa bilo koje lokacije, sa uređajem koji se može povezati na internet. Automatsko ocjenjivanje testova u okviru rada platformi za e-učenje omogućava često testiranje znanja učenika/studenata, pri čemu oni dobijaju trenutne povratne informacije o njihovom trenutnom znanju iz određene oblasti. Platforme za e-učenje se mogu povezivati sa virtuelnim laboratorijama, i učenici/studenti mogu da vrše simulacije i eksperimentišu sa opremom pri čemu ne moraju biti na lokaciji gdje se oprema nalazi, i ne mogu nestručnim rukovanjem da opremu oštete, ili sami sebe da ugroze.

Upotreba diskusionih foruma u okviru platformi za e-učenje omogućava učenicima/studentima stalnu razmjenu znanja i informacija, kako između njih, tako i sa nastavnicima, čime se podstiče aktivno učešće u nastavi i unapređuje međusobna komunikacija.

I u procesu digitalizacije obrazovanja, treba naći mjeru, i što je moguće više približiti ga ljudskoj prirodi. Klasični metodi učenja podržavaju taj cilj. Pod klasičnim metodama se podrazumijevaju korišćenje knjige, usmena predavanja, autoritet predavača. Klasične metode obrazovanja omogućuju da do punog izražaja dođe povezanost materije koja se izučava, sistemski pristup učenju, funkcionalna pismenost, ljepota izražavanja, neposredna komunikacija predavača sa slušaocima. Bez korišćenja knjige, teško se može shvatiti odnos djelova i cjeline, povezanost gradiva koje se izučava, ne razvija se logika ni pismenost, koji su ključni i za korišćenje savremenih tehnologija. Potpuno oslanjanje na e-tehnologije u procesima izvođenja nastave, osiromašuje rječnik, znanje i razumijevanje. Ono možda razvija vještine, ali može da oteža njihovu primjenu u izmijenjenim okolnostima.

Klasičan pristup obrazovnim metodama razvija svijest učenika/studenata, razvija odgovornost, moralne osobine, a u prvom redu pomaže proces razumijevanja izložene materije. Bez razvijanja takvih vrijednosti, može biti rizično dati na raspolaganje moćnu savremenu tehnologiju novim generacijama.

4.6 Razvoj ključnih kompetencija i specijalizacija

Obrazovanje treba da omogući razvoj ključnih kompetencija kao što su funkcionalna i digitalna pismenost, kritičko mišljenje, socijalne vještine, i slično. Zbog „eksplozije znanja“, koja i dalje sve brže raste, pomjera se i usmjerenost sa sticanja znanja na njihovu primjenu u praksi i sposobnost kreiranja novih znanja (kreativnost, inovativnost), uz pravilno korišćenje informaciono-komunikacionih tehnologija, koje mijenjaju prirodu rada i smisao društvenih odnosa (fleksibilnost i prilagođavanje na brze promjene), na razvijanje sposobnosti da se dođe do informacija, da se one kritički razmatraju, da se efikasno koriste (informaciona pismenost, kritičko mišljenje) i da se one razmjenjuju s drugima, da se zajedno s drugima radi na zadacima (socijalne vještine).

Da bi odgovorili tim izazovima, škole i fakulteti moraju se transformisati tako da omoguće učenicima i studentima da kritički razmišljaju, fleksibilno rješavaju probleme i razviju vještine saradnje i komunikacije, što će im biti potrebno za uspješan život i rad. Pošto obrazovni sistemi treba da odgovore na savremene društvene zahtjeve, razvijeni su mnogi modeli i klasifikacije ključnih kompetencija kojima bi mladi trebalo da ovladaju u toku školovanja da bi bili bolje pripremljeni za zapošljavanje i rad u budućnosti. U tabeli 1. su prikazane ključne kompetencije za XXI vijek u kurikulumima u Crnoj Gori, [9].

Kompetencija	Potkategorije
1. Socio-emocionalne vještine	1.1. Poznavanje sebe i drugih (samosvijest)
	1.2. Upravljanje sobom (samoregulacija)
	1.3. Socijalna svijest
	1.4. Socijalne vještine
	1.4.1. Saradnja
	1.4.2. Građanski aktivizam
2. Rješavanje problema	2.1. Rješavanje problema
	2.2. Razvoj sposobnosti za mala istraživanja
3. Kritičko razmišljanje	
4. Kreativnost, stvaralaštvo	
5. Informaciona pismenost	
6. Informatička pismenost	6.1. Razvoj informatičke pismenosti
	6.2. Primjena informatičke pismenosti u drugim oblastima učenja i rada
7. Učenje učenja i metakognicija	
8. Radne vještine, preduzetništvo i produktivnost	
9. Životne vještine	9.1. Odgovoran odnos prema vlastitom zdravlju
	9.2. Ekološka svijest

Tabela 1. Ključne kompetencije za XXI vijek u kurikulumima u Crnoj Gori

I u ovom slučaju razvoj ključnih kompetencija, treba što više približiti čovjeku. Strogo propisivanje kompetencija koje predavač ili učenik/student treba da ispuni treba izbjegavati. Prije svega, brojne i zatjevno definisane kompetencije, nijedan čovjek ne može ispuniti u potpunosti. S druge strane, one se ne mogu ni precizno definisati, jer se podrazumijevaju, a nijesu mjerljive.

Određena zanimanja, odnosno znanja i vještine potrebne za njihovu primjenu, često se javljaju u praksi znatno ranije nego u programima obrazovnih institucija. Zbog toga, takva znanja treba da se usvajaju tamo gdje su nastala i gdje su neophodna. Dakle, u procesu obrazovanja nužna je bliska saradnja obrazovnih institucija i kompanija, odnosno nužno je podsticanje njihovog obrazovnog partnerstva. Stručnjaci iz privrede mogu svoja znanja prenositi u školama i fakultetima kako bi se ubrzalo širenje specijalističkih znanja savremenog doba. Dakle, jedan od ciljeva obrazovne politike treba da bude povezivanje privrede i prosvjete, odnosno povezivanje svijeta obrazovanja i svijeta rada.

4.7. Izučavanje tehničkih disciplina

Cilj nastave izučavanja tehničkih disciplina je da se osigura da svi učenici steknu bazičnu jezičku, tehničku i informatičku pismenost, i da se osposobe da rješavaju probleme i zadatke u novim i nepoznatim situacijama. Osim toga važno je i da se upoznaju sa savremenim tehničko-tehnološkim dostignućima, da razvijaju tehničko mišljenje, tehničku kulturu i radne vještine.

Ovdje bih istakao jedan važan problem – ukidanje predmeta Tehničko obrazovanje u osnovnoj školi. Mišljenja sam da je to greška. Cilj ovog predmeta je bio da doprinese tehničko-tehnološkom vaspitanju i obrazovanju učenika, formiranju stvaralačke ličnosti; sticanju osnovnih tehničko-tehnoloških znanja, umijeća i vještina i osposobljavanju za njihovu primjenu u učenju, radu i svakodnevnom životu. Osim toga, Tehničko obrazovanje je pomagalo učenicima da razvijaju interesovanja i sposobnosti za tehničko stvaralaštvo i pronalazaštvo. I što je posebno važno: kroz nastavu tehničkog obrazovanja, kroz realizaciju praktičnih zadataka, učenici su mogli da osjete radost stvaranja.

Stoga sam mišljenja da Tehničko obrazovanje treba ponovo uvesti u osnovnoj školi kao poseban modul.

4.8. Izučavanje fundamentalnih disciplina

Istraživanja rađena 2010. godine su pokazala da od deset najplaćenijih zanimanja u toj godini čak šest nije postojalo pet godina ranije. Ova činjenica postavlja obrazovanje pred možda i najteži zadatak - kako predvidjeti šta će se dešavati u budućnosti i spremati studente sa potrebnim znanjima uz te okolnosti. Postaje nemoguće naučiti studente onim vještinama koje će im trebati nakon što počnu da rade. Zato visoko obrazovanje ima jedan koncept kojeg treba da se pridržava a to je da treba naučiti studenta da uči. To je suština, to je ono što traži tržište, čovjeka koji ima dovoljno fundamentalnih znanja koja će mu omogućiti da može da nauči ono što je neophodno za rad. Ovdje govorimo o neophodnosti sticanja fundamentalnih znanja na koja se mogu nadovezati ostala praktična znanja.

Sa Industrijom 4.0 vezan je i pojam STEM (*science, technology, engineering, mathematic - nauka, informatika, tehnika, matematika*) koji ukazuje u kojem smjeru treba obrazovanje usmjeriti da se ti ciljevi ostvare. Važnost matematike, koja od svih fundamentalnih disciplina najviše razvija sposobnost apstraktnog mišljenja, kao i prirodnih nauka, u procesu obrazovanja, ilustruje činjenica da neki autori predlažu da se uticaj obrazovanja na ekonomski rast jedne zemlje, mjeri rezultatima testova iz matematike i prirodnih nauka. Rezultati istraživanja su su tako pokazali da su zemlje u kojima su kandidati najbolje odgovorili na testove iz matematike i prirodnih nauka, imali u posmatranom periodu najviše stope rasta [11]⁵.

Tehnološki razvoj ljudskog društva je baziran na naučnim saznanjima iz oblasti prirodnih nauka, prvenstveno fizike, hemije i biologije. U prilogu 4 date su jednačine fizike koje su imale presudan uticaj na tehnološki razvoj civilizacije.

Nije dovoljno izučavati samo matematiku i prirodne nauke, kao fundamentalne discipline. Izučavanje književnosti, umjetnosti, sociologije, psihologije i ostalih društvenih nauka, osim što razvija funkcionalnu pismenost, erudiciju i podiže opštu kulturu, doprinosi razvoju čovjeka kao humanog bića i dodatno razvija njegov um i duh.

4.9. Humanizacija obrazovanja

Ljudska znanja i vještine se stalno povećavaju i usavršavaju. Međutim, priroda čovjeka, kao humanog bića se ne mijenja tako brzo. Najbolji dokaz za to su latinske poslovice, koje su, iako nastale prije dvije hiljade godina, i dalje aktuelne. Zbog toga, velike promjene u načinima sticanja znanja, treba prilagoditi i ljudskoj prirodi, treba ih humanizovati.

Kako automatizacija i vještačka inteligencija sve više uzimaju maha i već sad brišu mnoga radna mjesta, obrazovanje treba da jača ljudsku prednost u odnosu na mašine. A naša prednost u poređenju sa mašinama je, između ostalog, sadržana u tri osobine koje mašine još uvijek nemaju, ili možda ne mogu ni imati, a to su radoznalost, kreativnost i empatija. I razvoj ovih osobina, odnosno humanizacija obrazovanja, trebala bi biti jedna od ključnih komponenti u obrazovnom procesu.

Radoznalost i kreativnost⁶ su početak svake inovacije, društvene ili tehnološke. Ona je ljudima omogućila da prirodu prilagođavaju sebi i svojim potrebama, i da stvaraju umjetnost.

Mogućnost pojedinca da se prilagodi u današnjem profesionalnom okruženju koje se brzo mijenja, pored stručnih znanja, sve više zavisi od osobina kao što su radoznalost, kreativan um i želja i sposobnost brzog učenja. Obrazovni sistem bi, dakle, trebao biti usmjeren na razvijanje tih osobina mladih ljudi od osnovnog pa sve do visokog obrazovanja. A to znači da u procesu nastave ne treba tražiti prostu reprodukciju naučenog, već podsticati pravi način razmišljanja. Obrazovni

⁵ Na vrhu piramide francuskog obrazovnog sistema nalaze se elitne Velike škole među kojima je i Ecole polytechnique, osnovana 1794, za koju je Napoleon smislio moto „Za otadžbinu, nauku i slavu!“. Ove ustanove daju vrhunsko obrazovanje sa naglaskom na fundamentalnim naukama - matematičari, fizičari, statističari i ekonomisti.

⁶ Jedna od osnovnih poruka osnivača Applia Stiva Džobsa mladim ljudima je bila „Be foulsh, be hungry!“

proces treba da bude baziran na upoznavanju učenika/studenata sa istraživačkim procesom, njihovim podsticanjem i uključivanjem u samostalno istraživanje,

Empatija je sposobnost opažanja i razumijevanja tuđih osjećanja, odnosno osjećanja osobe sa kojom razgovaramo ili koju posmatramo.

Sve ubrzani ritam globalne tržišne utakmice nameće nova pravila i promjene u poslovnom okruženju: poslodavci zahtijevaju drugačiji profil zaposlenih i vrednuju specifične odlike kao što su fleksibilnost, sposobnost timske saradnje, i posjedovanje empatijskih i društvenih vještina. Moderne i uspješne organizacije primjenjuju dostignuća savremene nauke koja u središte zbivanja stavlja čovjeka. Čovjek se smatra najvrjednijim resursom organizacije, odnosno temeljem njenog uspjeha.

Podsticanje empatije razvija sposobnost stvaranja odnosa s drugima, odnosno stvaranje preduslova za timski rad. Bez obzira na primarnu važnost individualnosti u svakom poslu, timski rad u nekoj organizaciji stvara potrebnu sinergiju koja omogućava rješavanje različitih problema, i kreiranje novih proizvoda. Time empatija predstavlja sposobnost koja postaje jedna od ključnih za poslovni uspjeh savremenih kompanija.

Podsticanjem radoznalosti, kreativnosti i empatije, osobina koje je nemoguće programirati, pa samim tim i ne mogu biti svojstvene mašinama, možda je pravi cilj obrazovanja: naučiti ljude kako da uče i kako da se brzo prilagođavaju promjenama, kako da rade u timovima i kako da koriste komplementarne vještine članova tima, kako da jačaju radoznalost i kako da budu spremni na rješavanje problema i da reaguju na nove izazove.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je dat pregled razvoja najznačajnijih naučnih otkrića do kojih je došao čovjek, kao i pregled osnovnih karakteristika industrijskih revolucija. Analizirani su međusobni uticaji razvoja ljudske misli, odnosno procesa obrazovanja, sa tehnološkim razvojem, odnosno industrijskim revolucijama. Posebno je analizirana međusobna povezanost savremenog obrazovanja sa četvrtom tehnološkom revolucijom.

Razvoj ljudske civilizacije, a naročito razvoj ljudske civilizacije u budućnosti, sve više će zavisi od položaja nauke i njene primjene, a sve manje od količine uloženog rada i proste količine sredstava koja pojačavaju njegovu snagu. Naučno-tehnički razvoj ljudskog društva je usmjeren ka društvu znanja koje u središte zbivanja stavlja ličnost i njegovo znanje uz primjenu digitalnih tehnologija.

Obrazovanje, kao ključna komponenta naučno-tehničkog razvoja ljudskog društva, treba da ide u korak s vremenom. Međutim, u metodama obrazovanja treba kombinovati savremene i klasične metode, i što je posebno važno, treba humanizovati obrazovanje. Na taj način čovjek će moći da se ponovo vrati sebi, da se bavi naukom, sportom, ekologijom, kulturom, i da se bavi sopstvenim duhovnim uzdizanjem.

PRILOG

Jednačine fizike koje su mijenjale svijet

Drugi Njutnov zakon kretanja (1687): Sila je jednaka proizvodu mase i ubrzanja:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Kako je mijenjala svijet? Zajedno sa ostala dva Njutnova zakona kretanja (zakon inercije, zakon akcije i reakcije) ova jednačina predstavlja ključnu jednačinu mehanike, na osnovu koje se vrše svi proračuni vezani za kretanje i dejstvo sile.

Njutnov zakon opšte gravitacije (1687): Između bilo koja dva tijela djeluje privlačna sila srazmjerna njihovim masama, a obrnuto srazmjerna kvadratu njihovog rastojanja:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Kako je mijenjala svijet? Ovaj zakon je jedan od temeljnih zakona prirode, isti je uzrok zbog kojeg sve pada dolje, i zbog kojeg se Mjesec okreće oko Zemlje. Otkriće ovog zakona je pomoglo da se razumije svijet.

Drugi princip termodinamike: Entropija (mjera neuređenosti) u zatvorenom izolovanom sistemu, uvijek se povećava:

$$\Delta s > 0$$

Kako je mijenjala svijet? I ovo je jedan od temeljnih zakona prirode. Otkrio ga je francuski fizičar Karno. Zajedno sa Njutnovim zakonima, drugi princip termodinamike je presudno uticao na razvoj tehnologija u prve dvije industrijske revolucije, posebno u razvoju toplotnih mašina. Ovaj princip ima i dublju primjenu, možda je odgovoran i za postojanje strijele vremena, odnosno pojave da vrijeme teče samo u jednom smjeru, od prošlosti ka budućnosti.

Treća Maksvelova jednačina elektrodinamike (1865): Promjenljivo magnetno polje stvara promjenljivo električno polje:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Kako je mijenjala svijet? Presudno je uticala na razvoj druge industrijske revolucije. Na osnovu ove jednačine, svijet se napaja električnom energijom. Kod električnih generatora, okretanjem magneta, koje vrši mehanička snaga vode, vodene pare ili vjetra, u žicama namotanih oko njih indukuje se električna struja. Ako se ovaj postupak vrši u suprotnom smjeru, dobijaju se električni motori.

Četiri Maksvelove jednačine se po svom značaju upoređuju sa Njutnovim zakonima kretanja. Američki nobelovac Fejnman je napisao da će američki građanski rat u nekom budućem izučavanju istorije biti samo epizoda koja se desila u vrijeme otkrića ovih jednačina.

Ajnštajnova jednačina jednakosti mase i energije (1905): Energija je jednaka proizvodu mase i kvadrata brzine svjetlosti:

$$E = mc^2$$

Kako je mijenjala svijet? Ajnštajnova najčuvenija jednačina, pokazuje da se iz male količine mase, može osloboditi ogromna količina energije. Izrada atomske bombe, nuklearnog oružja, kao i atomskih centrala, zasnovano je na korišćenju ove jednačine.

Šredingerova jednačina (1925), opisuje kako se talasna funkcija čestice (lijeva strana jednačine) može izračunati iz njene kinetičke i potencijalne energije (desna strana jednačine):

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(r, t) = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r, t) \right] \psi(r, t)$$

Kako je mijenjala svijet? Jednačina predstavlja kvantnu verziju osnovnog zakona dinamike. Na osnovu nje fizičari su dobili mogućnost da računaju kako se kvantne čestice kreću, i kako djeluju između sebe, pa je ova jednačina od velike važnosti za razvoj savremenih tehnologija, od laserske tehnike do kvantnih računara.

LITERATURA

1. M.Perović, Istorija matematike, CANU, Podgorica 2017.
2. History, Industrial revolution, <http://www.history.com/topics/industrial-revolution> (pristup 22. avgusta 2021.)
3. Clark, W.W., Cooke, G., Global Energy Innovation: Why America Must Lead, Praeger, Kalifornija 2012
4. Druga industrijska revolucija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Druga_industrijska_revolucija (pristup 12 avgusta 2017.)
5. Digitalna revolucija, https://sh.wikipedia.org/wiki/Digitalna_revolucija (pristup 22. avgusta 2017.)
6. D.Abazović: Upravljanje na drugačiji način, tehnološki Darwinizam i upravljanje IT funkcijom, izdavač autor, Podgorica 2017.
7. G. Nikolić, Industrija i obrazovanje, Andragoški glasnik Vol 21, Broj 1-2, 2017., str. 37-48
8. A.M. Tomulić, T. Grmuša: Empatija u radnom okruženju Media, Culture and Public Relations, 8, 2017, 2, 194-205
9. A. Pešikan Z. Lalović Obrazovanje za život: ključne kompetencije za 21. vijek u kurikulumima u Crnoj Gori, Unicef Crna Gora, 2017.
10. B.Bogojević, B. Lalić, N. Tasić, T. Todorović, G. Tepić: Uloga visokoškolskog obrazovanja i značaj e-učenja u četvrtoj industrijskoj revoluciji, XXIV Skup Trendovi razvoja: "digitalizacija visokog obrazovanja", Kopaonik, 21. - 23. 02. 2018.
11. B. Bujišić: Obrazovanje, ljudski kapital i razvoj, Institut društvenih nauka i
12. Centar za ekonomska istraživanja: Obrazovanje i razvoj, Beograd, 2013.
13. O. Aničić¹, M. Đoković², B. Marinković³, Evolucija naučno-tehnološkog progressa, Informacione tehnologije, obrazovanje i preduzetništvo, 2017. Str. 251-258
14. M. Žužić, Energetski i ekološki aspekti industrijskih revolucija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2017.
15. Digital Education at School in Europe, https://www.incode2030.gov.pt/wp-content/uploads/2022/01/digital_education_at_schools_in_europe_r.pdf
16. Education in the United States, https://en.wikipedia.org/wiki/Education_in_the_United_States, 2024
17. Information Technology Degree in the UK, <https://www.educations.com/information-technology/united-kingdom>
18. World University Rankings by Subject 2024: Engineering & Technology <https://www.topuniversities.com/university-subject-rankings/engineering-technology>

BIOGRAFIJE AUTORA



Martin Čalasan

Dr Martin Čalasan, docent na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta Crne Gore, rođen je 1986. godine u Plužinama, Crna Gora. Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore u Podgorici, koji je upisao 2005. godine, završio je u junu 2009. godine sa prosječnom ocjenom 9.95. Na istom fakultetu, magistrirao je 2010. godine, na temu „Simulacioni model i dinamika statičkog pobudnog sistema sinhronih generatora u HE Perućica“, sa prosječnom ocjenom „A“ (10.00). U dosadašnjem naučno-istraživačkom radu publikovao je preko 50 radova u vodećim međunarodnim časopisima sa SCI/SCIE liste. Objavio je oko 140 naučnih i stručnih radova u međunarodnim, regionalnim i domaćim časopisima, kao i na međunarodnim i domaćim konferencijama. Stručna aktivnost doc. dr Martina Čalasa se ogleda kroz izradu velikog broja projekata, studija i ekspertiza. Bio je angažovan u više od 30 komisija supervještaka u sudskim predmetima koji su zahtijevali naučno-stručnu ekspertizu Elektrotehničkog fakulteta. Član je IEEE, CIGRE Paris i CIGRE Crna Gora, gdje obavlja funkciju potpredsjednika. Predstavnik je Crne Gore u IEEE PES Srbije i Crne Gore. Dobitnik je brojnih nagrada i priznanja.



Natalija Radonjić

Natalija Radonjić rođena je 1992. u Danilovgradu. 2011. godine, nakon završene Gimnazije „Petar I Petrović Njegoš“ u rodnom gradu, upisuje studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici, smjer Energetika i automatika. Na pomenutom fakultetu, 2014. godine je završila osnovne studije, smjer Energetika i automatika, a 2015. godine okončala i specijalističke studije, smjer Elektroenergetski sistemi, nakon čega nastavlja Master studije na istom fakultetu, na smjeru Elektroenergetski sistemi, Obnovljivi izvori energije.

Od 2020. godine angažovana je kao rukovodilac elektro sektora i odgovorni inženjer u kompaniji Permonte d.o.o. u Podgorici. Kao autor i panelista učestvovala je na brojnim naučnim skupovima i konferencijama u zemlji i inostranstvu, a kada je riječ o radnom iskustvu, Radonjić je bila projektant Vjetroparka Možura 46 MW, na teritoriji Opština Bar i Ulcinj, i saradnik u projektantskom nadzoru prilikom izgradnje ovog objekta. Radila je na prepoznavanju lokacije i mjerenja potencijala vjetra na lokalitetu Vjetroparka Bijela 118.8 MW, Opština Šavnik, odgovorni je inženjer za elektroenergetsku fazu u razvoju projekta, kao i na prepoznavanju lokacije i mjerenje potencijala vjetra na lokalitetu Vjetroparka Korita 72.3 MW, Opština Bijelo Polje. Odgovorni je inženjer za elektroenergetsku fazu u razvoju malih hidroelektrana kao i za elektroenergetsku fazu u projektima rekonstrukcije malih hidroelektrana u vlasništvu Elektroprivrede Crne Gore. Odgovorni je inženjer za elektroenergetsku fazu u razvoju i implemantaciji solarnih

sistema i solarnih elektrana na krovovima objekata, zbirne snage preko 3 MW. Neki od većih projekata u kojima je učestvovala su: Solarna elektrana na krovu i parkingu Elektroprivrede Crne Gore 310 kW, Solarna elektrana Bar Kod 585 kW, Solarna elektrana Alliance 202 kW. Učestvuje u realizaciji brojnih projekata koji su u fazi realizacije ili su realizovani u Crnoj Gori – odgovorni je inženjer za elektroenergetsku fazu u projektovanju Ekološke rekonstrukcije termoelektrane Pljevlja, radila je kao inženjer saradnik prilikom tehničkog prijema podmorskog kabla Crna Gora – Italija.



Emil Prpić

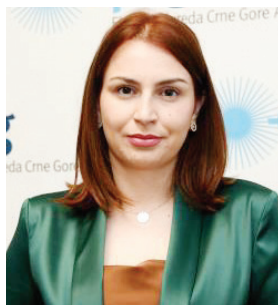
Emil Prpić, rođen je 1971. godine u Zagrebu. Živi u Rijeci od 1976. godine, gdje je 1989. godine završio i srednju strukovnu školu elektrotehničke struke za matematičara-informatičara. Godine 1995. diplomira na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, na smjeru Automatike i procesnog računarstva. Od 1995. do 2003. godine radi u Hrvatskoj elektroprivredi, u proizvodnom pogonu TE Rijeka 320MW, u odsjeku pripreme projekata iz područja regulacije i mjerenja, kao samostalni inženjer i kasnije kao koordinator projekata. Od 2000. do 2005. godine radi kao spoljni saradnik u nastavi na novootvorenom sveučilišnom studiju elektrotehnike na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, u svojstvu voditelja laboratorijskih i auditornih vježbi iz Mjerenja u elektrotehnici, Elementa automatike i Sustava digitalnog upravljanja. Od 2003. do 2010. radi u Alarm automatici, u tehničkoj podršci, zatim kao voditelj odjela projektne prodaje, potom kao voditelj odjela projektne podrške. Aktivno učestvuje u većim projektima na polju zaštite od požara i sistema tehničke zaštite u Hrvatskoj, BiH, Crnoj Gori i Srbiji. Od 2005. godine nosilac je licence Ministarstva unutarnjih poslova Republike Hrvatske za obavljanje poslova zaštitara – tehničara. Od 2007. godine upisan je u imenik ovlaštenih inženjera elektrotehnike pri Hrvatskoj komori inženjera elektrotehnike. Od 2010. do 2015. godine radio je u Agenor automatici, kao tehnički konsultant na projektima automatizacije u pametnim kućama, zgradama i industrijskim postrojenjima. Od 2011. do 2020. godine radi honorarno kao naslovni predavač na stručnom preddiplomskom studiju Telematike pri Veleučilištu u Rijeci. Od 2015. godine do danas radi kao konsultant, projektant i nadzorni inženjer na području elektrotehnike.



Miodrag Kaluđerović

Dr Miodrag Kaluđerović, diplomirao je na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu 1962. godine, gdje je i magistrirao 1978. godine. Doktorsku tezu "Optimalni razvoj industrije aluminijuma u SR Crnoj Gori sa aspekta uključivanja u međunarodnu podjelu rada" odbranio je na pomenutom fakultetu 1983. godine. Profesionalne pozicije dr Kaluđerovića u dugogodišnjoj karijeri su: Boksiti Nikšić (1962-1975) - šef za unapređenje proizvodnje, upravnik pogona, direktor proizvodnje, tehnički direktor; International Bauxite Association Jamaica; članstva u značajnim stručnim i naučnim organizacijama Savezne države Jugoslavije i Crne Gore. Bio je predsjednik Odbora za naučnu i tehnološku saradnju Jugoslavija - SAD.

Stručne prakse i specijalizacije obavljao je u Francuskoj, Poljskoj, Italiji SAD i drugim zemljama, a u okviru ekspertske misije boravio je na Jamajci, Gajani, Surinamu, Sijera Leoneu, Gvineji, SAD. Njegova biografija našla se u publikacijama Who is Who in the World, Enciclopedia, Oxford i Ko je ko u Crnoj Gori. Jedan je od osnivača Društva za energetske optimizacije ENOP d.o.o. Podgorica.



Božana Miljanić Marušić

Mr Božana Miljanić-Marušić rođena je 1994. godine u Nikšiću. Za postignute rezultate u osnovnoj školi i gimnaziji u Nikšiću nagrađena je diplomom „Luča A“. Odbranom specijalističkog rada, sa temom „Analiza potrebe i mogućnosti većeg nivoa korišćenja elektromobila u Crnoj Gori“, završava specijalističke akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu na Univerzitetu Crne Gore septembra 2016. godine, sa prosječnom ocjenom 9,60. Magistarske studije na istom fakultetu, sa prosječnom ocjenom 10, završila je u junu 2018.

Godine, odbranivši rad sa temom „Definisanje rasporeda stanica za punjenje električnih vozila na teritoriji opštine Podgorica“. Student je doktorskih studija na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici. Autor je osam radova na domaćim i međunarodnim konferencijama i časopisima. Pripravnički staž je odradila u CEDIS-u, u Službi za mjerenje u Regionu 1. Nakon toga je bila zaposlena kao profesor u Srednjoj elektrotehničkoj školi „Vaso Aligrudić“ u Podgorici i angažovana na predmetima praktične nastave i elektro grupi predmeta. Od 2017. godine, zaposlena je u Direkciji za upravljanje energijom u Elektroprivredi Crne Gore A.D., kao specijalista za kratkoročnu trgovinu i optimizaciju.



Maja Rašković

Maja Rašković je rođena 1995. godine u Nikšiću. Za postignute rezultate u Osnovnoj školi „Dušan Bojović“ i Gimnaziji „Stojan Cerović“ u Nikšiću, nagrađena je diplomom „Luča A“. Upisuje Elektrotehnički fakultet u Podgorici 2014. godine. Osnovne akademske studije završava u junu 2017. godine sa prosječnom ocjenom 9.06. Odbranom specijalističkog rada na temu „Uticaj vjetroelektrana na stabilnost elektroenergetskih sistema“, završava specijalističke akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore u septembru 2018. godine, sa prosječnom ocjenom 9,82.

Pripravnički staž je odrađivala u Direkciji za upravljanje energijom u Elektroprivredi Crne Gore A.D. 2019. godine, gdje je i zaposlena od juna 2021. godine kao specijalista za kratkoročnu trgovinu i optimizaciju.



Mihailo Micev

Dr Mihailo Micev, saradnik u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore, rođen je 1995. godine u Podgorici. Za postignuti uspjeh tokom školovanja u Osnovnoj školi „Pavle Rovinski“ i Gimnaziji „Slobodan Škerović“, dobitnik je nagrade Luča A. Osnovne studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore, odsjek Energetika i automatika, upisao je 2014. i završio ih 2017. godine sa prosječnom ocjenom 10. U septembru 2017. godine upisao je specijalističke studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, smjer Automatika, koje je završio u julu 2018. godine sa prosječnom ocjenom 10. Magistarske studije upisao je u septembru 2018. godine i završio u julu 2020. godine sa prosječnom ocjenom 10. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici upisao je u oktobru 2020. godine. Tokom druge i treće godine osnovnih studija, kao i na specijalističkim studijama, bio je korisnik stipendije Ministarstva prosvjete za talentovane studente. Nagrađen je od Univerziteta Crne Gore za postignuti uspjeh u toku studijske 2016/17. godine i za završene studije sa najboljim uspjehom 2018. godine, kao i od Elektrotehničkog fakulteta za najboljeg studenta sa završenim osnovnim studijama, za odsjek Energetika i automatika. Za studijsku 2017/18. godinu dobitnik je stipendije Inženjerske komore Crne Gore, stipendije Crnogorske akademije nauka i umjetnosti, kao i stipendije koju najboljim studentima dodjeljuje JP Regionalni vodovod Crnogorsko primorje. Dobitnik je Studentske nagrade glavnog grada Podgorice za 2018. godinu.



Dragan Belonić

Dragan Belonić je diplomirani inženjer elektrotehnike sa 25 godina radnog iskustva na poslovima revitalizacije opreme hidrogeneratora i koordiniranju i rukovođenju odgovarajućim organizacionim cjelinama u AD Elektroprivreda Srbije, HE „Đerdap 1“. Diplomirao je 1998. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smjeru za elektroenergetske sisteme. Profesionalno se usavršavao u Njemačkoj i Japanu.

Radno angažovanje u HE „Đerdap 1“ započeo je 1998. godine. Obavljao je poslove inženjera za elektro opremu, samostalnog inženjera za elektro opremu, glavnog inženjera za elektro opremu, zamjenika rukovodioca službe za revitalizaciju, a od maja 2023. godine je direktor HE „Đerdap 1“, što podrazumijeva rukovođenje, organizovanje i kontrolisanje rada u HE „Đerdap 1“, obavljanje poslova vezanih za proizvodnju električne energije, prevođenje plovnih objekata, održavanje opreme, uređaja i postrojenja u skladu sa važećim uputstvima i propisima, odgovara za izradu i realizaciju planova proizvodnje i održavanja i za izradu planova i realizaciju budžeta.

Autor je stručnih i naučnih radova objavljivanih u međunarodnim i nacionalnim publikacijama, učesnik je značajnih konferencija i stručnih i naučnih skupova u zemlji i inostranstvu. Član je Inženjerske komore Srbije i studijskog komiteta STK A1 CIGRE Srbija.



Vidosava Babić

Mr Vidosava Babić, dipl.inž.el, je rođena u Baru 1974. godine. Diplomirala je i magistrirala na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore 2000. i 2011. godine, respektivno, na smjeru Elektroenergetski sistemi. Pripravnički staž počela je u Crnogorskom Telekomu, a.d. Podgorica 2001. godine gdje nastavlja svoj angažman kao sistem inženjer za nadzor i održavanje fiksne telefonije u Sektoru tehnike Crnogorskog Telekoma. Od 2012. godine, u firmi ALL-ING d.o.o. Kotor, radila je na poslovima saradnika i odgovornog projektanta, odgovornog revidenta, kao i poslovima stručnog nadzora i tehničkog prijema objekata za fazu elektroinstalacija jake struje. Od 2017. godine zaposlena je u M:TEL d.o.o. Podgorica kao samostalni stručni saradnik u sektoru za planiranje i razvoj mobilne mreže. Obavlja poslove vezane za projektovanje, instalaciju i tehničke preglede baznih stanica iz oblasti energetike. Posjeduje Licencu za ovlašćenog inženjera za obavljanje djelatnosti izrade tehničke dokumentacije i građenje objekata, kao i Licencu revizora za obavljanje djelatnosti revizije tehničke dokumentacije i stručnog nadzora nad građenjem objekata. Od 2023. godine je sertifikovani auditor za energetske preglede i sertifikovanje zgrada, a od 2024. godine je član Upravnog odbora Crnogorskog centra za energetske efikasnost (CCEE).



Sandra Ivanović

Sandra Ivanović, dipl.inž.građ, je rođena u Ivangradu 1974. Diplomirala je na Fakultetu za graditeljski menadžment Univerziteta Union u Beogradu 2010. godine, na odsjeku Menadžment u građevinarstvu. Pripravnički staž otpočela je u GTP „Trešnja“ kao tehnički saradnik 2002. godine, a potom prelazi u „KLM Invest-Inženjering“ gdje kao viši stručni saradnik radi na pripremanju tendera, vođenju građevinske dokumentacije za izvođenje radova na adaptaciji fasada pod zaštitom spomenika kulture grada Beograda, u saradnji sa nadležnim sekretarijatima i humanitarnim organizacijama (UNDP, Španski crveni krst...). Godine 2004. prelazi u Hypo Alpe Adria Bank gdje u okviru Sektora investicija kao stručni saradnik radi na poslovima nabavke, uvoza i carine opreme i namještaja, adaptacija i opremanja filijala i ekspozitura, koordinacije eksternim firmama, planiranja troškova, budžeta, kontrole i praćenja projekata koje kreditira banka. Od 2008. godine vlasnik je i izvršni direktor građevinske firme S.A.R.D. d.o.o, u okviru koje se pored menadžerskog poslovanja bavi i učešćem i na značajnim tenderima i projektima u Crnoj Gori od kojih su najznačajniji: Luštica Bay, Porto Montenegro, Porto Novi, Villa Geba i mnoge druge vile i hoteli sa 4* i 5*, zgrade i privatni objekti. Od 2023. godine je sertifikovani auditor za energetske preglede i sertifikovanje zgrada i aktivni član Crnogorskog centra za energetske efikasnost (CCEE).



Đorđe Nedeljkov

Đorđe Nedeljkov, rođen je u Somboru, Republika Srbija, 1967. godine. Osnovnu i srednju školu završio je u Tivtu. Diplomom Više pomorske škole u Kotoru stekao je 2007., a Bečelor diplomu na Pomorskom fakultetu u Kotoru, 2008. godine. Zvanje specijaliste (spec. app) na istom fakultetu, odsjek Politehnika u pomorstvu, Univerzitet Crne Gore, stekao je 2016. godine. Od oktobra 1991. do juna 2019. godine zaposlen je kao aktivno vojno lice - komandir odjeljenja na podmornici/ratnom brodu, komandir brodskog odreda (upravitelj mašine) na školskom brodu „Jadran“, Ministarstvo odbrane, Mornarica Vojske Crne Gore. Od jula 2019. do decembra 2019. godine radio je kao upravitelj stroja (Yacht chief engineer) na S/Y „RIANA“. Od ljetnjeg semestra 2019/20 do danas angažovan je kao laborant na Pomorskom fakultetu u Kotoru, Univerzitet Crne Gore.



Kosta Strunjaš

Kosta Strunjaš, završio je osnovne studije Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore u Podgorici 2017. godine, na smjeru Elektronika, telekomunikacije i računari. U periodu od novembra 2014. godine do juna 2017. godine radio je na poziciji pripravnika u preduzeću Tangenta d.o.o. u Nikšiću. Nakon završenih osnovnih studija dobija unapređenje u preduzeću Tangenta d.o.o. na poziciju projektnog menadžera na kojoj ostaje do decembra 2022. godine. Za vrijeme rada u preduzeću Tangenta d.o.o. usko se specijalizovao za oblasti industrijske automatike, PLC, HMI, SCADA i Energy management sisteme. Krajem 2022. godine, skupa sa kolegom Aleksandrom Dukovićem, osniva startup Deltahes. Januara 2023. godine napušta preduzeće Tangenta d.o.o. i u potpunosti se posvećuje razvoju startup-a, čija je primarna djelatnost razvoj Internet of Things tehnologije u industrijskoj automatiki.



Nebojša Škerović

Nebojša Škerović je rođen u Baru 2000. godine, gdje je završio osnovnu školu i gimnaziju. Za pokazani uspjeh u osnovnoj i srednjoj školi dobio je diplomu „Luča A“. Upisao je 2019. godine osnovne studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici, smjer Energetika i automatika, koje je završio 2022. godine. Iste godine na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici je upisao master studije, smjer Automatika i industrijska elektrotehnika, gdje trenutno radi na master radu. Od januara 2023. godine zaposlen je firmi „Interkonekcija d.o.o.“ gdje radi kao trgovac električnom energijom i inženjer za analizu tržišta električne energije. U maju 2023. godine je učestvovao na VIII Savjetovanju CG KO CIGRE kao autor rada pod nazivom „Komparativna analiza najčešće korištenih električnih motora u automobilskoj industriji po pitanju performansi i efikasnosti“ u studijskom komitetu „Obrtne električne mašine“.



Amar Kapić

Dr Amar Kapić završio je osnovne studije, smjer Energetika i automatika, kao i magistarske studije, smjer Automatika, na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici 2015. i 2018. godine. Doktorsku disertaciju iz oblasti mikrosistema i mikroelektronike odbranio je 2023. godine na Saveznom politehničkom univerzitetu u Lozani (EPFL), Švajcarska, pod mentorstvom profesora Sandra Carrara. Njegov doktorski rad fokusiran je na razvoj višekanalnog sistema za praćenje temperature rosišta otpornog na zračenje i jako magnetno polje, namijenjenog za upotrebu u okviru detektora koji se koriste u fizici visokih energija. Istraživanje je sprovedeno u saradnji sa Evropskom organizacijom za nuklearna istraživanja (CERN) u Švajcarskoj. Trenutno je docent na Fakultetu za informacione tehnologije Univerziteta Mediteran u Podgorici i radi kao istraživač u CERN-u. Njegova istraživačka interesovanja obuhvataju razvoj naprednih kontrolnih i sigurnosnih sistema za detektore koji se koriste u fizici visokih energija, kao i projektovanje ugrađenih sistema i hardversko-softverskih interfejsa za karakterizaciju senzora.



Jovan Milović

Jovan Milović rođen je 1995. godine u Nikšiću. U rodnom gradu završio je Gimnaziju „Stojan Cerović“. Specijalističke studije završio je 2019. na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici, smjer Energetika i automatika. Radni angažman započinje 2019. godine u preduzeću Tangenta d.o.o. u Nikšiću, kao rukovodilac projekta i inženjer gradilišta. Profesionalni zadaci, u okviru pomenutog preduzeća, usmjereni su na projektovanje automatizacije procesa i industrije, elektrifikaciju i osvetljenje objekata, koordinaciju projekta, procjenu i organizaciju lokacije, opremu za dijagnostiku i rješavanje problema. Član je Inženjerske komore Crne Gore.



Aleksandar Lebl

Dr Aleksandar Lebl je naučni savjetnik, sada u penziji. Rođen je u Zemu-
nu 1957. godine. Diplomirao je 1981. godine i magistrirao 1986. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, a doktorirao 2009. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Od 1981. godine je radio u IRITEL-u, vodećoj kompaniji u Srbiji u oblastima istraživanja, razvoja, projektovanja, inženjeringa i proizvodnje u oblasti telekomunikacija, najprije u Sektoru za javne komutacione sisteme, a od 2011. godine u Sekretarijatu za naučni rad. Od 2015. godine radio je u Sektoru za radiokomunikacije, takođe u okviru IRITEL-a. Od 2006. godine posjeduje licencu odgovornog projektanta telekomunikacionih mreža i sistema. Bio je predsjednik Naučnog vijeća Instituta IRITEL. Autor je i koautor više od 170 naučnih i stručnih radova, od čega više od 50 u internacionalnim časopisima sa SCI/SCIE liste.



Ivan Martinović

Mr Ivan Martinović je rođen 1995. godine na Cetinju gdje je završio osnovnu školu i gimnaziju. Dobitnik je diplome „Luča” i priznanja Prijestonice Cetinje za postignute rezultate u toku obrazovanja. Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore u Podgorici, odsjek Elektronika, telekomunikacije i računari, upisao je 2014. godine. Kao jedan od najboljih studenata, upisuje postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici (odsjek Elektronika, telekomunikacije i računari, smjer Elektronika), gdje stiče zvanje magistra. Svoj prvi radni angažman zasnovao je na Univerzitetu Crne Gore, u prvom crnogorskom centru izvrsnosti BIO-ICT, kao saradnik u istraživanju. Krajem 2019. godine je izabran od strane Agencije za kontrolu i obezbjeđenje kvaliteta Visokog obrazovanja na listu eksperata iz reda studenata koji se angažuju u komisijama za sprovođenje postupka akreditacije i reakreditacije ustanova visokog obrazovanja u Crnoj Gori. Od maja 2020. godine do upisa na doktorske studije radno je bio angažovan kao inženjer medicinske opreme u kompaniji Glosarij. Doktorske studije upisuje u decembru 2020. godine na Univerzitetu Crne Gore kao stipendista Vlade Crne Gore, Ministarstva nauke. Doktorsko istraživanje realizuje na temu „Primjena vještačke inteligencije u analizi fluoroskopskih rendgenskih snimaka“. Tokom doktorskih studija realizovao je veći broj studijskih posjeta - Univerzitetu u Torontu, Sveučilištu u Zagrebu i Slicijumskoj dolini. Pored studijskih posjeta imao je priliku da pohađa ljetnju školu OxML23 u organizaciji AI for Global Goals na Univerzitetu u Oksfordu. Pored naučno-istraživačkih aktivnosti, veoma je posvećen promociji nauke. Aktivno je učestvovao u projektu Škola za XXI vijek (British Council), dok je trenutno angažovan od strane Vlade Crne Gore, Ministarstva prosvjete, nauke i inovacija, kao član radne grupe za izradu plana rada EdTech laboratorije/hub-a u crnogorskim obrazovnim institucijama. Dobitnik je studentske 13-to novembarske nagrade prijestonice Cetinje za 2023. godinu. Nositelj je priznanja WSIS Prize 2024 Champion, koje je dodijeljeno projektu „Air Quality Monitoring System“ u okviru Svjetskog samita o informacionom društvu od strane Međunarodne unije za telekomunikacije i Ujedinjenih nacija.



Ivan Vujović

Mr Ivan Vujović je Osnovne studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore, odsjek Elektronika, telekomunikacije i računari, smjer Telekomunikacije, okončao 2005. godine. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smjer Telekomunikacije, modul Sistemsko inženjerstvo i radio komunikacije, završio je 2013. godine. Osnovne studije (Bečelor i specijalističke) na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore, na odsjeku Energetika i automatika, smjer Elektroenergetski sistemi, završio je 2017. godine. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smjer Elektroenergetski sistemi, modul Postrojenja i oprema, završio je 2019. godine. 2020. godine je upisao doktorske akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, program Elektrotehnika i računarstvo, modul Elektroenergetske mreže i sistemi. Do sada je objavio 12 naučnih radova, a vlasnik je i izvršni direktor

firme čije su djelatnosti sistemi jake i slabe struje, kao i suvlasnik i izvršni direktor firme čije su djelatnosti primjena vještačke inteligencije i izrada softverskih rješenja. Tokom dosadašnje karijere projektovao je i izvodio radove sistema jake i slabe struje na više objekata u Crnoj Gori. Posjeduje sedam sertifikata vodećih svjetskih kompanija u oblasti sistema jake i slabe struje za implementaciju ponuđenih rješenja.



Vladan Durković

Dr Vladan Durković je završio Osnovne studije na odsjeku za Energetiku i automatiku u junu 2011. godine sa prosječnom ocjenom 9,23. Kao jedan od najboljih studenata bio je stipendista Ministarstva nauke i prosvjete Crne Gore, a 2012. godine primio je stipendiju i od Elektroprivrede Crne Gore kao jedan od pet najboljih studenata Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smjer Elektroenergetski sistemi, okončao je 2014. godine, gdje je na smjeru Elektroenergetski sistemi upisao doktorske studije. Odbranom doktorske disertacije 2021. godine pod nazivom „Razvoj novih tehničkih rješenja i matematičkih modela za analizu proizvodnje fotonaponskih elektrana velike snage” stekao je zvanje doktor nauka elektrotehnike i računarstva. Od 2016. godine zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici kao saradnik u nastavi. Objavio je preko 40 naučnih radova od kojih pet u renomiranim svjetskim časopisima, a od februara 2024. godine član je Centra mladih naučnika i umjetnika pri Crnogorskoj akademiji nauka i umjetnosti. Član je Upravnog odbora Nacionalnog Komiteta CIGRE od 2021. godine i predsjednik komiteta C4 – Tehničke performanse elektroenergetskih sistema. Od 2023. godine je imenovan za sekretara studijskog komiteta STK4 - Decentralizovana proizvodnja i efikasno korišćenje energetske izvora u okviru Nacionalnog Komiteta CIRED.



Željko R. Đurišić

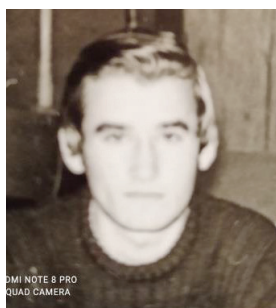
Dr Željko R. Đurišić je rođen 1972. godine u selu Babino, Berane, Crna Gora. Osnovnu školu je završio u rodnom selu, a srednju elektrotehničku školu u Beranama. Diplomске, magistarske i doktorske studije je završio na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smjeru Elektroenergetski sistemi (EES). Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je prošao sva saradnička i nastavnička zvanja i trenutno je zaposlen u zvanju redovni profesor pri Katedri za Elektroenergetske sisteme.

Zajedno sa prof. Dušanom Mikičićem, 2005. godine osnovao je predmet Obnovljivi izvori energije, a 2013. godine je inicirao osnivanje smjera Obnovljivi izvori energije na master studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, gdje je osnovao i Laboratoriju za elektrane. Od 2009. godine radi i kao gostujući profesor na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, gdje je osnovao predmete iz oblasti kvaliteta električne energije i integracije OIE u EES.

Koautor je četiri udžbenika, tri monografije međunarodnog značaja i jednog poglavlja u knjizi međunarodnog značaja. Autor/koautor je oko 250 naučnih/stručnih radova, od kojih je preko 30 publikovano u međunarodnim

časopisima sa SCI liste.

Bio je mentor pri izradi sedam doktorskih disertacija i preko 300 diplomskih i master radova na Elektrotehničkim fakultetima u Beogradu i Istočnom Sarajevu. Dobitnik je godišnje nagrade Privredne komore Beograda za najbolju doktorsku disertaciju na Univerzitetu u Beogradu za 2013. godinu. Dobio je nagradu za najbolji rad na vodećoj međunarodnoj konferenciji o energiji vjetra - European Wind Energy Conference - EWEC 2009, Marseille, France, 2009, kao i nagrade za najzapaženije radove na nacionalnim konferencijama CIGRE Srbija i CIGRE Crna Gora. Učestvovao je u realizaciji većeg broja projekata i rukovodio izradom više studija iz oblasti vjetroenergetike i solarne energetike.



Veselin Ilić

Dr Veselin Ilić, rođen je u Mojkovcu 1956. godine.

Srednju elektrotehničku školu i Elektrotehnički fakultet završio je u Podgorici, a postdiplomske studije u Beogradu, gdje je magistrirao i doktorirao. Autor je ili koautor više od 50 naučnih radova, stručnih radova, nalaza i mišljenja kao i trinaest univerzitetskih knjiga.

Autor je Zbirke riješenih zadataka iz električnih mjerenja. Bio je zaposlen u CGES-u i kao spoljni saradnik u Srednjoj školi u Mojkovcu. Dr Veselin Ilić danas je u penziji ali još uvijek posvećen profesionalnim izazovima.



Siniša Teodosić

Mr Siniša Teodosić rođen je 1980. godine. Visoku školu Tehničkih strukovnih studija, smjer Osnovne strukovne studije na studijskom programu elektrotehnike i računarstva, završio je u Čačku 2007. godine. 2016. godine na istom fakultetu završava specijalističke studije, smjer Elektrotehnika i računarstvo, a 2021. godine stiče zvanje magistra elektrotehnike na Fakultetu politehničkih nauka u Travniku, Bosna i Hercegovina. Od 2003. do 2010. godine profesionalno je angažovan u kompaniji BOS-PROJEKT d.o.o. iz Valjeva, Republika Srbija, u kojoj je radio kao inženjer na gradilištu, pripremao projektну dokumentaciju i upravljao sistemom menadžmenta. Od 2010. godine je na čelu kompanije BS-PROJEKT 2009 d.o.o. iz Valjeva i radi na poslovima organizovanja i izvođenja radova, svih inženjerskih i menadžerskih poslova. Oblasti kojima se bavi su sistemi jake struje (industrija – energetika), javna rasvjeta i sistemi slabe struje (detekcija požara, Ex instalacije, detekcija gasa). Posjeduje Licencu 850 Inženjerske komore Srbije, Licence A, B1, B2, B3, B4, B5 Sektora za vanredne situacije MUP-a Republike Srbije i Licence LT2, LT3, LT4 – Sistemi tehničke zaštite, MUP-a Republike Srbije.



Ranko Vojinović

Dr Ranko Vojinović je rođen u Žabljaku 1960. godine. Osnovnu školu je završio u Trsi, opština Plužine, a gimnaziju i Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore u Podgorici. Magistrirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smjeru za telekomunikacione i računarske mreže. Na istom fakultetu je doktorirao sa disertacijom iz oblasti računarskih mreža.

Zaposlen je u MUP-u Crne Gore, kao načelnik Odjeljenja za elektronske sisteme policije. Učestvovao je u izradama važnih dokumenata - Strategija razvoja elektronskih komunikacija u Crnoj Gori, Zakon o elektronskim komunikacijama, kao i projekata - predsjednik je Tehničkog odbora za implementaciju projekta Wireless Montenegro, čiji je nosilac Vlada Crne Gore. Angažovan je kao predavač na Policijskoj akademiji u Danilovgradu. Više godina je izvodio nastavu na Fakultetu za pomorstvo Univerziteta Crne Gore. Na Fakultetu za informacione tehnologije Univerziteta Mediteran je angažovan od njegovog osnivanja, i ima zvanje redovnog profesora. Kao profesor na pomenutom fakultetu, autor je udžbenika, priručnika i četiri hrestomatije za predmete koje predaje. Koautor je šest udžbenika za gimnaziju i pet udžbenika za srednje stručne škole. Radove iz oblasti računarske mreže, protokoli u računarskim mrežama i teorija telekomunikacionog saobraćaja, objavljivao je u međunarodnim i nacionalnim časopisima. Predložio je novi model protokola za kontrolu greške u mrežama za prenos podataka, što je objavljeno u jednom od vodećih svjetskih časopisa iz ove oblasti.

















Електропривреда Црне Горе
АД Никшић



GENERALNI SPONZORI





Snaga prenosa



GENERALNI SPONZORI



CIKOM informatički inženjering **30 YEARS OF EXCELLENCE** **RITAL**

**POSVEĆENOST TEHNOLOŠKIM INOVACIJAMA
TOKOM TRI USPJEŠNE DECENIJE**

- Projektovanje
- Softverski razvoj
- Cyber security
- Mrežna infrastruktura
- Data centri
- Edukacija
- Podrška

www.cikom.com 020 21 81 81 Dalmatinska 78, Podgorica

Life Is On

Schneider
Electric

Budućnost održavanja elektro-opreme

Kada posmatramo životni vek bilo kog elektrouređaja možemo da vidimo da postoji 5 faza: Planiranje, Instalacija, Operativni rad, Održavanje i Završavanje-Modernizacija. Svaka od ovih faza je važna, ne postoji više ili manje važna. I u svakoj od njih je potrebno planirati održavanje opreme. Zahvaljujući internetu i velikim količinama podataka koje se prikupljaju, održavanje opreme ide ka novim strategijama. Nakon reaktivnog, preventivnog i proaktivnog održavanja, došli smo do Održavanja zasnovanog na uslovima u kojima uređaj radi (takozvano Condition Based Maintenance).

Većina elektrouređaja u zadnjih par godina se proizvodi kao „internet ready“, tj. spremni za slanje podataka preko interneta. Dakle već u fazi Planiranja može biti planirano i održavanje opreme – ne mora se čekati da istekne fabrička garancija da bi oprema bila predviđena za održavanje. Ovakve digitalne usluge koje Schneider Electric plasira u svim oblastima energetike (bez obzira da li je reč o niskonaponskoj ili srednje naponskoj opremi, industrijskoj automatici, ili uređajima IT infrastrukture – UPS, hlađenje) donose prednosti za sve u „elektrosvetu“. Krajnji korisnik oslobađa svoje ljudske resurse da se bave svojim osnovnim poslom, kompanije koje održavaju opremu se oslanjaju na proizvođača opreme. A ko bolje poznaje opremu od proizvođača opreme? Schneider Electric koristi velike količine podataka koje dolaze sa senzora na opremi, kako bi na osnovu veštačke inteligencije i mašinskog učenja davao relevantne i korisne smernice servisnim partnerima i/ili krajnjim korisnicima kako i kada opremu treba održavati. Na ovaj način uspeva se da oprema radi u optimalnim uslovima, da se periodi održavanja mogu „dinamički“ planirati i pomeriti sa 1 godišnje na čak jednom u 2-3 godine. Tako se smanjuju troškovi održavanja, a takođe i periodi zastoja opreme radi održavanja. Ipak, najvažnije je da se ovakvim Održavanjem zasnovanom na uslovima u kojima uređaj radi se sprečavaju neplanirani otkazi i troškovi zastoja linija koji najčešće koštaju mnogo više od ulaganja u digitalne servise.

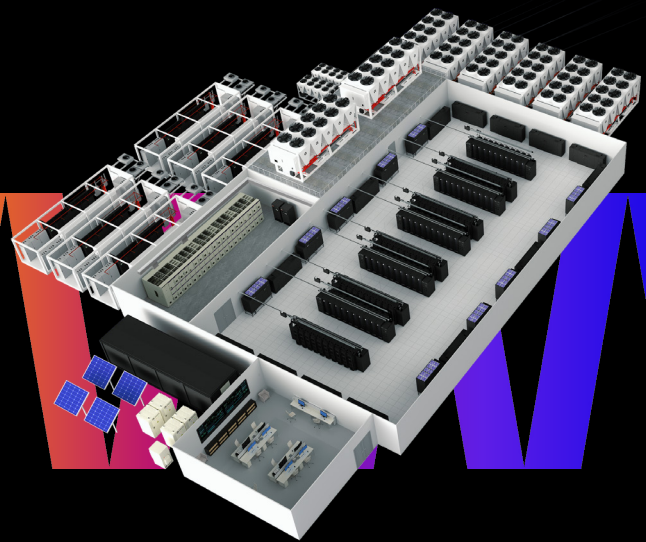
SREBRNI SPONZORI



keep it humming™

Solve AI power and cooling.

Vertiv™ 360AI



ZARJA
ELEKTRONIKA

BS
PROJEKT

Safely into a new day!

PROIZVODNJA,
MONTAŽA,
INŽENJERING
I DIZAJN SISTEMA
I UREĐAJA TEHNIČKE
ZAŠTITE

PREDUZEĆE ZA
PROIZVODNJU,
PROMET,
USLUGE I INŽENJERING

INTEGRACIJA SISTEMA TEHNIČKE ZAŠTITE

COMPANY FOR
PRODUCTION, TRADE,
SERVIS AND
ENGINEERING

OFFICE@BSPROJEKT2009.RS

INFO@ZARJA.COM

PROJEKT 2009 doo
VALJEVO



Fire alarm
System 3000



ADICOS
Hotspot



SPECTREX
javljač plamena

SREBRNI SPONZORI



PANDUIT™



UCL SWIFT

KLEIN TOOLS
For Professionals... Since 1857



- mrežna infrastruktura
- industrijsko-električna infrastruktura
- rešenja za zavarivanje optičkih vlakana
 - mrežni testerji
- mjerni instrumenti
 - ručni alati

- komunikacijski ormari
- ormarići
- kablovski distributivni sistem
- priključni paneli
- priključni kablovi
- konektori i moduli
- vezice za kablove
- termobužir
- ručni štampači
- naljepnice

- mali električni materijal
- kablovski snopovi
- alat za postavljanje vezica
- sistemi uzemljenja
- fuzijski zavarivači
- mjerni instrumenti za certifikaciju i mjerenje karakteristika optičkih i mrežnih kablova
- alati i instrumenti za mrežnu infrastrukturu
- mjerni instrumenti za električne instalacije
- alati i pribor za zanatlije

Dobro došli u naš izložbeni prostor na Tržaškoj cesti u Ljubljani!



EGAL, d.o.o., Ljubljana
Tržaška cesta 371
SI - 1000 Ljubljana

T +386 (0)31 737 831
sales@egal-eu.com
www.egal-eu.com

BRONZANI SPONZORI

Switches, Sockets & Home Automation
Lighting Management
Structured Cabling
Access Control
Enclosures
Cable Management
Circuit Breakers
Transformers
Busbar
UPS

legrand

COMPLETE SOLUTIONS **legrand**

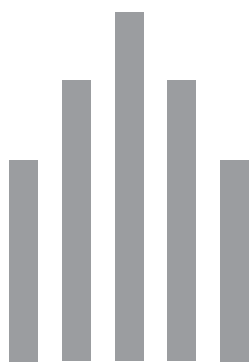
ETI

ETI svojim inovativnim proizvodima i rješenjima omogućuje sigurno korištenje moderne električne mreže milijunima ljudi diljem svijeta. Nasi osigurači i prekidači štite domove i fabrike, fotonaponske elektrane i električne automobile. U ETI-u doprinosimo sigurnoj, održivoj i zelenoj budućnosti.

etiGroup
www.etigroup.com

Iza svakog bezbrižnog osmijeha stoji 1988 pouzdanih ETI-evih ljudi.

Gradite sa nama sigurnu budućnost



zetogradnja

TELEMONT

OSTALI SPONZORI



SKEI



INŽENJERSKA KOMORA CRNE GORE
ENGINEERS CHAMBER OF MONTENEGRO

