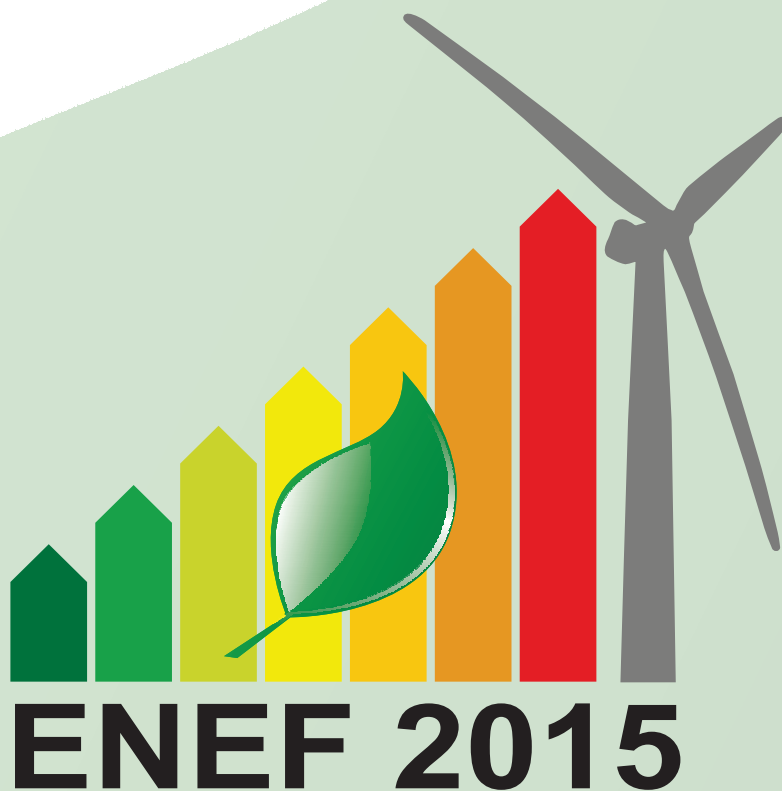


Simpozijum Energetska efikasnost

Banja Luka, Bosna i Hercegovina
25-26. septembar 2015. godine

Zbornik radova



Organizatori



LIR
evolution

**Univerzitet u Banjoj Luci
Elektrotehnički fakultet**



**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
UNIVERZITET U BANJOJ LUCI**

**Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost
ENEF 2015**

Zbornik radova

**Banja Luka
Republika Srpska, BiH
25-26. septembar 2015.**

**Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost
ENEf 2015**

Banja Luka,
25-26. septembar 2015.

Organizatori



Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci



Savez energetičara Republike Srpske, Banja Luka



Uređivački odbor

Branko Dokić, Čedomir Zeljković, Bojan Erceg

Glavni urednik

Branko Dokić

Odgovorni urednik

Čedomir Zeljković

Tiraž

60 komada

Sponzor



Schneider Electric, Bosna i Hercegovina

Predsjednik Organizacionog i Programskog odbora

Branko Dokić, Univerzitet u Banjoj Luci, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

Članovi Programskog odbora

prof. dr Branko Dokić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka
prof. dr Tatjana Pešić-Brđanin, Elektrotehnički fakultet Banja Luka
prof. dr Branko Blanuša, Elektrotehnički fakultet Banja Luka
doc. dr Petar Matić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka
doc. dr Čedomir Zeljković, Elektrotehnički fakultet Banja Luka
prof. dr Milenko Stanković, Arhitektonsko-građevinski-geodetski fakultet Banja Luka
doc. dr Saša Čvoro, Arhitektonsko-građevinski-geodetski fakultet Banja Luka
doc. dr Darija Gajić, Arhitektonsko-građevinski-geodetski fakultet Banja Luka
prof. dr Nikola Rajaković, Elektrotehnički fakultet Beograd
Akademik Pantelija Dakić, Akademija nauka i umjetnosti RS
prof. dr Petar Gvero, Mašinski fakultet Banja Luka
prof. dr Predrag Petković, Elektronski fakultet Niš
prof. dr Vančo Litovski, Elektronski fakultet Niš
prof. dr Vladimir Katić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
prof. dr Zdravko Milovanović, Mašinski fakultet Banja Luka
Dragoljub Davidović, Savez energetičara RS, Banja Luka

Članovi Organizacionog odbora

prof. dr Branko Dokić
prof. dr Tatjana Pešić-Brđanin
prof. dr Branko Blanuša
prof. dr Zoran Đurić
doc. dr Petar Matić
doc. dr Čedomir Zeljković
doc. dr Saša Čvoro
mr Mladen Knežić
mr Željko Ivanović
Radomir Šobot
Slaviša Jelisić
Duško Mijatović

Sekretarijat

Milosava Radonjić
Ognjen Čalić
Brankica Oparnica
Bojan Erceg
Đorđe Lekić
Predrag Mršić

www.enef.etfbl.net

enef@etfbl.net

Predgovor

U novembru 2013. godine u Banjoj Luci održano je prvo izdanje simpozijuma Energetska efikasnost - ENEF. Na ceremoniji zatvaranja organizatori i učesnici su pozitivno ocijenili uspješnost održanog skupa, te su obećali da prvi ENEF neće biti i posljednji, nego da će sve učiniti da se uspostavi tradicija održavanja naučno-stručnog savjetovanja u Banjoj Luci na temu energetske efikasnosti. Odlučeno je da se ENEF održava svake druge (neparne) godine i naredno druženje je zakazano za jesen 2015. godine.

Sa zadovoljstvom konstatujem da je dato obećanje ispunjeno, te da je ove godine u periodu 25-26. septembra održan drugi simpozijum Energetska efikasnost - ENEF 2015. Simpozijum su organizovali Univerzitet u Banjoj Luci i Savez energetičara Republike Srpske uz podršku agencije LIR Evolucija iz Banje Luke. Mjesto održavanja je Elektrotehnički fakultet, a od članica Univerziteta programsku i organizacionu podršku pružile su kolege sa Mašinskog i Arhitektonsko-građevinsko-geodetskog fakulteta. Sponzorsku podršku, kao i kod prvog izdanja simpozijuma obezbijedila je kompanija *Schneider Electric*.

Na ovogodišnjem ENEF-u registrovano je 60 učesnika. Simpozijum je trajao dva dana. Prvog dana nije bilo paralelnih sesija nego je rad organizovan u jednoj niti, kombinovanjem oblasti elektrotehnike, mašinstva i građevine, sa ciljem što intenzivnijeg upoznavanja, druženja i razmjene iskustava svih struka koje se bave tematikom poboljšavanja energetske efikasnosti. Drugog dana, radi optimalnog iskorišćenja vremena, organizovane su četiri sesije, od kojih su dvije po dvije održavane paralelno.

Poseban pečat simpozijumu dala su tri predavanja po pozivu. Prof. dr Dušan Gvozdenac sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu održao je predavanje pod naslovom „Efikasno korišćenje prirodnih resursa i održivi razvoj” u kojem se osvrnuo na efikasno korišćenje energije, ali i korišćenje ostalih prirodnih resursa koji su u velikoj mjeri ugroženi (voda, riblji fond, fosfati, rijetki elementi itd). Prof. dr Darko Marčetić, takođe sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, predavanje je naslovio „Pravci razvoja savremenih energetski efikasnih elektromotornih pogona namenjenih za uređaje široke potrošnje” i govorio je o aktuelnim trendovima u razvoju pogona sa kaveznim asinhronim motorom i sinhronim motorom sa permanentnim magnetima na rotoru. Treće predavanje pod naslovom *”Sustainability and efficiency of nuclear power: current situation and future trends”* održala je prof. dr Jasmina Vujić sa Univerziteta Kalifornije iz Berklija. Fokus ovog predavanja bili su trenutni status nuklearne tehnologije u svijetu i pravci razvoja ka bitnoj ulozi u održivoj i efikasnoj energetici budućnosti.

U regularnim tehničkim sesijama izložen je 21 recenziran rad. Prof. dr Vladimir Katić sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu izložio je pozivni rad naslovljen „Energetska efikasnost mrežnih fotonaponskih elektrana – primer FNE FTN Novi Sad” u kojem je analizirana uspješnost rada jedne fotonaponske elektrane nakon njene višegodišnje eksploatacije. Prikazano je i nekoliko zanimljivih prezentacija. Dr Ognjenka Zrilić iz agencije LIR Evolucija govorila je o međunarodnim projektima *SmartInno* i *Credo*, pod okriljem kojih je i obavljen dio organizacionih poslova ovogodišnjeg ENEF-a. Predrag Tešić iz Ministarstva industrije, energetike i rudarstva Vlade RS učesnike Simpozijuma je upoznao o aktuelnim dešavanjima u regulatornom okviru za energetska efikasnost u Republici Srpskoj. Milenko Krivokuća i Danijel Vejin, inženjeri kompanije *Schneider Electric*, prezentovali su paletu pametnih ormara za razvod električne energije koji značajno pomažu u unapređenju energetske efikasnosti.

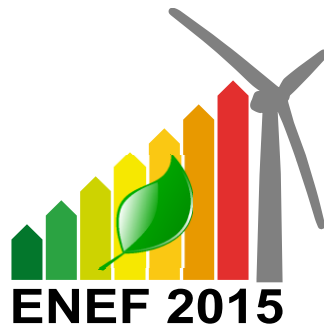
Na kraju konstatujem da je i ovaj ENEF u potpunosti opravdao očekivanja, te da je zadržan željeni nivo kvaliteta radova i izlaganja. U ime Programskog i Organizacionog odbora, zahvaljujem se autorima radova, članovima Programskog i Organizacionog odbora, pojedincima i institucijama koji su kroz učešće ili pomoć pri organizaciji, dali svoj doprinos ovom Simpozijumu.

Do 2017. godine i trećeg izdanja simpozijuma Energetska efikasnost - ENEF

Srdačno Vas pozdravlja,

Prof. dr Branko Dokić,

Predsjednik Programskog i Organizacionog odbora simpozijuma



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015
25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesije Simpozijuma

Sesija A1

Predsjedavajući: Vladimir Katić, Nikola Rajaković

Sesija A2

Predsjedavajući: Zdravko Milovanović, Saša Čvoro

Sesija B1

Predsjedavajući: Darko Marčetić

Sesija B2

Predsjedavajući: Petar Gvero

Sesija C1

Predsjedavajući: Branko Blanuša

Sesija C2

Predsjedavajući: Predrag Petković

Sadržaj

Sesija A1

Darko Marčetić, Marko Gecić

PRAVCI RAZVOJA SAVREMENIH ENERGETSKI EFIKASNIH ELEKTROMOTORNIH POGONA NAMENJENIH ZA UREĐAJE ŠIROKE POTROŠNJE	3
---	---

Sesija A2

Ilija Batas Bjelić, Nikola Rajaković

DOPRINOS OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE I ELEKTRIČNIH VOZILA U DOSTIZANJU NACIONALNIH CILJEVA ENERGETSKE EFIKASNOSTI	17
--	----

Vladimir A. Katić, Zoltan Čorba, Boris Dumnić, Dragan Milićević, Bane Popadić, Ilija Kovačević

ENERGETSKA EFIKASNOST MREŽNIH FOTO-NAPONSKIH ELEKTRANA PRIMER FNE “FTN NOVI SAD”	20
---	----

Zdravko N. Milovanović, Svetlana R. Dumonjić-Milovanović

ENERGETSKA EFIKASNOST KOGENERACIJSKE PROIZVODNJE ENERGIJE I OGRANIČENJA U REPUBLICI SRPSKOJ	26
--	----

Darija Gajić

ODREĐIVANJE PARAMETARA ZA ENERGETSKU OPTIMIZACIJU TRANSPARENTNIH ELEMENATA OMOTAČA STAMBENIH ZGRADA U BIH	39
--	----

Sesija B1

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Đorđe Lekić

TRENDOVI IMPLEMENTACIJE INTELIGENTNIH ELEKTROENERGETSKIH MREŽA	47
---	----

Predrag Mršić, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković

DEMONSTRACIJA UPOTREBE LOKATORA KVAROVA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI	52
---	----

Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić

PRORAČUN MAGNETNE INDUKCIJE U BLIZINI SREDNENAPONSKIH NADZEMNIH VODOVA ZA POTREBE DETEKCIJE STRUJE KVARA	58
---	----

Branimir N. Petrović

SAVREMENE METODE ZA OGRANIČAVANJE STRUJA KRATKOG SPOJA U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA U SLUŽBI ENERGETSKE EFIKASNOSTI	64
--	----

Jelena Milojković, Vančo Litovski, Miljana Milić

PREDVIĐANJE MESEČNE POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE NA NIVOU PRIGRADSKJE TRAFOSTANICE	70
--	----

Sesija B2

Edin Dolićanin, Bojan Kovačić, Božidar Stanić

PROJEKAT ENERERE U SVETLU SVEOBUHVATNOG PRISTUPA VISOKOŠKOLSKOJ NASTAVI IZ OBLASTI ENERGETSKE EFIKASNOSTI	79
--	----

Tatjana Pešić-Brđanin, Branko Dokić

ENERGETSKI EFIKASNA UNUTRAŠNJA POLUPROVODNIČKA RASVETA	83
---	----

Danijela Kardaš, Petar Gvero, Nijaz Delalić, Siniša Rodić

SISTEMSKO UPRAVLJANJE ENERGIJOM U BOSNI I HERCEGOVINI	87
--	----

Sesija C1

Zdravko N. Milovanović, Svetlana R. Dumonjić-Milovanović

ALGORITAM POSTUPKA OPTIMIZACIJE IZBORA LOKACIJE NOVIH TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA (TEP) I ENERGETSKA EFIKASNOST95

Zdravko N. Milovanović, Momir Samardžić

ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI RADA TE UGLJEVIK ZA PERIOD 2004-2014. GODINA105

Radenko Marjanović, Petar Matić

POBOLJŠANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI U PUMPONOM POSTROJENJU ODABIROM ODGOVARAJUĆEG ELEKTROMOTORNOG POGONA SA FREKVENTOM REGULACIJOM114

Dejan Stevanović, Milutin Petronijević, Predrag Petković

KARAKTERIZACIJA ČETVOROKVADRANTNOG JEDNOSMERNOG POGONA UZ POMOĆ MODIFIKOVANE STANDARDNE MERNE GRUPE118

Sesija C2

Jovan P. Šetrajčić, Igor J. Šetrajčić, Siniša M. Vučenović, Danijela Bradić

EFIKASNOST FOTOTERMALNIH KONVERTORA SA NANOFILM-PREVLAKAMA125

Borisav Jovanović, Predrag Petković, Milunka Damnjanović, Vančo Litovski

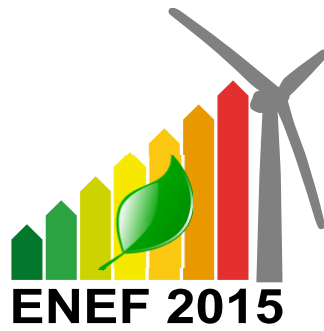
MINIMIZACIJA DINAMIČKE POTROŠNJE IP BLOKA MIKROKONTROLERA128

Srđan Đorđević, Marko Dimitrijević, Dejan Stevanović, Slobodan Bojanić

NOVI METOD ZA DETEKCIJU DOGAĐAJA U NEINVAZIVNOM MONITORINGU POTROŠNJE132

Maja Popovic, Marius Graneas, Donn Morrison, Branko Dokic

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF MICROCONTROLLERS136



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015
25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesija A1

Sesija A1

Darko Marčetić, Marko Gecić

**PRAVCI RAZVOJA SAVREMENIH ENERGETSKI EFIKASNIH
ELEKTROMOTORNIH POGONA NAMENJENIH ZA UREĐAJE ŠIROKE POTROŠNJE.....3**

PRAVCI RAZVOJA SAVREMENIH ENERGETSKI EFIKASNIH ELEKTROMOTORNIM POGONIMA NAMENJENIM ZA UREĐAJE ŠIROKE POTROŠNJE

Darko Marčetić, Marko Gecić, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*

Sadržaj – Rad se bavi trendovima u razvoju pogona za uređaje široke potrošnje pogonjenih kaveznim asinhronim motorom i sinhronim motorom sa permanentnim magnetima na rotoru. Prvo su opisana rešenja pomoću kojih se dolazi do uobičajenih pogona opšte namene koji su relativno niske cene i relativno jednostavni za masovnu proizvodnju. Zatim je diskutovana sigurnost rada tih pogona i robusnost rada pri značajnim ekskurzijama parametara motora i napojne mreže. Konačno, obrađeni su postupci kojim se uvećava i energetska efikasnost ovih pogona i time prati globalni razvojni trend. Opisane su metode za optimizaciju gubitaka snage sinhronih i asinhronih mašina. Za oba tipa motora dat je pregled metoda koje se baziraju na algoritmima pretrage, kao i metoda koje su zasnovane na modelu procesa. Na kraju, dati su primeri poboljšanih energetske efikasnosti oba tipa motora u jednoj primeni pogona opšte namene.

1. UVOD

Globalno tržište tradicionalno zahteva umanjeње cene, povećanje robusnosti rada i uprošćenje instalacije pogona opšte namene. Na ovom tržištu opstaju samo oni pogoni koji se proizvode u masovnim serijama, čija izrada zahteva minimalni utrošak materijala i energije, i čija je konačna proizvodna cena mala. Najnoviji zahtev pred pogonima opšte namene je i uvećanje energetske efikasnosti [1].

Zbog svoje cene i robusnosti motori naizmjenične struje (asinhroni motor - AM i sinhroni motor - SM) su potpuno potisnuli motore jednosmene struje u pogonima opšte namene. Ovim izborom se pokreće razvoj niza metoda za upravljanje ovim motorima bez upotrebe velikog broja skupih senzora, kablova i signal konvertora koji su sada neprihvatljivi, a bili su sastavni deo jednog servo pogona. Dodatno, pokreće se i rešavanje problema robusnosti rada pogona bez senzora, pogotovo pri značajnim ekskurzijama parametara motora i uz značajne varijacije napojne mreže. Ovim se rešava i problem raznih sigurnosnih regulativa, koje dozvoljavaju umanjeње broja senzora samo u slučaju da se pri tom ne naruši sigurni rad pogona u svim mogućim uslovima. Umanjenje cene i uvećanje robusnosti predstavljaju oprečne zahteve koji su bili pokretački mehanizam razvoja pogona opšte namene [1]–[13]. Prvobitno, u većini pogona za široku potrošnju je korišćen AM, uglavnom zbog mogućnosti skalarne kontrole koja je dozvoljavala rad u režimu slabljenja polja, ali i start motora sa punim opterećenjem bez početne informacije o položaju vratila. SM sa stalnim magnetima na rotoru (PMSM), iako atraktivan zbog veće efikasnosti na malim i srednjim brzinama, ulazi u pogone opšte namene tek primenom vektorske kontrole i metoda za procenu položaja rotora. Ovim je omogućeno stabilno upravljanje SM bez davača na vratilu u širokom opsegu brzina, uključujući sam start pod opterećenjem [8] i rad u režimu slabljenju polja. Istovremeno, pogoni sa AM takođe koriste prednosti vektorske kontrole i uvećavaju kvalitet rada procenom brzine

i položaja rotora kao i raspregnutim upravljanjem fluksom i momentom.

Najnoviji izazov za pogone opšte namene je potreba za uvećanjem energetske efikasnosti, tj. smanjenje gubitaka nastalih tokom elektromehaničke konverzije koji se mogu kontrolisati. Gubici u pogonu se sastoje od gubitaka u pretvaraču i gubitaka u motoru. Gubici u motoru se sastoje od gubitaka u bakru statora, mehaničkih gubitaka i gubitaka u gvožđu. Gubici u bakru su proporcionalni kvadratu struje kroz namotaje, dok se gubici u gvožđu sastoje od histerezisnih gubitaka i gubitaka usled vihornih struja. Dok se mehanički gubici ne mogu kontrolisati, gubici u bakru i gvožđu se mogu smanjiti odgovarajućim upravljanjem. Veliki broj autora danas paralelno radi na smanjenju ukupnih kontrolisanih gubitaka konverzije kod AM i SM [14]–[38]. Ova borba se prenosi i na tržište pogona opšte namene, pogotovo ako je pogon predviđen za rad na velikim brzinama. Pri malim brzinama, SM ima prednost po pitanju energetske efikasnosti jer ima nultu rotorsku struju i manju struju statora. Na velikim brzinama, SM gubi ovu prednost. Prvo, gubici u gvožđu postaju značajni kod oba tipa motora. Drugo, gubici u bakru SM naglo rastu sa brzinom uvećanjem amplitude statorske struje radi ostvarenja slabljenja polja. Ovo opet daje prednost AM koji na velikim brzinama ima zanemarljivo malu struju magnećenja, pa se deo gubitaka u bakru proporcionalan kvadratu struje statora smanjuju sa brzinom.

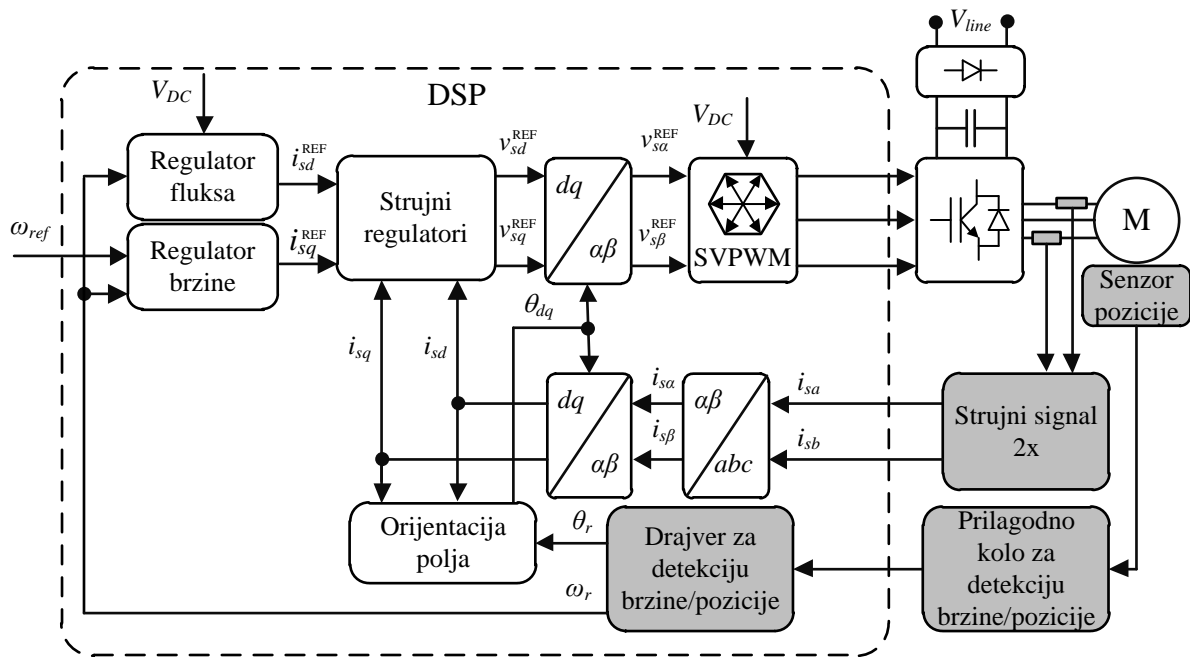
Ovaj rad obrađuje problematiku izrade modernog energetske efikasnog pogona namenjenog za potrebe uređaja široke potrošnje. U poglavlju dva su obrađeni trendovi u razvoju jeftinih ali robusnih pogona opšte namene sa AM i SM. U trećem poglavlju je dat pregled metoda za uvećanje efikasnosti SM u ovim pogonima, dok su u četvrtom poglavlju date metode za uvećanje efikasnosti AM.

2. VEKTORSKI POGONI OPŠTE NAMENE SA MINIMALNIM BROJEM SENZORA

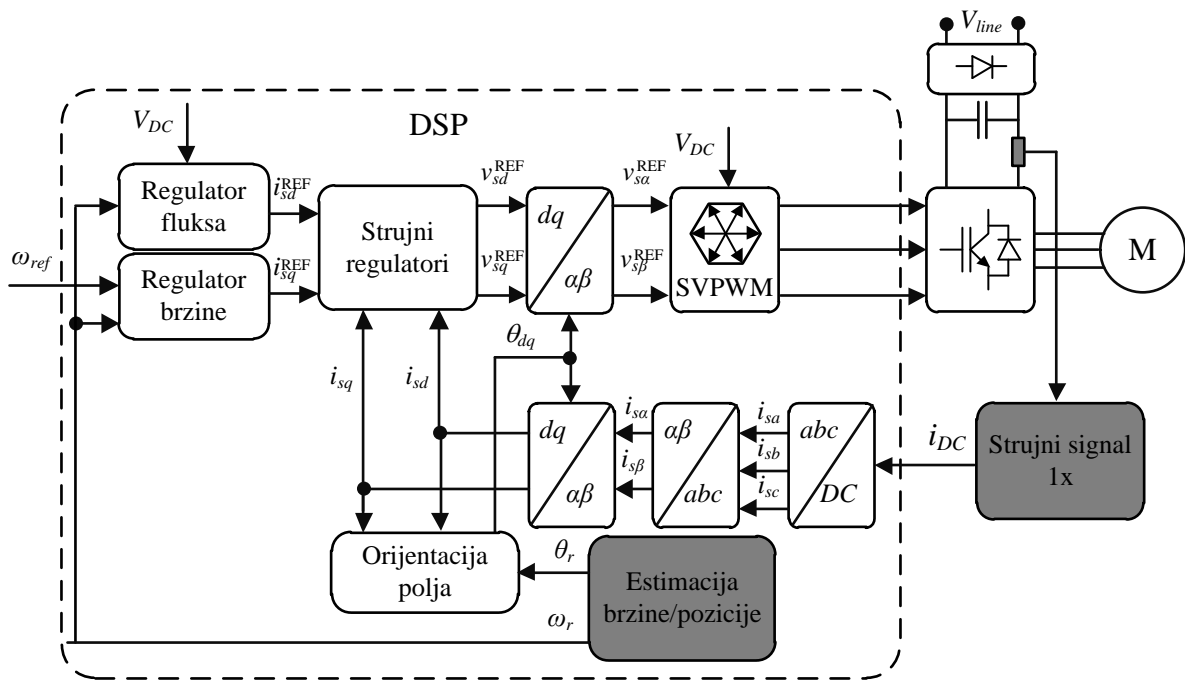
Da bi zadovoljili sve gore pomenute zahteve tržišta većina pogona široke potrošnje danas je vektorski upravljano. Vektorsko upravljanje poboljšava dinamičke performanse pogona i kontrolu vektora struje statora čime se omogućuje robusniji rad pri promeni parametara motora i pri promeni uslova napajanja. Ovim upravljanjem se i proširuje opseg brzina pogona, pogotovo u slučaju SM. Konačno, vektorsko upravljanje omogućuje i umanjeње gubitaka kod oba tipa motora. Ipak, mana vektorskog upravljanja je skup hardver za merenje vektora struje statora i trenutnog položaja rotora.

Na slici 1 je prikazan blok dijagram tradicionalnog rešenja vektorski upravljano pogona sa AM ili SM. U pogon su ugrađena dva LEM senzora struje i jedan davač položaja na vratilu. Oba senzora zahtevaju i dodatna kola za obradu signala pre ulaska u mikroprocesor ili DSP.

Na slici 2 je prikazan blok dijagram pogona široke potrošnje sa AM ili SM koji mora da bude jeftin i prost za ugradnju, tako da poseduje minimalan broj senzora.



Sl. 1. Blok dijagram vektorski upravljano servo pogona.



Sl. 2. Blok dijagram vektorski upravljano pogona za široku potrošnju sa minimalnim brojem senzora.

Da bi pogon opšte namene dobio sve prednosti vektorskog upravljanja i ostvario optimalan rad neophodno je na neki način proceniti položaj i brzinu rotora i time ostvariti raspregnuto upravljanje fluksom i momentom. Brzina i položaj rotora se procenjuju na osnovu raspoloživih terminalnih veličina, struja i napona namotaja statora. Radi daljeg umanjenja broja senzora u pogonu uobičajeno je da se napon motora ne meri direktno, već procenjuje na osnovu napona jednosmernog međukola i PWM povorke impulsa.

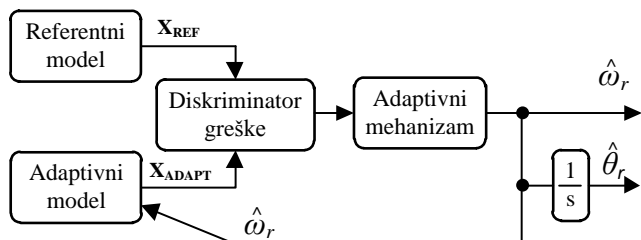
Rad bez senzora na vratilu dovodi do različitih izazova kod AM i SM, [2]–[10]. Danas se sve manje koriste prosti ali

parametarski zavisni kalkulatori ili *open-loop* estimatori položaja fluksa i brzine rotora. U literaturi se uglavnom izdvajaju dva načina procene položaja i brzine rotora, MRAS (*Model Reference Adaptive Systems*) estimatori (slika 3) i potpuni observeri fluksa i brzine rotora (slika 4). MRAS princip se zasniva na dva modela različitih struktura koji procenjuju istu promenljivu stanja motora. Model čija procena odabrane promenljive stanja ne zavisi od brzine i položaja rotora se uzima za referentni dok se rezultat drugog modela adaptira upravo korekcijom informacije o brzini rotora. Kod AM se koriste razne promenljive stanja, kao što

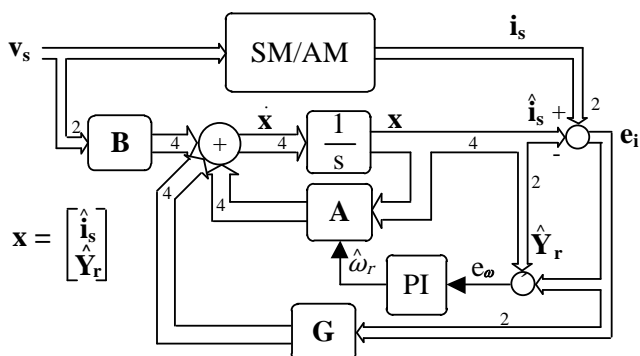
je vektor fluksa rotora, vektor napona, reaktivna snaga itd. [2]–[4]. Kod SM za referentni model se često koristi sam motor, čiji se napon, struja ili aktivna/reaktivna snaga mere i poredi sa izlazom adaptivnog modela [5].

Opserver sistema (eng. Observer) je estimator stanja koji ima povratnu spregu tj. korektivno dejstvo. Observeri AM i SM se grade na osnovu modela motora u prostoru stanja $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u}$, $\mathbf{y} = \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}$, gde je \mathbf{x} odabrani vektor stanja, \mathbf{A} matrica stanja, \mathbf{B} matrica ulaza i \mathbf{C} matrica izlaza sistema. Vektor stanja \mathbf{x} uobičajeno čine kombinacija dva vektora, vektor statorske struje \mathbf{i}_s kao merljivo stanje i odabrani vektor stanja motora \mathbf{Y}_r kao na primer fluks ili elektromotorna sila. Pošto se statorska struja ujedno i meri, poređenjem merene i u opserversu izračunate struje dobija se informacija o grešci ($\mathbf{e}_i = \mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s$) koja služi kao korektivna akcija. Opserver vrši korektivno dejstvo preko korektivne matrice \mathbf{G} , $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u} + \mathbf{G}\cdot\mathbf{e}_i$. Korektivna akcija potpuno ili delimično eliminiše grešku u modelu ili parametrima opserversa i time dovede do tačnije procene odabranog stanja, ali i brzine i položaja rotora, što je bio i cilj [6]–[7].

Dodatni problem se javlja pri startu sa punim opterećenjem SM bez davanja položaja. Za razliku od AM, optimalan start SM zahteva poznavanje početnog položaja rotora. U režimu mirovanja SM ne postoji indukovana EMS rotora tako da se estimatori i observeri zasnovani na modelu ne mogu koristiti. Iz tog razloga se razvija čitav niz metoda za procene položaja SM koje se zasnivaju na odzivu motora na utisnuti test signal [8]–[10].



Sl. 3. Blok dijagram MRAS estimacije brzine i položaja rotora u pogonu sa AM/SM

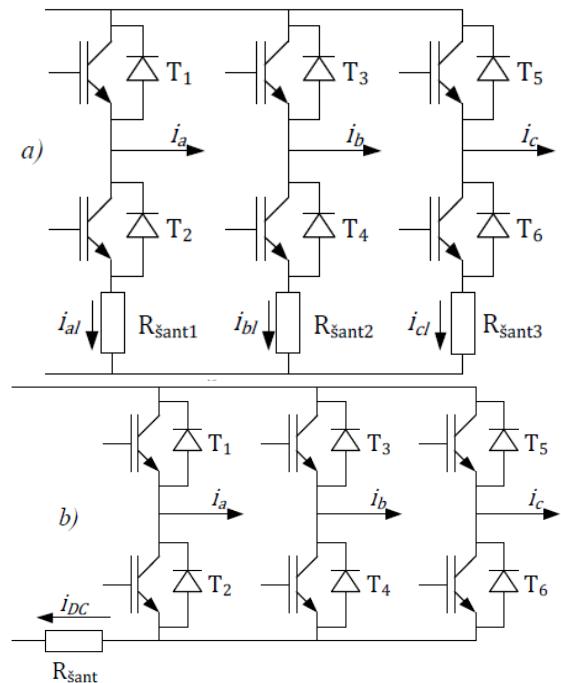


Sl. 4. Blok dijagram opserversa u pogonu sa AM/SM

Tradicionalno rešenje vektorski regulisanog pogona srednjih i visokih performansi sa trofaznim motorom naizmenične struje podrazumeva merenje dve linijske struje pomoću dva LEM davača. Ovo rešenje je po svojoj ceni neprihvatljivo za pogone namenjene uređajima široke potrošnje u koje se ugrađuju pogoni srednjih performansi. Ukoliko pogon nema davač na vratilu logično je da njegovu cenu ne treba opteretiti ni sa dva LEM davača struje. Iz gore

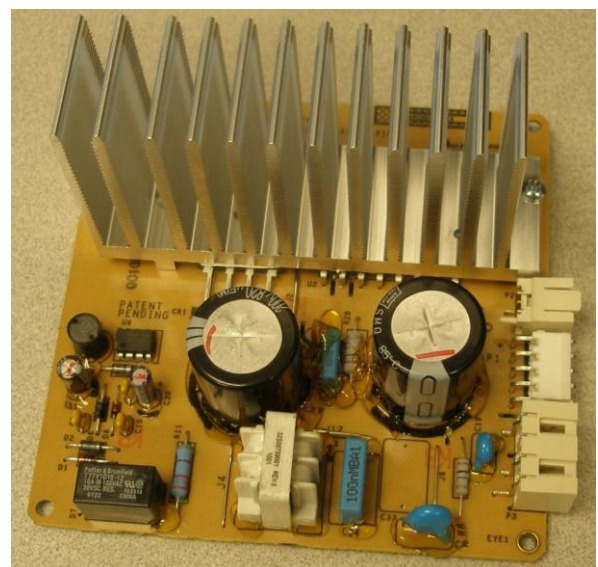
navedenih razloga, naponski inverter sa tri otpornička davača u granama invertora ili jednim otporničkim davačem u jednosmernom međukolu su jedino prihvatljivo rešenje za merenje struje u pogonima opšte namene, slika 5.

Ugradnja jednog strujnog davača značajno umanjuje cenu pogona, ali uvodi potrebu za rešavanjem problema rekonstrukcije faznih struja motora [11]–[13].



Sl. 5. Šema invertora sa tri šanta u granama (a) i jednim šantom u jednosmernom međukolu (b)

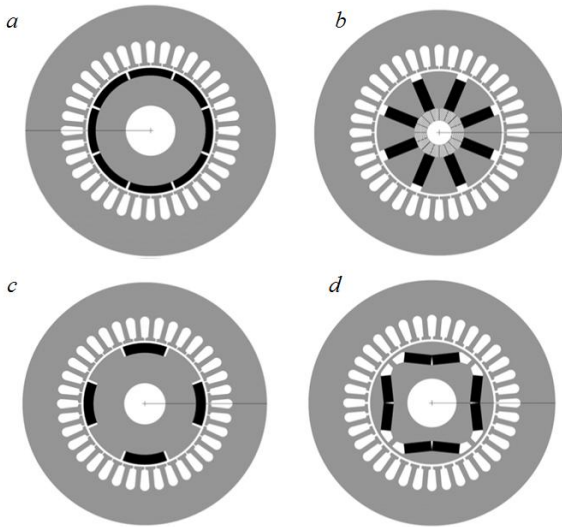
Jedan jeftin 1kW inverter namenjen za ugradnju u pogone opšte namene dat je na slici 6. Prilikom dizajna i izrade ovog pretvarača ostvarene su sledeće uštede: 1. korišćen je jeftini Freescale DSP, 2. modularni inverter (smešten ispod hladnjaka), 3. znatno jeftinija jednoslojna štampa, 3. za programiranje su korišćeni jeftini ivični konektori, 4. od senzora pogon poseduje samo jedan strujni šant u jednosmernom međukolu, 5. značajna ušteda je načinjena i optimalnim dizajnom hladnjaka.



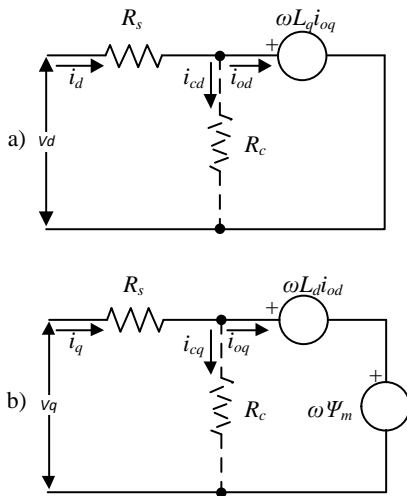
Sl. 6. Slika 1kW invertora namenjenog pogonu opšte namene

3. UVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI POGONA OPŠTE NAMENE SA PMSM

Stator SM ima trofazni namotaj i po konstrukciji istovetan statoru AM, dok se na rotoru SM nalaze stalni magneti. U radu će se posmatrati SM kod kojih je statorski namotaj raspodeljen i konstruisan tako da indukovana elektromotorna sila ima sinusoidalni oblik (eng. *Permanent Magnet Synchronous Machine* - PMSM). Na slici 7 prikazane su vrste PMSM s obzirom na način postavljanja stalnih magneta. PMSM sa površinski postavljenim magnetima (7.a) (*Surface PMSM-SPMSM*) imaju izotropan rotor, tj. jednake induktivnosti po podužnoj d i poprečnoj q osi ($L_d \approx L_q$). Rotor sa koncentrisanim fluksom (7.b) i rotor sa utisnutim magnetima (7.c) imaju umerenu magnetsku anizotropiju, dok rotor sa unutrašnjom montažom (7.d) magneta (eng. *Interior PMSM*) karakteriše velika magnetska anizotropija. Ove tri konstrukcije karakteriše manje gvožđa u d osi ($L_d < L_q$) i pojava značajnog reluktantnog momenta.



Sl. 7. Vrste SM sa stalnim magnetima: a) površinski magneti, b) rotor sa koncentrisanim fluksom, c) utisnuti magneti u površinu rotora, d) rotor sa unutrašnjim magnetima



Sl. 8. Ekvivalentna šema PMSM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

Ekvivalentna šema PMSM u d i q osi predstavljena je na slici 8. Gubici u bakru se modeluju pomoću otpornosti R_s , dok se gubici u gvožđu modeluju pomoću otpornosti R_c . Na osnovu šeme može se napisati sledeći matematički model:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \rho L_d \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_m \end{bmatrix}. \quad (2)$$

gde je $\rho = L_q/L_d$ i:

$$i_{od} = i_d - i_{cd}, i_{oq} = i_q - i_{cq}. \quad (3)$$

$$i_{cd} = -\frac{\omega \rho L_d i_{oq}}{R_c}, i_{cq} = \frac{\omega(\psi_m + L_d i_{od})}{R_c}. \quad (4)$$

Elektromagnetni moment dat je sledećim izrazom:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_m i_{oq} + (1 - \rho) L_d i_{od} i_{oq}). \quad (5)$$

Vidi se da pored osnovnog elektromagnetnog momenta postoji i dodatni reluktantni moment za mašine sa $\rho \neq 1$.

Na osnovu prethodnih jednačina mogu se napisati izrazi koji modeluju gubitke u bakru statora P_{Cu} i gvožđu P_{Fe} :

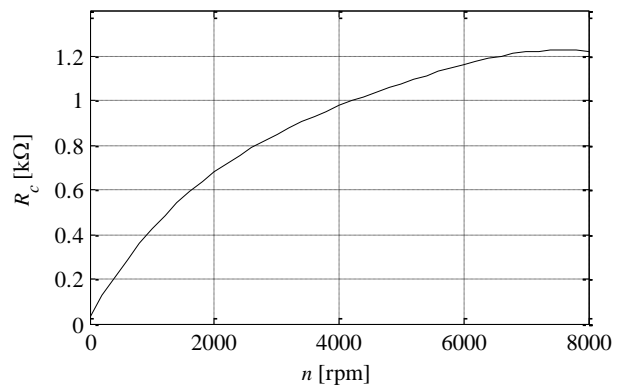
$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R_s \cdot (i_d^2 + i_q^2). \quad (6)$$

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2). \quad (7)$$

Ukupni gubici koji se mogu kontrolisati predstavljaju zbir gubitaka u bakru i gvožđu:

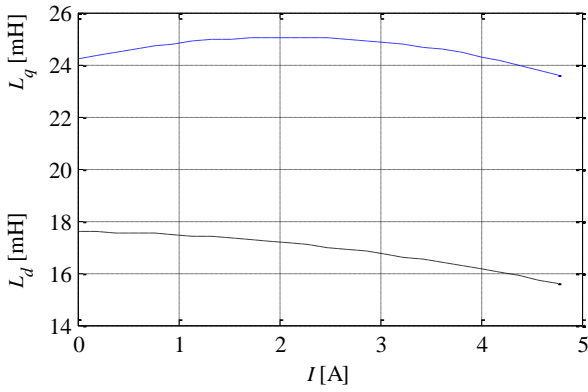
$$P_L = P_{Cu} + P_{Fe}. \quad (9)$$

Gubici u gvožđu SM su uvaženi promenljivim otpornošću R_c . Ova otpornost se značajno menja sa brzinom (frekvencijom), primer dat na slici 9.



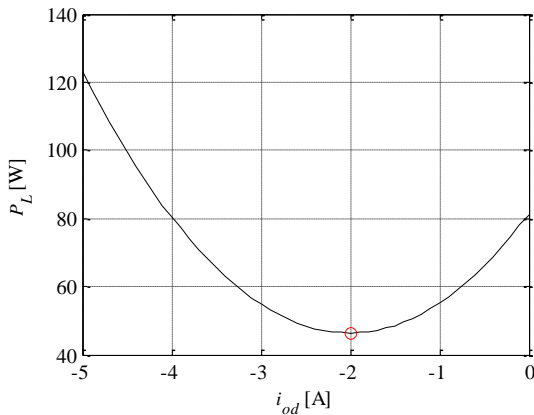
Sl. 9. Primer promene R_c sa brzinom kod PMSM

Model gubitaka SM je tačniji ako se uvaži promena L_d i L_q induktivnosti statora SM sa porastom struje statora. Ove induktivnosti kod SM namenjenih uređajima široke potrošnje sa porastom struje ulaze u zasićenje relativno brzo, kao što je prikazano na slici 10.



Sl. 10. Primer promena L_d i L_q sa strujom kod PMSM

Osnovna ideja optimizacije rada PMSM je da se za svaku brzinu i za svaki momenat opterećenja može naći takav vektor struje statora za koji su gubici minimalni. Na primer, slika 11 prikazuje promenu gubitaka snage sa promenom struje d ose, za jedan moment opterećenja i jednu brzinu. Optimalna vrednost struje q ose (koja u paru sa odabranom d strujom daje minimalne gubitke) se računa na osnovu momenta konverzije. Dakle, zadatak algoritma za optimizaciju rada PMSM je da pronade onaj par d i q struja za koji su gubici minimalni a koji i dalje razvija potreban moment pri trenutnoj brzini rotora.



Sl. 11. Kretanje gubitaka snage PMSM sa promenom struje d ose za brzinu (8000 o/min) i moment opterećenja (0.4Nm)

Metode za pronalaženje optimalne vrednosti struja d i q ose PMSM moraju uzeti u obzir strujne (I_{max}) i naponske (V_{max}) limite invertora i PMSM. Uglavnom, strujni limit je dominantan na malim brzinama dok je naponski limit dominantan na velikim brzinama. Po pitanju naponskog limita, kao rezultat optimizacije rada PMSM su dozvoljene sve vrednosti struje za koje važi:

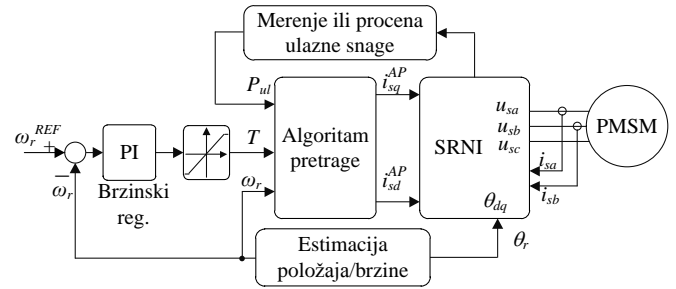
$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max}, \quad (10)$$

$$\left(i_d + \frac{\psi_m}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{L_q}{L_d} i_q\right)^2 \leq \left(\frac{V_{max}}{\omega L_d}\right)^2. \quad (11)$$

3.1. Algoritmi pretrage za uvećanje efikasnosti SM

Algoritmi pretrage u toku rada pogona traže minimum ulazne snage pogona upravljanjem nekim od parametara napajanja SM, uglavnom strujom d ose. Ovi algoritmi konvergiraju ka optimalnom rešenju bez potrebe za detaljnim

poznavanjem parametara pogona. Međutim, problem je njihova brzina konvergencije pri promeni uslova rada kao i moguće oscilacije momenta i brzine u stacionarnom stanju. Iz tih razloga su algoritmi pretrage pogodni samo za primene u kojima ne dolazi do čestih promena opterećenja. Na sl. 12 prikazan je blok dijagram za energetske efikasno upravljanje SM primenom algoritma pretrage. Tokom rada pogona meri se ulazna snaga pretvarača, estimira trenutna brzina rotora i momenat. Na osnovu promene ovih vrednosti algoritam pretrage (AP) podešava strujni vektor statora SM tako da se za date radne uslove smanji ulazna snaga. Referentne struje se dalje vode u strujno regulisan naponski invertor (SRNI).

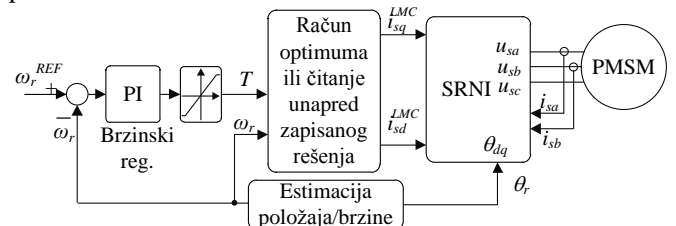


Sl. 12. Blok dijagram optimizovanog upravljanja PMSM primenom algoritma pretrage

Predloženi algoritmi pretrage su uglavnom namenjeni vektorski upravljanim pogonima [14], [15]. U ovim rešenjima se ulazna snaga meri na osnovu merenih struja i napona jednosmernog medjukola. Uvećanjem negativne vrednosti struje d ose dolazi do povećanja gubitaka u bakru ali i smanjenja gubitaka u gvožđu. Važi i obrnuto. Nakon nekoliko iteracija u promeni d struje algoritam pronalaze minimum snage i optimalnu vrednosti d struje. U [16] je dat sličan algoritam ali pogodan za skalarno upravljanje PMSM. Proračun ulazne snage i AP su slični, jedina je razlika je naponsko napajanje i promena amplitude napona statora, a ne struje d ose.

3.2. Metode za uvećanje efikasnosti SM zasnovane na modelu

Ove metode koriste model motora i pretvarača i za zadate vrednosti brzine i momenta računaju optimalnu vrednost struje d ose, tj. onu koja dovodi do minimuma gubitaka snage. Metode bazirane na modelu brzo konvergiraju, odnosno daju optimalno rešenje, ali su parametarski veoma osetljive. Pošto su modeli SM veoma složeni, obično se optimalne vrednosti d i q struje unapred izračunaju za očekivane radne režime i zapišu u lookup tabele. Ove vrednosti se zatim očitavaju u realnom vremenu u toku rada pogona na osnovu trenutne brzine i opterećenja, kao što je prikazano na slici 13.



Sl. 13. Blok dijagram optimizovanog upravljanja PMSM primenom metode zasnovane na modelu

Parametri modela gubitaka moraju biti poznati ili po potrebi adaptirani u zavisnosti od uslova rada. Na primer, uvođenjem temperature kao trećeg ulaza moguće je predvideti i promenu otpornosti statora sa temperaturom. Takođe, u model je moguće uključiti i promenu induktivnosti d i q ose sa promenom nivoa zasićenja magnetskog kola, tj. sa promenom nivoa struje d i q ose.

Otpornost R_c kojom su modelovani gubici u gvožđu je najznačajni parametar ovih modela i uvek se menja sa promenom brzine. Ona se može odrediti na osnovu gubitaka u praznom hodu kod kojih je struja statora približno nula i gubici u gvožđu P_{FE} dominantni:

$$R_c = \frac{3 (\omega \Psi_m)^2}{2 P_{Fe}} \quad (12)$$

Prost način minimizacije gubitaka je umanjeње samo jednog od tipa gubitaka. Tako na primer strategija MTPA (*Maximum Torque per Ampers*) zanemaruje gubitke u gvožđu i prostom potragom za maksimum momenta uz istu amplitudu struje statora minimalizuje gubitke u bakru [18]. Ova metoda je popularna za male brzine pri kojima su gubici u gvožđu praktično zanemarljivi. MTPA rešenje ($dT/di_s=0$) za d komponentu vektora statorske struje glasi:

$$i_d^{MTPA} = \frac{\Psi_m - \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d)} \quad (13)$$

dok se optimalna q struja proračunava na osnovu zadate amplitude statorske struje:

$$i_q^{MTPA} = \text{sign}(i_s) \sqrt{i_s^2 - i_d^{MTPA^2}} \quad (14)$$

Ipak, na srednjim i većim brzinama dolazi do porasta gubitaka u gvožđu, tada MTPA strategija nije dovoljna i treba pronaći minimum ukupnih gubitaka.

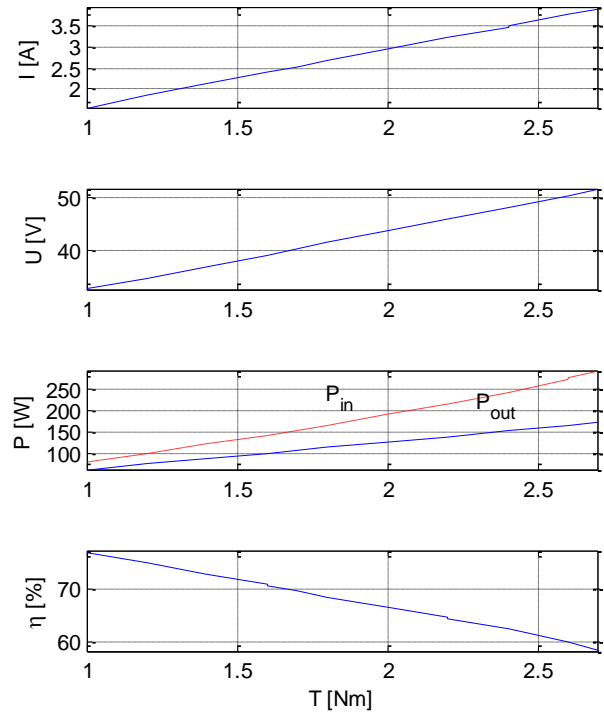
SPMSM ima prost model gubitaka usled $L_d=L_q$ i moguće je njegove ukupne gubitke prikazati analitički u funkciji struje i_{od} , momenta T i brzine ω_r [19]. U tom slučaju je moguće pronaći i analitičko rešenje za optimalnu struju i_{od} :

$$i_{od} = \frac{\omega^2 L_q (R_s + R_c) \Psi_m}{R_s R_c^2 + \omega^2 L_d^2}, \quad (15)$$

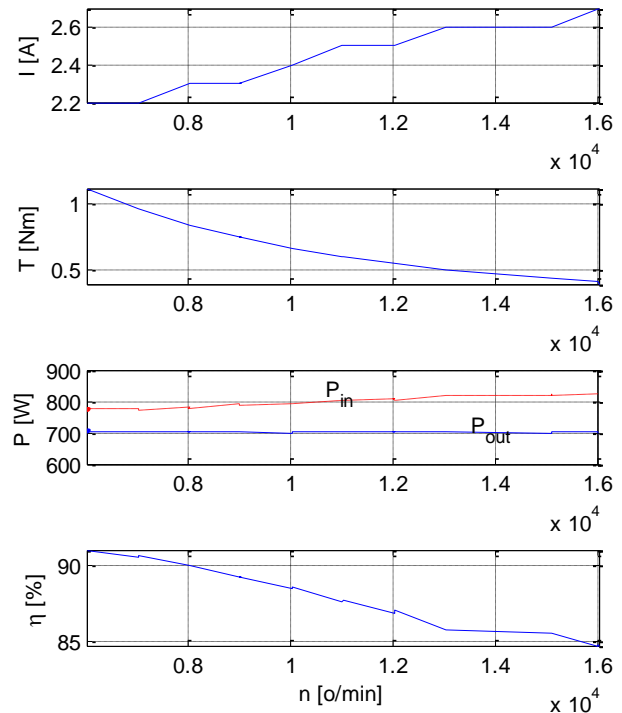
dok se i_{oq} računa na osnovu potrebnog momenta (14).

IPMSM ima složeniji model usled $L_d \neq L_q$ i ne postoji analitičko rešenje za d struju koja dovodi do minimalnih gubitaka. Postoji više načina za rešavanje ovih nelinearnih modela: 1. optimalno rešenje se traži u preseku tangencijalne krive momenta i naponskog limita koji se dobija rešavanjem polinoma četvrtog reda aproksimiranog Tejlrovim redom [20], linearizacijom funkcije prenosa [21], na osnovu metode konačnih elemenata [22], primenom nelinearnog programiranja [24], primenom *fuzzy* logike [25]. Pošto su svi ovi proračuni računarski zahtevni, uglavnom se vrše *offline* i njihovi rezultati se zapisuju u *lookup* tabelu. Tabela optimalnih vrednosti struja se popunjava sa odgovarajućim korakom za širok opseg brzina i momenta, uz odgovarajuća strujna i naponska ograničenja. Pojedini algoritmi uključuju i promenu relevantnih parametara motora. Zapisane optimalne vrednosti struja se očitavaju u toku rada pogona iz *lookup* tabele za trenutni par brzine i momenta, što nije računarski zahtevno a ujedno i omogućuje brzo prilagođenje promenama uslova rada pogona.

Primer ostvarene efikasnosti PMSM ($p = 4$, $R_s = 3.76 \Omega$, $L_d = 14.7\text{mH}$, $L_q = 20.5 \text{mH}$, $\Psi_{PM} = 0.08 \text{Wb}$) u 1kW pogonu opšte namene dat je na slikama 14 i 15.



Sl. 14. Efikasnost PMSM za razna opterećenja na 500 o/min



Sl. 15. Efikasnost PMSM i ostvareni moment na srednjim i velikim brzinama

Ostvarena efikasnost PMSM na malim brzinama obrtanja i raznim opterećenjima (75% – 59%) je znatno veće nego kod sličnog AM (48% – 43%), slika 20. Očigledno je da pri malim brzinama obrtanja SM nema konkurenciju. Sa druge strane, efikasnost PMSM pada sa brzinom i postaje uporediva se efikasnošću AM, što otvara mogućnost izbora između ova dva tipa motora.

4. UVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI POGONA OPŠTE NAMENE SA AM

Usled pogodne cene, lake instalacije i robusnog rada, trofazni asinhroni motor se često koristi u pogonima opšte namene, kao što su pumpe, ventilatori, klima uređaji i razni kućni aparati. Kao i u slučaju sinhronog motora, efikasnost AM u zavisnosti od načina kojim se njime upravlja [34]. Dodatni problem kod AM je zavisnosti efikasnosti od opterećenja, ona je relativno velika za veliko opterećenje ali često neprihvatljivo mala za mala opterećenja. Ovo je poseban problem za pogone koji dugo rade rasterećeni ili sa opterećenjem znatno nižim od nominalnog [35].

Model gubitaka AM je predložen u [35] i njegova ekvivalentna šema je prikazana na slici 16. Model je dat za dve ose u rotirajućem dq sistemu osa. Parametri modela su: R_s i L_{ls} su statorska otpornost i induktivnost rasipanja, R_r i L_{lr} su rotorska otpornost i induktivnost rasipanja, s je klizanje, R_m je ekvivalentna otpornost magnetnog kola koja modeluje gubitke u gvožđu i L_m je induktivnost magnećenja.

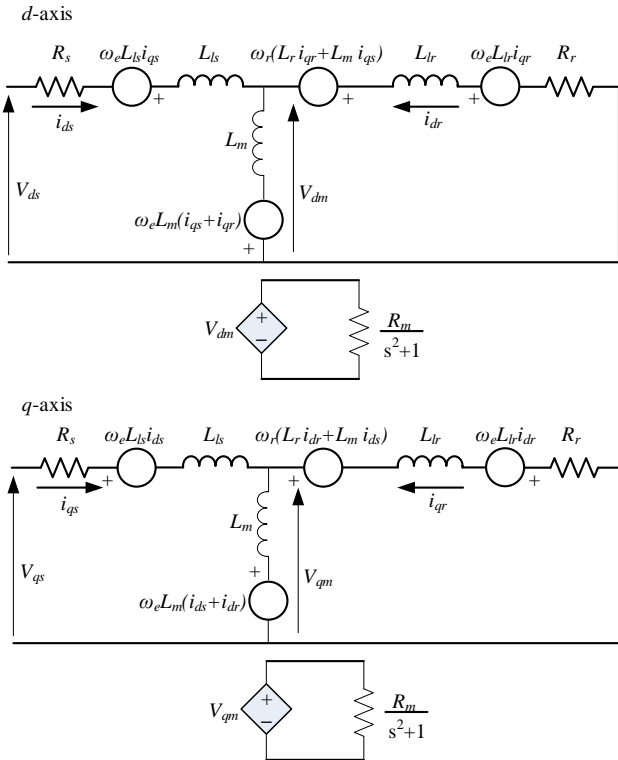
Naponske jednačine za statorsko i rotorsko kolo asinhronog motora glase:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ls} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_{ls} i_{qs} + V_{dm} \quad (16)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{ls} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e L_{ls} i_{ds} + V_{qm} \quad (17)$$

$$0 = R_r i_{dr} + L_{lr} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) - \omega_e L_{lr} i_{qr} + V_{dm} \quad (18)$$

$$0 = R_r i_{qr} + L_{lr} \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) + \omega_e L_{lr} i_{dr} + V_{qm} \quad (19)$$



Sl. 16. Ekvivalentna šema AM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

Takođe važi,

$$i_{ds} + i_{dr} = V_{dm} \frac{s^2 + 1}{R_m} + i_{dm} \quad (20)$$

$$i_{qs} + i_{qr} = V_{qm} \frac{s^2 + 1}{R_m} + i_{qm} \quad (21)$$

gde su V_{dm} i V_{qm} naponi na magnetizacionoj grani

$$V_{dm} = L_m \frac{d(i_{ds} + i_{dr})}{dt} - \omega_e L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (22)$$

$$V_{qm} = L_m \frac{d(i_{qs} + i_{qr})}{dt} - \omega_e L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (23)$$

V_{ds} i V_{qs} su komponente vektora statorskog napona u d i q osi, i_{ds} i i_{qs} su komponente statorske struje, i_{dm} i i_{qm} su komponente vektora magnetizacione struje koja teče kroz induktivnost magnećenja.

Konačno, jednačine fluksnih buhvatva AM glase:

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (24)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (25)$$

Ukoliko se koristi dq sistem orijentisan prema vektoru fluksa rotora rotorski fluks u q osi postaje nula i u stacionarnom stanju se dobija:

$$V_{dm} = -\omega_e \frac{L_m L_{lr}}{L_r} i_{qs} \quad (26)$$

$$V_{qm} = \omega_e \frac{L_m}{L_r} (L_{lr} i_{ds} + \psi_{dr}) = \omega_e L_m i_{ds} \quad (27)$$

Ukupni gubici AM su zbir gubitaka u bakru i gvožđu statora i rotora. Statorski i rotorski gubici u bakru se računaju na osnovu odgovarajućih struja i otpornosti. Gubici u gvožđu statora se mogu izračunati na osnovu magnetne otpornosti i napona na induktivnosti magnećenja. Pošto je pri normalnom režimu rada klizanje tj. frekvencija rotora relativno niska, gubici u gvožđu rotora se mogu zanemariti. Na osnovu svega pomenutog, ukupni električni gubici u AM iznose:

$$\begin{aligned} P_{loss} &= R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{1}{R_m} (V_{dm}^2 + V_{qm}^2) \\ &= R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^2 \\ &\quad + \frac{1}{R_m} \left(\omega_e^2 L_m^2 \left(\frac{L_{lr}}{L_r} \right)^2 i_{qs}^2 + \omega_e^2 L_m^2 i_{ds}^2 \right) \\ &= i_{ds}^2 \left(R_s + \frac{\omega_e^2 L_m^2}{R_m} \right) + i_{qs}^2 \left(R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} + \frac{\omega_e^2 L_m^2 L_{lr}^2}{R_m L_r^2} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

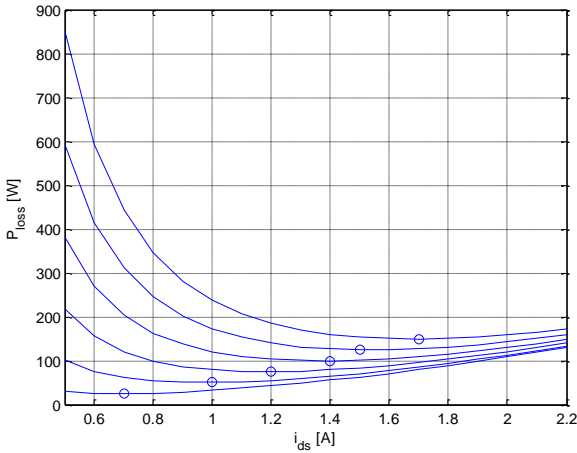
Momenat koji razvija AM u stacionarnom stanju iznosi:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} i_{qs} \quad (29)$$

Ukupni električni gubici asinhronog motora P_{loss} se mogu izraziti u funkciji struje d ose i_{sd} , momenta opterećenja T i brzine rotora ω :

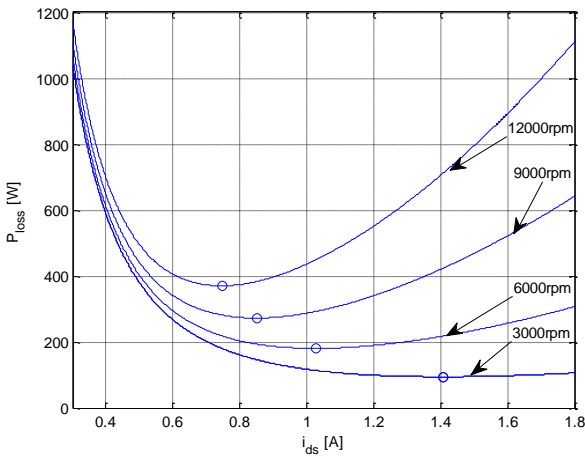
$$P_{loss} = f(i_{sd}, T, \omega). \quad (30)$$

Slika 17 pokazuje promenu ukupnih gubitaka AM sa promenom struje magnećenja, za konstantnu brzinu rotora od 3200 o/min i pri raznim momentima opterećenja. Slika pokazuje da za svako opterećenje postoji optimalna vrednost d komponente struje statora za koju se dobijaju minimalni ukupni gubici. Ukoliko se izabere vrednost d struje koja je manja od optimalne AM nema dovoljno fluksa i potrebna je velika struja q ose da bi se ostvario potreban momenat. Time se dobija velika vrednost amplitude struje statora i nepotrebno rastu gubici u bakru. Sa druge strane, ukoliko se izabere veća vrednost struje d ose, dobija se prevelika vrednost fluksa i napon statora AM. U tom slučaju nepotrebno rastu gubici u gvožđu.



Sl. 17. Promena ukupnih gubitaka AM sa promenom d struje za razna opterećenja na 3200 o/min

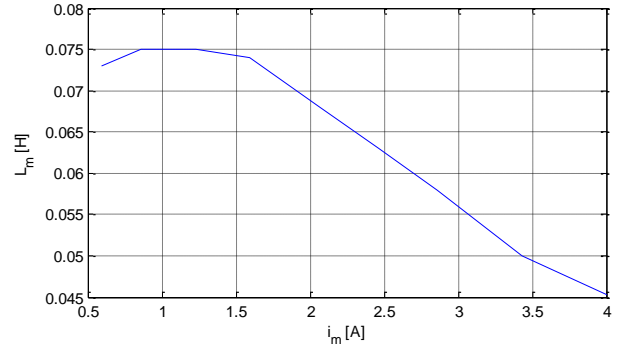
Slika 18 pokazuje promenu ukupnih gubitaka sa promenom struje magnećenja, ali pri konstantnom opterećenju od 1Nm i za više brzina rotora. I ova slika pokazuje da za svaki par brzine i opterećenja postoji optimalna vrednost fluksa statora na koju treba podesiti pogon da bi radio sa minimalnim gubicima.



Sl. 18. Promena ukupnih gubitaka AM sa promenom d struje za opterećenja od 1Nm i razne brzine obrtanja rotora

Prilikom optimizacije gubitaka AM važno je uvažiti efekat zasićenja magnetnog kola i korigovati vrednost induktivnosti magnećenja L_m korišćenu u modelu sa promenom struje

magnećenja. Promena L_m se može izmeriti standardnim testom praznog hoda, primer rezultata dat na slici 19.



Sl. 19. Zavisnost induktivnosti magnećenja od struje d ose

Metoda za pronalaženje optimalne vrednosti struja d i q ose pored samog modela mora uzeti u obzir u strujne (I_{max}) i naponske (V_{max}) limite invertora i AM. Slično kao i kod SM, strujni limit je dominantan na malim brzinama, dok je naponski limit dominantan na velikim brzinama. Po pitanju naponskog limita, kao rezultat optimizacije su dozvoljene sve vrednosti struje za koje važi:

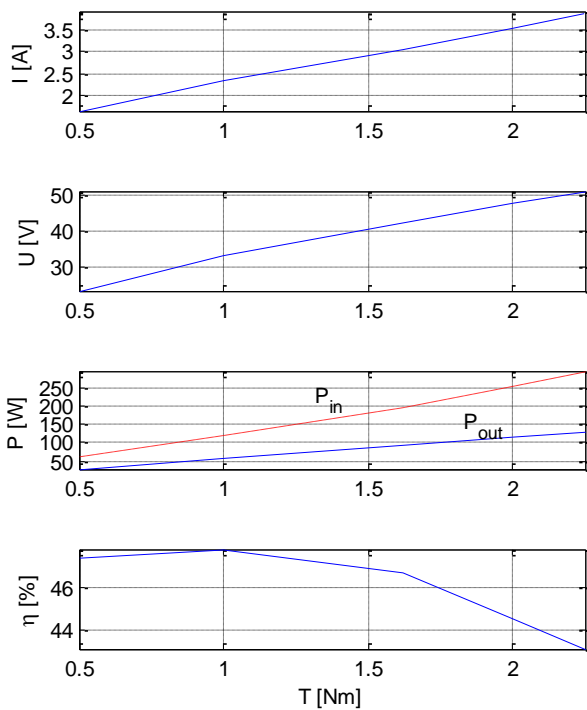
$$(\omega_e L_s i_{ds})^2 + (\omega_e \sigma L_s i_{qs})^2 \leq V_{max}^2. \quad (31)$$

gde je $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$, $V_{max} = V_{DC} / \sqrt{3}$ i V_{DC} je napon međukola invertora. Po pitanju strujnog limita, kao rezultat optimizacije su dozvoljene sve vrednosti struje za koje važi:

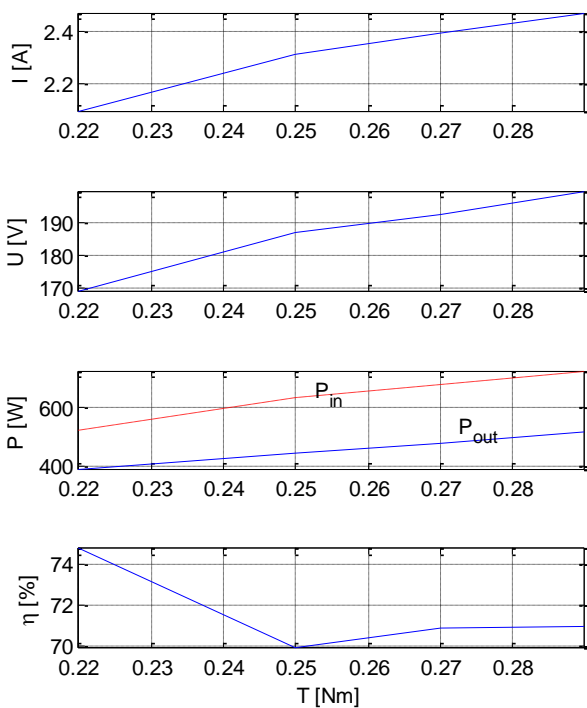
$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{max}^2. \quad (32)$$

U literaturi su predložene razne metode za minimizaciju gubitaka asinhronog motora. Te metode su u suštini slične metodama za minimizaciju gubitaka snage sinhronog motora i mogu se svesti u iste dve podgrupe: algoritmi pretrage (*the search controller*) i metode zasnovane na modelu (*the loss model controller*). Slično kao kod SM, algoritmi pretrage [28]–[32] računaju ulaznu snagu i promenom struje d ose traže minimalnu vrednost snage za date uslove rada. Prednost i mane algoritama pretrage kod AM su slične kao i kod SM, konvergencija algoritma je nezavisna od parametara ali algoritam se sporo adaptira na promenu opterećenja i/ili izaziva varijacije u ostvarenom fluksu, momentu i brzini. Metode minimizacije gubitaka AM zasnovane na modelu [33]–[38] zahtevaju poznavanje parametara modela AM i po potrebi praćenje njihove promene. Kao i kod SM, metode bazirane na modelu često koriste *lookup* tabele sa unapred upisanim rezultatima. Time se ne opterećuje procesorsko vreme kontrolera pogona. Konačno, isto kao i kod SM, ove metode se praktično trenutno adaptiraju promeni opterećenja ili brzine.

Primeri ostvarene efikasnosti za AM ($R_s = 3.17 \Omega$, $R_r = 1.04 \Omega$, $X_m = 8.11 \Omega$, $X_s = 0.398 \Omega$, $X_r = 0.391 \Omega$, $R_c = 324.6 \Omega$, $f = 20.9$ Hz) koji je namenjen 1kW pogonu opšte namene prikazani su na slikama 20 i 21.



Sl. 20. Efikasnost AM sa promenom opterećenja na brzini rotora 540 o/min



Sl. 21. Efikasnost AM sa promenom opterećenja na brzini rotora 16980 o/min

Iz ostvarenih rezultata je jasno da AM ima izuzetno malu efikasnost na malim brzinama i da u tom režimu rada ne može da konkuriše PMSM. Sa druge strane, efikasnost AM raste sa promenom brzine tako da za relativno velike brzine postaje uporediva sa efikasnošću PMSM.

5. ZAKLJUČAK

U radu su opisani savremeni trendovi u razvoju elektromotornih pogona u uređajima namenjenim za široku potrošnju. Da bi jedan ovakav pogon opstao na globalnom

tržištu, mora da pomiri više oprečnih zahteva. Osnovni cilj su minimalna cena, mogućnost masovne proizvodnje i laka ugradnja pogona. Ali, od modernih pogona ovog tipa se zahteva i sigurnost, robusan rad i prolagođenje ekstremnim ekskurzijama parametara motora i napojne mreže. U savremene pogone opšte namene se danas već ugrađuju i neki od mehanizama za uvećanje efikasnosti, često prosti algoritmi pretrage ali i složeniji algoritmi bazirani na modelu. U radu su opisani najznačajni algoritmi za uvećanje efikasnosti ovih pogona, i diskutovane njihove prednosti i mane. Autori smatraju da su za uvećanje efikasnosti pogona opšte namene pogodniji algoritmi pretrage. Motori i pretvarači primenjeni u ovim pogonima se dizajniraju uz minimalni utrošak materijala što izaziva značajne ekskurzije parametara u toku jednog radnog ciklusa. Dodatno, motori za ove pogone se proizvode u masovnim serijama uz minimalnu kontrolu izrade, uz očekivanu veliku varijaciju inicijalnih parametara. Sve ovo čini bilo koji usvojeni model AM/SM neadekvatnim za uvećanje efikasnosti i ozbiljno ograničava upotrebu metoda baziranih na modelu u pogonima opšte namene.

Iz rada je očigledno da se borba za tržište pogona opšte namene između kaveznog asinhronog i sinhronog motora sa permanentnim magnetima nastavlja. Prednost asinhronog motora je olakšan rad bez skupog senzora položaja, dok sinhroni motori imaju bolju efikasnost sve do ulaska u režim slabljenja polja. Energetska efikasnost daje blagi vetar u leđa sinhronom motoru i čini se da oni polako osvajaju ovo tržište. Dalji prodor sinhronog motora u jeftinije *sensorless* pogone široke potrošnje ograničava njihov nesigurni start pri velikom opterećenjima, problem demagnetizacije i rad na velikim brzinama, kao i problem sigurnog zaustavljanja u slučaju kvara.

6. LITERATURA

- [1] Aengus Murray, Marco Palma and Ali Husain, "Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors and Controlled Induction Motors in Washing Machine Applications using Sensorless Field Oriented Control", Energy Saving Products Division International Rectifier El Segundo, CA 90245.
- [2] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 5, pp. 1054–1061, Sep./Oct. 1992.
- [3] D. P. Marčetić, S. N. Vukosavić, "Speed Sensorless AC Drives with the Rotor Time Constant Parameter Update," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 5, pp. 2618-2625, Oct 2007.
- [4] D. P. Marcetic, I. R. Krcmar, M. A. Gecic, and P. R. Matic, "Discrete rotor flux and speed estimators for high speed shaft-sensorless IM drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 6, pp. 3099–3108, Jun. 2014.
- [5] J.S.V.S. Kumar, P.S. Kumar, M.Rambabu, —Model reference adaptive controller-based speed and q-axis inductance estimation for Permanent Magnet Synchronous Motor drive by utilizing reactive power, International Conf. on Energy, Automation, and Signal, pp. 1- 6, 2011.

- [6] H. Kubota et al., "Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 4, pp. 1081–1086, Jul./Aug. 2002.
- [7] S. Suwankawin and S. Sangwongwanich, "Design strategy of an adaptive full-order observer for speed-sensorless induction-motor drives—Tracking performance and stabilization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 1, pp. 96–119, Feb. 2006.
- [8] Y.-S. Jeong, R. D. Lorenz, T. M. Jahns and S.-K. Sul, "Initial Rotor Position Estimation of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine using Carrier-Frequency Injection Methods," *IEEE Intern. Electric Machines a. Drives Conf. IEMDC*, Madison, WI, June 1-4, 2003, pp. 1218–1223; later in *IEEE Trans. Industry Appl.*, Vol. 41, No. 1, Jan./Feb. 2005, pp. 38-45.
- [9] Y. Li, Z. Q. Zhu, D. Howe, C.M. Bingham, and D. Stone, "Improved rotor position estimation by signal injection in brushless AC motors, accounting for cross-coupling magnetic saturation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 5, pp. 1843–1849, Sep./Oct. 2009.
- [10] Darko P. Marcetic, Roberto M. Varga and Mile B. Bozic, "IPMSM model including magnetic saturation and cross-coupling", *International symposium on Power Electronic*, Novi Sad, Oct. 2011.
- [11] Hongrae Kim, Thomas M. Jahns, "Phase Current Reconstruction for AC Motor Drives Using a DC Link Single Current Sensor and Measurement Voltage Vectors", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1413–1419, Sept. 2006.
- [12] Woo-Cheol Lee, Dong-Seok Hyun, Taek-Kie Lee, "A Novel Control Method for Three-Phase PWM Rectifiers Using a Single Current Sensor", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 5, pp. 861–870, Sept. 2000.
- [13] D. Marcetic and E. Adzic, "Improved three-phase current reconstruction for induction motor drives with dc-link shunt", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp.2454 -2462, 2010.
- [14] Zhu, Z.Q.; Gong, L.M., "Improved sensorless operation of permanent magnet brushless AC motors based on online optimal efficiency control," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011 *IEEE International*, vol., no., pp.1591,1596, 15-18 May 2011
- [15] Vaez, S.; John, V.I.; Rahman, M.A., "An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.14, no.4, pp.1435,1440, Dec 1999
- [16] Chan, C.C.; Chau, K.T., "An advanced permanent magnet motor drive system for battery-powered electric vehicles," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.45, no.1, pp.180,188, Feb 1996
- [17] Bojoi, R.; Pastorelli, M.; Bottomley, J.; Giangrande, P.; Gerada, C., "Sensorless control of PM motor drives — A technology status review," *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2013 *IEEE Workshop on*, vol., no., pp.168,182, 11-12 March 2013
- [18] Jang-Mok Kim; Seung-Ki Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.33, no.1, pp.43,48, Jan/Feb 1997
- [19] Morimoto, S.; Tong, Y.; Takeda, Y.; Hirasa, T., "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.41, no.5, pp.511,517, Oct 1994
- [20] Sung-Yoon Jung; Jinseok Hong; Kwanghee Nam, "Copper loss minimizing torque control of IPMSM based on flux variables," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 *IEEE International*, vol., no., pp.1174,1179, 12-15 May 2013
- [21] Patel, B.; Uddin, M.N., "Development of a nonlinear loss minimization control of an IPMSM drive with flux estimation," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 *IEEE International*, vol., no., pp.1196,1203, 12-15 May 2013
- [22] Aorith, H.; Wang, J.; Lazari, P., "A new Loss Minimization Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Machine drives," *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 *IEEE International*, vol., no., pp.526,533, 12-15 May 2013
- [23] Botan, C.; Ratoi, M.; Ostafi, F.; Horga, V., "Minimum energy control of servo drive systems with PMSM," *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2010 *International Symposium on*, vol., no., pp.19,23, 14-16 June 2010
- [24] Rabiei, A.; Thiringer, T.; Lindberg, J., "Maximizing the energy efficiency of a PMSM for vehicular applications using an iron loss accounting optimization based on nonlinear programming," *Electrical Machines (ICEM)*, 2012 *XXth International Conference on*, vol., no., pp.1001,1007, 2-5 Sept. 2012
- [25] Zhou, Guangxu ; Ahn, Jin-Woo, "A Novel Efficiency Optimization Strategy of IPMSM for Pump Applications," *Journal of electrical engineering & technology*, vol. 4, no. 4, pp. 515-520, 2009
- [26] Vaez, S.; John, V.I.; Rahman, M.A., "An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.14, no.4, pp.1435,1440, Dec 1999
- [27] Junggi Lee; Kwanghee Nam; Seoho Choi; Soonwoo Kwon, "Loss-Minimizing Control of PMSM With the Use of Polynomial Approximations," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.4, pp.1071,1082, April 2009
- [28] M. Waheeda Beevi, A. Sukesh Kumar, H.S. Sabin, "Loss minimization of vector controlled induction motor drive using genetic Algorithm," *Green Technologies (ICGT)*, 2012 *International Conference on*, vol., no., pp.251,257, 18-20 Dec. 2012
- [29] M. N. Uddin, and Sang Woo Nam, "New Online Loss-Minimization- Based Control of an Induction Motor Drive," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 926-933, March 2008.

- [30] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, and J. G. Cleland, "A fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, pp. 192-198, Apr. 1995.
- [31] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in scalar controlled Induction motor drives with search controllers", IEEE Trans, on Ind. Electronics, vol.11, no.2, pp. 213-220, Mar. 1996.
- [32] Jingchuan Li, Longya Xu, Zheng Zhang, "A New Efficiency Optimization Method on Vector Control of Induction Motors," Electric Machines and Drives," 2005 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1995,2001, 15-15 May 2005
- [33] Cao-Minh Ta and Y. Hori, "Convergence improvement of efficiency optimization control of induction motor drives", IEEE Trans, Ind Appl. , vol.37, no.6, pp. 1746-1753, Nov / Dec 2001.
- [34] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in Induction motor adjustable speed drives", IEEE Trans, on Ind. Electronics, vol.43, no.1, pp. 226-231, Feb 1996.
- [35] S. Lim and K. Nam, "Loss-minimising control scheme for induction motors," Electric Power Applications, IEE Proceedings - , vol.151, no.4, pp.385-397, 7 July 2004
- [36] C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, and Pramod Agarwal, "Energy efficient control of three-phase Induction motor - a review", International Journal of Computer and Elect. Engg., vol. 1, no.1, pp. 61-70, Apr 2009.
- [37] D.S. Krischen and D. W. Novotny, "On-line efficiency optimization of a variable frequency Induction motor drive", IEEE Trans, Ind. Appl., vol.1A-21, no.4, pp. 610-616, May/Jun 1985.
- [38] P. Famouri and J. J. Cathey, "Loss minimization control of an Induction motor drive", IEEE Trans, Ind. Appl., vol.27, no.1, pp. 32-37, Jan/Feb 1991.

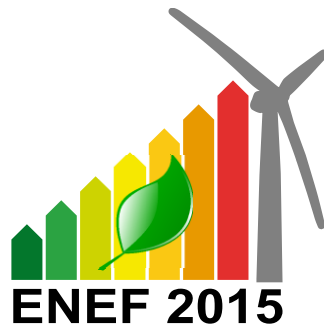
ZAHVALNICA

Rad je delimično sponzorisan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta III 042004 i od strane Pokrajinskog sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj AP Vojvodine, u okviru projekta 114-451-3508/2013-04.

Abstract – The paper deals with the trends in the development of consumer drives with AC motors, both three phase squirrel cage induction motor and three phase synchronous motor with permanent magnets on the rotor. First, different solutions which lead to relatively cheap and mass production ready general purpose drive are described. Then, the safety of operation and robustness of consumer drives during significant excursions of motor parameters and power supply are discussed. Finally, special attention is paid to methods for improving energy efficiency of consumer drives with both induction motor and permanent magnet synchronous motor. These methods are broadly classified into two basic groups: model based method and search algorithm. Examples of achieved energy efficiency of both motor type in one classical applications are presented.

RECENT DEVELOPMENTS OF ENERGY EFFICIENT CONSUMER ELECTRICAL DRIVES

Darko Marčetić, Marko Gecić



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015
25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesija A2

Sesija A2

Ilija Batas Bjelić, Nikola Rajaković

**DOPRINOS OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE I ELEKTRIČNIH VOZILA U
DOSTIZANJU NACIONALNIH CILJEVA ENERGETSKE EFIKASNOSTI**17

Vladimir A. Katić, Zoltan Čorba, Boris Dumnić, Dragan Milićević, Bane Popadić, Ilija Kovačević

**ENERGETSKA EFIKASNOST MREŽNIH FOTO-NAPONSKIH ELEKTRANA
PRIMER FNE "FTN NOVI SAD"**20

Zdravko N. Milovanović, Svetlana R. Dumonjić-Milovanović

**ENERGETSKA EFIKASNOST KOGENERACIJSKE PROIZVODNJE ENERGIJE
I OGRANIČENJA U REPUBLICI SRPSKOJ**26

Darija Gajić

**ODREĐIVANJE PARAMETARA ZA ENERGETSKU OPTIMIZACIJU
TRANSPARENTNIH ELEMENATA OMOTAČA STAMBENIH ZGRADA U BIH**39

DOPRINOS OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE I ELEKTRIČNIH VOZILA U DOSTIZANJU NACIONALNIH CILJEVA ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Ilija Batas Bjelić, Nikola Rajaković, *Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu*

Sadržaj – Ciljevi evropske energetske politike u domenu energetske efikasnosti nalažu uštede 20% do 2020, 40% do 2030, i obavezujući su za sve članice Energetske Unije. Planiranje i implementacija u svakom nacionalnom energetske sistemu zasnovana je na tehničkim merama koje obuhvataju proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, mere energetske efikasnosti i strukturne mere. Mera uvođenja obnovljivih izvora u sektoru proizvodnje električne energije, pored direktnog doprinosa u povećanju učešća obnovljivih izvora, doprinosi smanjenju primarne energije, za razliku od tehnologija sa Karnoovim ciklusom (termoenergetski sektor). Strukturna mera uvođenja električnih automobila doprinosi smanjenju primarne energije u sektoru saobraćaja, iz istih razloga. U radu je kvantifikovan doprinos kombinovane primene električnih vozila i fotonaponskih elektrana dostizanju nacionalnih ciljeva energetske efikasnosti u nekoliko različitih scenarija, na studiji slučaja Republike Srbije.

1. UVOD

Evropski ciljevi u pogledu energetike pored dekarbonizacije i većeg korišćenja obnovljivih izvora energije obavezuju na smanjenje primarne energije, a od skora i sa posebnim akcentom na smanjenju uvozne zavisnosti i na povećanju energetske bezbednosti Energetske Unije [1]. Ovi ciljevi mogu se predstaviti kao ograničenja u slučaju nacionalnih energetske sistema koji teže usaglašavanju svoje energetske politike sa Energetskom Unijom [2].

Poznati efekat Karnoovih gubitaka usled konverzije primarne energije u finalnu energiju za potrošnju u termoenergetskom sektoru integralne energetike kvantifikovan na nivou jugoistočne Evrope, [3], što je podstaklo istraživanje u pravcu kvantifikacije istih efekata na nivou Republike Srbije, jer je poznato da je odnos finalne i primarne energije u godišnjem energetske bilansu oko 0.5.

U radu [4] pokazano je moguće smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži usled priključenja fotonaponskih elektrana, kao dodatni doprinos energetske efikasnosti elektroenergetskog sistema posebno u urbanim sredinama [5]. Simultani efekti primene mera uvođenja fotonaponskih izvora električne energije i električnih automobila na naponske prilike i gubitke u distributivnim mrežama detaljno je kvantifikovan u radu [6], ali bez prikazanog doprinosa ciljevima energetske efikasnosti.

U ovom radu prikazan je doprinos tehničkih mera uvođenja električnih vozila i obnovljivih izvora električne energije iz fotonaponske elektrane dostizanju cilja smanjenja ukupne primarne energije u nacionalnom energetske sistemu Republike Srbije radi usaglašavanja energetske politike sa Energetskom unijom.

2. METODOLOGIJA

Za godišnje satne simulacije nacionalnog energetske sistema Republike Srbije korišćen je alat EnergyPLAN [7], koji pokriva sektore od interesa za planiranje održive energetske politike, prikazane na Sl. 1. Rezultat ovih simulacija su tri kvantitativna indikatora nacionalnih energetske sistema:

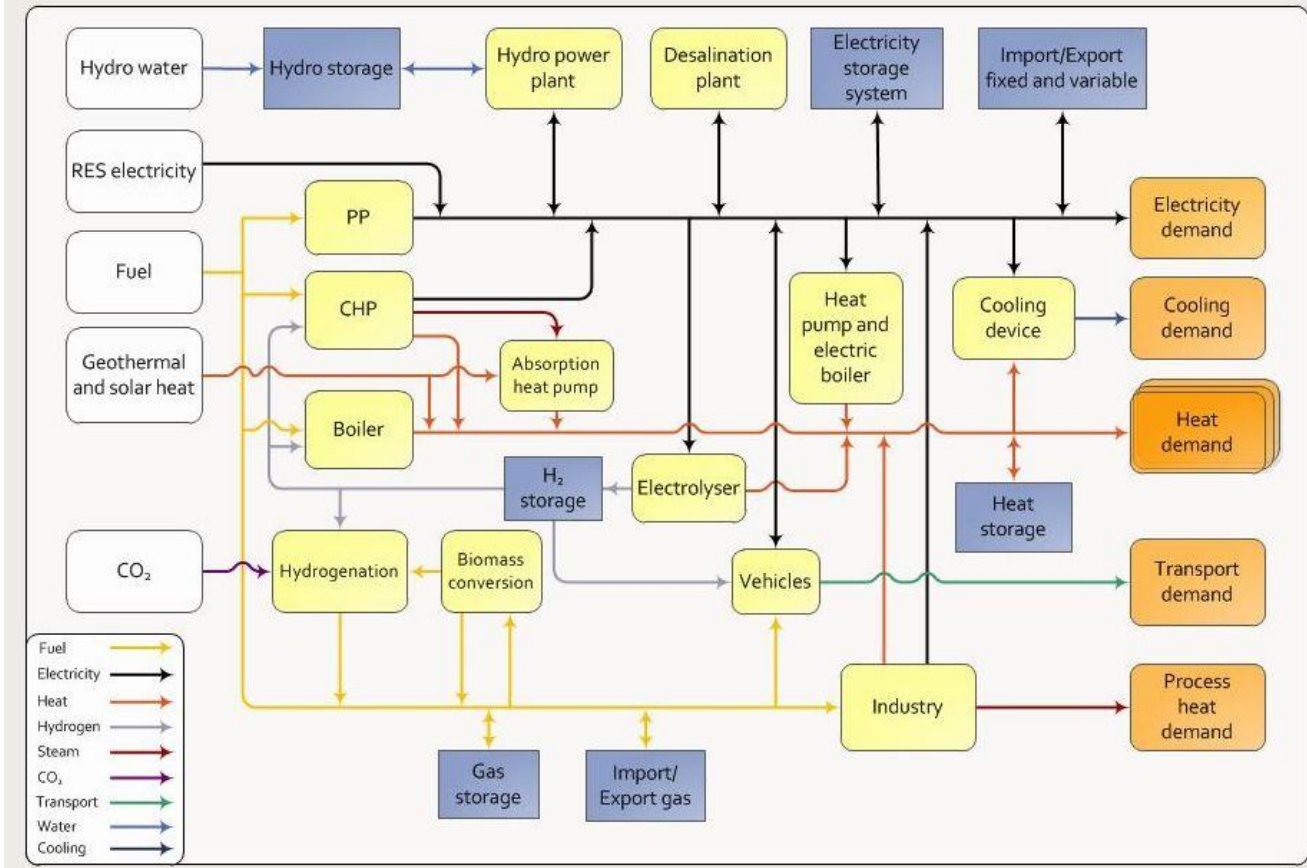
1. Ekonomski bilans godišnjih investicionih i proizvodnih troškova (obuhva proizvodnju, bilans trgovanja i takse na emisije),
2. Emisioni bilans CO₂,
3. Energetski bilans primarne energije razvrstan po tipovima energenata.

Na osnovu prvog indikatora moguće je poređenje scenarija radi pronalaženja tehničko-ekonomski optimalne strukture nacionalnog energetske sistema. Na osnovu trećeg indikatora moguće je poređenje scenarija na osnovu potrošnje primarne energije i provera dostignutosti cilja energetske efikasnosti.

Korišćenjem optimizacionog alata GENOPT (GENeric OPTimization program) moguće je odrediti tehničko-ekonomski optimalne scenarije, kod kojih se ukupni investicioni i proizvodni troškovi minimiziraju na planerskom periodu i kod kojih su dostignuti ciljevi energetske efikasnosti [2]. U radu su korišćena takvi scenariji sa različitim ograničenjima. Ovi scenariji bazirani su na pretpostavkama o potrošnji, cenama energenata, opreme i takse na emisije, efikasnosti i kapacitetu postojeće i opreme koja je kandidat za izgradnju itd. kao u radu [8]. U prvom scenariju BAU (Business As Usual), za razliku od druga dva, nema ograničenja usaglašavanja energetske politike i dostizanja cilja energetske efikasnosti. Dostizanje ciljeva energetske efikasnosti u scenariju "RES and PHEV" (Renewable Energy Sources and Plug in Hybrid Electric Vehicles) zasnovano je na primeni punog skupa tehničkih mera:

1. proizvodnje energije iz obnovljivih izvora (izgradnja vetroelektrana, izgradnja fotonaponskih elektrana, izgradnja hidroelektrana),
2. energetske efikasnosti (ušteda uglja zbog renoviranja stambenih objekata u sektoru domaćinstava sa individualnim grejanjem, zamena uglja gasom, zamena uglja biomasom, ušteda toplote zbog renoviranja stambenih objekata u sektoru domaćinstava sa daljinskim grejanjem, ušteda toplote unapređenjem toplovoda, uvođenje kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije u industrijski itd.) i
3. strukturnih (uvođenje upravljive potrošnje, izgradnja reverzibilnih hidroelektrana i zamena dizel automobila električnim itd.)

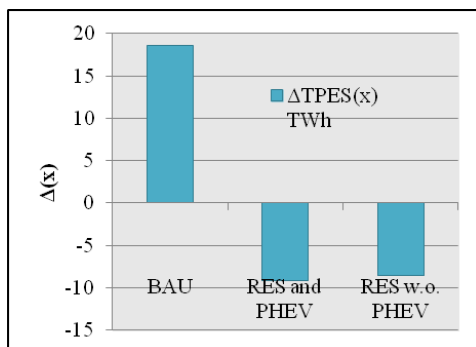
Radi kvantifikacije upotrebe električnih automobila iz punog skupa tehničkih mera u scenariju "RES w.o. PHEV" (Renewable Energy Sources with out Plug in Hybrid Electric Vehicles) izuzete su strukturne mere.



Sl. 1 Blok shema alata EnergyPLAN [7]

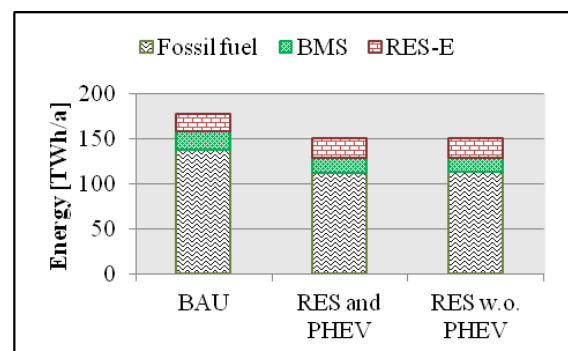
3. REZULTATI

Odstupanje u dostizanju cilja smanjenja ukupne primarne energije za scenario bez usaglašavanja energetske politike Republike Srbije sa Energetskom unijom prikazan je na Sl. 2, rezultat je spregnutog korišćenja simulacionog alata EnergyPLAN i optimizacionog alata GENOPT na studiji slučaja nacionalnog energetskog sistema Republike Srbije u 2030. godini.



Sl. 2 Odstupanje od cilja energetske efikasnosti 2030 za različite scenarije. "ΔTPES" (Total Primary Energy Supply)-odstupanje ukupne primarne energije od Evropskog cilja za 2030. "BAU"-scenario bez usaglašavanja, "RES and PHEV"-Evropska energetska politika korišćenja svih tehničkih mera, "RES w.o. PHEV" - Evropska energetska politika bez korišćenja mere električnih automobila.

U ekonomski optimalnom scenariju baznom slučaju, bez usaglašavanja (BAU), dominiraju tehnologije za proizvodnju energije bazirane na fosilnim gorivima, pa je ciljna vrednost uštede ukupne primarne energije premašena za 18.65 TWh/godišnje. U ekonomski optimalnom scenariju usaglašene energetske politike, primenom svih tehničkih mera, (RES and PHEV), ostvarena je značajna ušteda i premašenje postavljenog cilja za 9.15 TWh/a. Bez primene strukturne mere upotrebe električnih vozila, RES w.o. PHEV, moguće je dostizanje cilja energetske efikasnosti, uz primenu alternativnih, skupljih mera, usled kojih u ekonomski optimalnom scenariju dolazi do premašnja cilja od 8.58 TWh/a. Način na koji su ciljevi dostignuti i ukupni bilansi za grupe energenata dati su na Sl. 3.



Sl. 3 Smanjenje korišćenja fosilnih goriva usled primene obnovljivih izvora električne energije i električnih vozila. "Fossil fuel"- fosilna grupa energenata: lignit, nafta i derivati, "BMS"-biomasa, "RES-E" (Renewable Energy Sources - Electricity) - obnovljivi izvori električne energije

Ukupna primarna energija u ekonomski optimalnom scenariju bez usaglašavanja energetske politike, "BAU", iznosi oko 179 TWh/godišnje, od čega oko 138 TWh/godišnje iz fosilne grupe energenata, oko 22 TWh/godišnje iz biomase dok iz obnovljivih izvora električne energije učestvuje oko 19 TWh/godišnje. Primena punog skupa ekonomski optimalnih tehničkih mera, uz povećanje korišćenja obnovljivih izvora električne energije od samo 2.32 TWh/a (sa 19.3 na oko 21.6 TWh/godišnje), dovela je do smanjenja primarne energije za oko 28 TWh/godišnje, odnosno na oko 150 TWh/godišnje. Imajući u vidu i razlike uvoza/izvoza u ovim scenarijima, do smanjenja primarne energije bi takođe došlo ali u manjoj meri. U scenariju iz koga je izuzeta mera upotrebe električnih vozila, "RES w.o. PHEV", u odnosu na scenario sa punim skupom mera, "RES and PHEV", povećana je količina primarne energije za više od 1 TWh/ godišnje. Do ovog povećanja je došlo usled povećanja korišćenja fosilnih energenata, a smanjenja biomase i obnovljivih izvora električne energije.

4. ZAKLJUČAK

Primena izabranog skupa tehničkih mera dovodi nacionalni energetske sistem Republike Srbije na cilj dostizanja energetske efikasnosti i usaglašavanju energetske politike sa Energetskom unijom.

Dostizanje cilja energetske efikasnosti, smanjenjem potrošnje primarne energije ostvareno je na račun tehničkih mera energetske efikasnosti, ali i na račun korišćenja obnovljivih izvora energije i upotrebe električnih automobila.

Dodatno, u nekom budućem radu, treba kvantifikovati doprinos cilju energetske efikasnosti kombinacije električnih automobila sa fotonaponskim panelima u urbanim sredinama, smanjenje gubitaka usled prenosa i distribucije električne energije.

5. ZAHVALNOST

Ovaj rad finansiran je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, projekat br. 42009.

6. LITERATURA

- [1] M. Šefčević, "Power & Empowerment: The EU's Energy Security Challenge," *Horizons: Journal of International Relations and Sustainable Development*, vol. Spring, pp. 176-188, 2015.
- [2] N.Rajaković and I. B. Bjelić, "Optimalno planiranje razvoja nacionalnog energetskeg sistema pomoću računarskih simulacija," *Energija, ekologija, ekonomija*, vol. 17, pp. 59-63, 2015.

- [3] N. Taso and A. Ranković, "South East Europe 2050 Energy Model," 2015.
- [4] I. Batas Bjelić, D. Šošić, and N. Rajaković, "Energy loss in distribution network related to placement of solar photovoltaic systems," in *The Second International Conference on Renewable Electrical Power Sources*, Belgrade, 2013, p. 47.
- [5] B. Stojkov, P. Kovačević, S. Vukanović, N. Rajaković, G. Jankes, and M. Ivetić, *Urban Challenges of the City of Belgrade*. Beograd: Siemens, 2012.
- [6] D. Tovilović and N. Rajaković, "The simultaneous impact of photovoltaic systems and plug-in electric vehicles on the daily load and voltage profiles and the harmonic voltage distortions in urban distribution systems," *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 454-464, 2015.
- [7] H. Lund. "EnergyPLAN Advanced Energy Systems Analysis Computer Model Documentation Version 11.0," <http://www.energyplan.eu/wp/content/uploads/2013/06/EnergyPLAN-Documentation-V11-2013.pdf>.
- [8] I. Batas-Bjelic, N. Rajakovic, B. Cosic et al., "A realistic EU vision of a lignite-based energy system in transition: Case study of Serbia," *Thermal Science*, vol. 19, no. 2, pp. 371-382, 2015.

Abstract – European energy policy goals of saving in primary energy of 20 % until 2020 and 40% until 2030 are binding for the Energy union countries. Planning and implementation on the national level has been based on the certain types and amounts of technical measures which include renewable energy production, energy efficiency measures and structure measures. The technical measure of renewable energy production, besides direct contribution to increased share of renewable energy systems, contributes also to the primary energy savings, unlike technologies based on Carnot cycle. With the same reason, the structural measure of plug-in-hybrid-electric-vehicles contributes to the reduction of primary energy demand in the transport sector. This article quantifies the contribution of combined application of technical measures to the reaching the European energy efficiency goals, for the several scenarios in the Republic of Serbia case study.

THE CONTRIBUTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES AND PLUG IN ELECTRIC VEHICLES ACHIEVING THE NATIONAL ENERGY EFFICIENCY GOALS

Ilija Batas Bjelić, Nikola Rajaković

ENERGETSKA EFIKASNOST MREŽNIH FOTO-NAPONSKIH ELEKTRANA – PRIMER FNE “FTN NOVI SAD”

Vladimir A. Kati, Zoltan Orba, Boris Dumni, Dragan Milićević, Bane Popadić, Ilija Kovačević
 Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Sadržaj > Sve veći broj fotonaponskih elektrana (FNE) u svetu, ali i u Srbiji nameće pitanje efikasnosti njihovog rada, odnosno odnosa ostvarenja ili stepena iskorišćenja raspoložive solarne energije (performance ratio, PR). U radu je objašnjeno na koji način predstavljanje energetske efikasnosti FNE i definisani ključni parametri jedne FNE. Posebno je istaknut odnos ostvarenja (PR), koji je detaljno objašnjen. Kao primer, dati su rezultati za FNE „FTN Novi Sad“. Rezultati su upoređeni sa vrednostima iz drugih izveštaja. Pokazano je da FNE „FTN Novi Sad“ ostvaruje veoma veliku vrednost PR od čak 86%, što ukazuje na dobru kvalitet projekta, odabir komponenti i održavanje same elektrane.

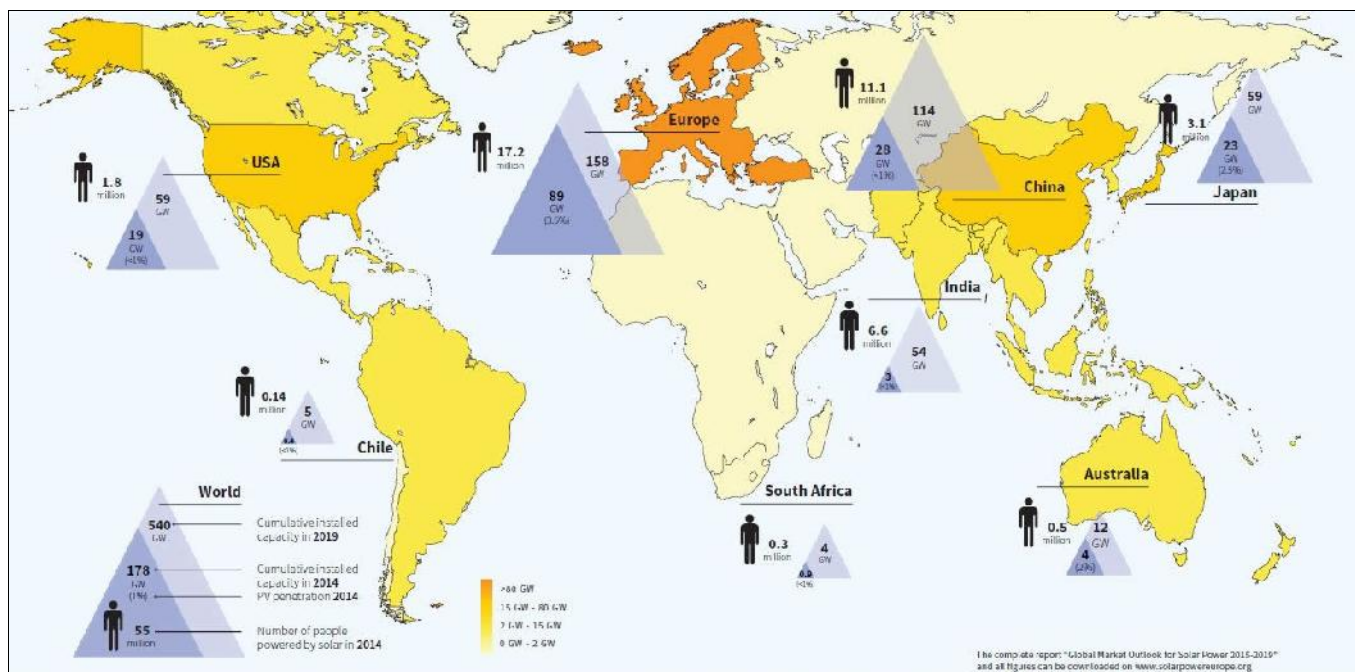
1. UVOD

Intenzivno korišćenje solarne energije u cilju njene konverzije u električnu danas se smatra jednim od najvažnijih rešavanja sve izraženijeg problema održivog razvoja, vezanog za iscrpljivanje svetskih zaliha fosilnih goriva, efekata staklene bašte, emisije CO₂, kao i sve očišćenijih klimatskih promena na Zemlji. Foto-naponski (FN) sistemi, odnosno Foto-naponske elektrane (FNE) doživljavaju nagli procvat poslednjih desetak godina i njihovi kapaciteti se ubrzano povećavaju, dodatno podstaknuti državnim finansijskim stimulacijama. Na sl. 1 predstavljeno je globalno stanje instaliranih kapaciteta na kraju 2014. god. i projekcije

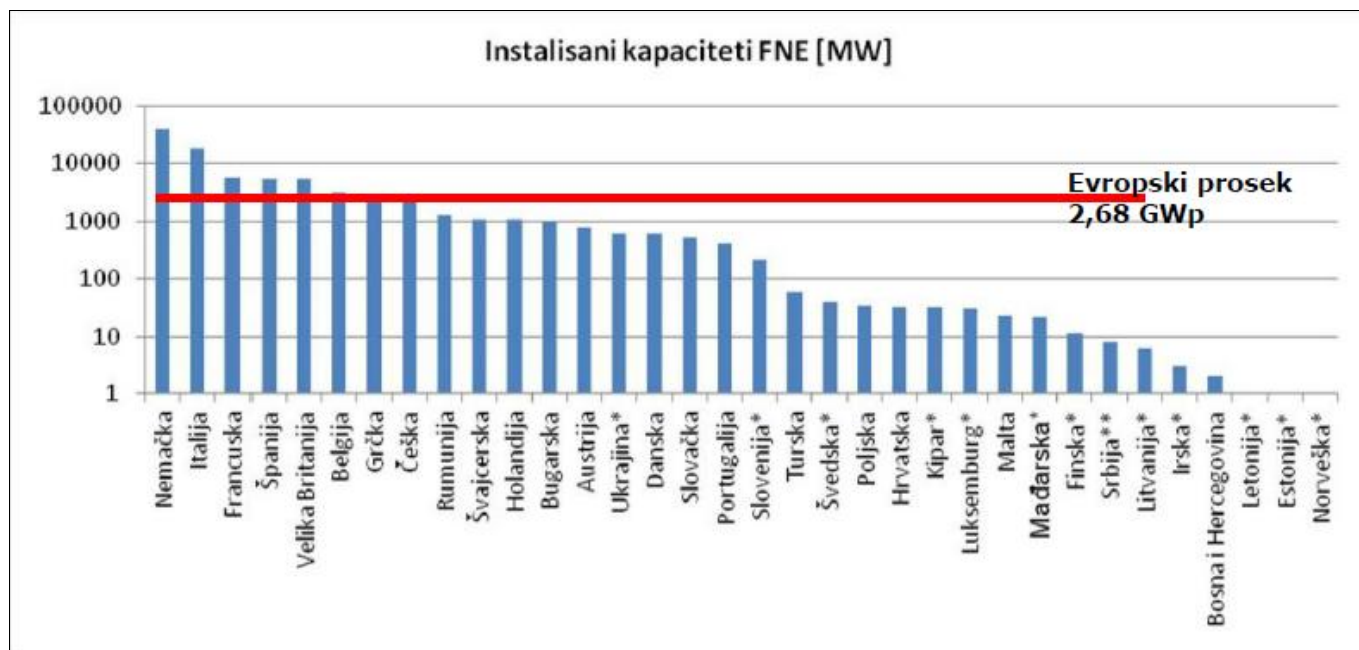
za 2019. god. Može se zapaziti da Evropski kontinent prednjači u ovoj oblasti i da je trenutno instalirano 89 GW, dok su projekcije da će se ovi kapaciteti povećati za četiri godine na čak 158 GW. Na globalnom nivou ove brojke iznose 178 GW u 2015. god. sa izgledima da porastu na čak 540 GW u 2019. god.

U Evropi, najviše pažnje ovom vidu obnovljive energije i njenoj transformaciji u električnu poklanja se u Nemačkoj. Na sl. 2 vidi se nivo instaliranih snaga FNE po zemljama. Najviše kapaciteta ima u Nemačkoj (38.235 MW), Italiji (18.313 MW), Francuskoj (5.632 MW), Španiji (5.388 MW) i Velikoj Britaniji (5.230 MW), a najmanje u Finskoj (11 MW), Srbiji (8 MW), Litvaniji (6 MW), Irskoj (3 MW) i Letoniji (1 MW), s tim da u Estoniji i Norveškoj uopšte nema ni jedne FNE. Evropski prosečak je 2.679 MW, ali su iznad proseka FNE u samo 6 zemalja, a u čak 27 zemalja su snage FNE ispod proseka.

U Srbiji se izgradnjom i eksploatacijom FNE uglavnom bave privatni investitori, tako da su ove elektrane malih kapaciteta i u najvećem broju izgrađene na objektima (krovovima). To je rezultat niskih investicionih potreba, ali i veoma povoljnih feed-in tarifa [4]. U tabeli 1, prikazan je trenutni broj i snaga FNE u Srbiji, kao i važeći nivo podsticaja.



Sl.1. Instalirani kapaciteti FNE 2014. i projekcije za 2019. god. [1]



Sl. 2. Ukupni instalisani kapaciteti solarnih elektrana (FNE) u evropskim državama krajem 2014. god. (*krajem 2013. god., ** sredinom 2015. god.) prema podacima iz [1,2,3].

Tabela 1. FNE elektrane u Srbiji [3,4]

Vrsta	Broj	Status	Snaga [MW]	Podsticaj [€/kWh]
Na zemlji	8	U radu	5,34	16,25
Na zemlji	9	U izgradnji	0,66	/
Na objektu <30kW	75	U radu	1,656	20,66
Na objektu <30kW	78	U izgradnji	0,293	/
Na objektu od 30 do 500 kW	10	U radu	1,086	16,25 – 20,66
Na objektu od 30 do 500 kW	10	U izgradnji	0,915	/
UKUPNO:	190		9,95	

Mrežne FNE su FN sistemi, koji su direktno vezani na mrežu, odnosno elektroenergetski sistem. Najčešće se sastoje iz FN panela za konverziju solarne u električnu (DC) energiju, zatim DC/DC konvertora za optimizaciju rada po algoritmu praćenja maksimalne snage panela (MPPT – Maximum Power Point Tracking), mrežnog invertora (DC/AC), te priključnih i zaštitnih sklopova i mernog brojlara. Interes investitora i vlasnika FNE je da elektrana postiže što bolje rezultate u svom radu, odnosno da proizvodi maksimalnu količinu električne energije iz raspoložive solarne. Iz tog razloga je u inostranoj FNE jedan od najvažnijih njenih faktora, a u suštini se radi o nivou njene energetske efikasnosti. U njemu se sadrži efikasnost rada svih pomenutih sklopova, tako da je njihov adekvatan izbor i međusobno dobro uparivanje od ključnog značaja. Na ovaj parametar utiče i niz operativnih faktora van onih, koji se mogu predvideti u procesu projektovanja, a kao rezultat mogu imati manju proizvodnju, kao što su temperatura, nivo oblačnosti, zaprljanost, osneženost, razni kvarovi komponenata, zastoji, pauze u radu i sl.

Cilj ovog rada je da prikaže u inostranoj, odnosno energetske efikasnost jedne FNE, koji se u engleskoj literaturi naziva *Performance Ratio* (PR), kao i da na primeru rezultata FNE „FTN Novi Sad“ prikaže neke konkretne, realno ostvarene veličine.

2. KARAKTERISTIKE I PARAMETRI JEDNE FNE

Efikasnost jedne fotonaponske elektrane može da se izrazi različitim parametrima. U literaturi je poznat itav niz parametara, kojima se izražavaju različiti parametri (indikator) rada foto-naponskog sistema (*System performance indices*). Oni su definisani u odgovarajućim standardima, a onda primenjeni u konkretnim situacijama i u skladu sa time odgovarajuće adaptirani [5,6,7,8].

Standard IEC 61724:1998 definiše tri grupe parametara za performance sistema [5]:

1. Dnevni/mesečni/godišnji prinos
2. Normalizovani gubici
3. Efikasnost sistema

2.1. Dnevni, mesečni ili godišnji prinos

Dnevni, mesečni ili godišnji prinos definišu stvarni rad elektrane (dobijene energije) u kWh u odnosu na projektovan (instalisan) kapacitet (nazivnu snagu, kWp ili kW) na dnevnom (*day*), mesečnom (*month*) ili godišnjem (*year*) nivou. Razlikuju se prinos niza (*Array Yield - Y_A*) panela, ukupni (finalni) prinos FN sistema (*Final PV System Yield - Y_f*) i referentni (*Reference Yield - Y_r*) prinos opet na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou.

Prinos niza (*Y_A*) panela definiše se kao odnos dobijene električne (DC) energije iz niza panela na dnevnom, mesečnom ili godišnjem nivou (*E_{A,d}*; *E_{A,m}*; *E_{A,y}*) u kWh i nazivne DC snage instalisanog PV niza (*P₀*) u kW_p.

$$Y_{A,d} = \frac{E_{A,d}}{P_0} \text{ (kWh)/(kW}_p\text{) ili hours/day} \quad (1)$$

$$Y_{A,m} = \frac{E_{A,m}}{P_0} \text{ (kWh)/(kW}_p\text{) ili hours/month} \quad (2)$$

$$Y_{A,y} = \frac{E_{A,y}}{P_0} \text{ (kWh)/(kW}_p\text{) ili hours/year} \quad (3)$$

On prikazuje najmanji broj sati koji je potreban PV panelima da pri radu sa nazivnom snagom P_0 (u stvari maksimalnom snagom, koja se može ostvariti na PV panelima kada sun evi zraci maksimalne radijacije padaju na površinu panela pod pravim uglom – kWp) ostvare proizvedenu energiju na dnevnom, mese nom ili godišnjem nivou ($E_{A,d}$; $E_{A,m}$; $E_{A,y}$).

Standard ne definiše situaciju da u FNE ima više nizova panela, jer je pisan u vreme kada takve situacije nisu postojale. Me utim, analognim na inom razmišljanja može se definisati prinos na DC izlazu kao suma prinosa svih nizova (N nizova), opet na dnevnom, mese nom ili godišnjem nivou:

$$\left(Y_{A,d/m/y}\right)_N = \sum_{i=1}^{i=N} \left(Y_{A,d/m/y}\right)_i \quad (4)$$

Krajnji (finalni [5,6], specifi ni [7]) prinos FN sistema (Y_f) je odnos proizvedene elektri ne (AC) energije na izlazu FN sistema ($E_{d/m/y}$) u kWh i nazivne DC snage instalisanog PV niza (P_0) u kWp, opet na dnevnom, mese nom ili godišnjem nivou.

$$Y_{f,d/m/y} = \frac{E_{d/m/y}}{P_0} \left[kWh / kW_p \right]_{d/m/y} \quad (5)$$

ili $[hours]_{d/m/y}$

Iz (1)-(3) i (5) se vidi da se Krajnji prinos FN sistema (Y_f) može definisati i kao:

$$Y_{f,d/m/y} = Y_{A,d/m/y} \cdot Y_{BOS} \quad (6)$$

gde je Y_{BOS} koeficijent korisnog dejstva pri konverziju energije (DC i AC dela sistema), odnosno kompletnog dela sistema od DC izlaza panela do AC mrežnog priklju ka. On prikazuje najmanji broj sati koji je potrebno PV sistemu da radi sa nazivnom snagom P_0 (u stvari maksimalnom snagom, koja se može ostvariti na PV panelima kada sun evi zraci maksimalne radijacije padaju na površinu panela pod pravim uglom – kWp) da bi ostvario proizvedenu dnevnu/mese nu/godišnju elektri nu (AC) energiju ($E_{d/m/y}$). On je specifi an za svaku FNE, jer zavisi od kvaliteta panela, vremenskih prilika, temperature, efikasnosti svih sklopova, broja otkaza i sl.

Referentni prinos sistema (Y_r) treba da predstavi maksimalne, teorijske mogu nosti FN sistema, odnosno maksimalnu koli inu energije, koja bi se mogla dobiti iz datih panela kada bi oni bili obasjani pod najpovoljnijim uslovima u odnosu na njihovu nominalnu (nazivnu) snagu. Data je kao odnos ukupne (teorijski mogu e) elektri ne (AC) energije koja bi se dobila po kvadratnom metru panela (H) u kWh/m² i referentne (maksimalne) instalisane snage (G) po kvadratnom metru u kW_p/m² na toj lokaciji.

$$Y_{r,d/m/y} = \frac{H_{d/m/y}}{G} \left[(kWh / m^2) / (kW_p / m^2) \right]_{d/m/y} \quad (7)$$

ili $[hours]_{d/m/y}$

Y_r predstavlja broj sun anih sati sa maksimalnom iradijacijom (*peak sunhours*) i u stvari definiše solarne resurse FN sistema za odre enu lokaciju (zato se definiše po kvadratnom metru). To je u stvari maksimalni teorijski broj radnih sati nekog FN sistema pri punom (nazivnom) kapacitetu na dnevnoj, mese noj ili godišnjoj bazi.

2.2. Normalizovani gubici

Normalizovani gubici se ra unaju oduzimanjem prinosa i predstavljaju se u kWh/day/kW_p, odnosno daju broj sati rada dnevno (ili mese no ili godišnje), koji nije iskoriš en. Definišu se gubici u radu niza (*Array capture* - L_C), BOS gubici (L_{BOS}) i Odnos ostvarenja (*Performance Ratio* – PR).

Gubici u radu niza (L_C) su dati kao razlika referentnog prinosa i prinosa niza i predstavljaju gubitke panela, odnosno gubitke u radu niza panela:

$$L_C = Y_r - Y_A \quad (8)$$

BOS (*Balance of System*) gubici (L_{BOS}) su ukupni gubici u svim komponentama FN sistema van panela. Tu spadaju gubici u kablovima, prekida ima, zaštitnoj opremi, energetkim pretvara ima (DC/DC i inverter), priklju noj opremi i sl. Ovaj parametar pokazuje uravnoteženost proizvodnje energije u panelima sa jedne strane i potreba potroša a za energijom sa druge strane. Definiše se na slede i na in:

$$L_{BOS} = Y_A \cdot (1 - Y_{BOS}) \quad (9)$$

Odnos ostvarenja (*Performance Ratio* – PR) je odnos krajnjeg i referentnog prinosa sistema:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

On u stvari pokazuje koliko je ostvarenje elektrane u odnosu na njen teorijski maksimum. U fizi kom smislu, odnos ostvarenja predstavlja ukupne gubitke u sistemu i to u radu FN panela (usled uticaja temperature, degradacije performansi tokom vremena, zaprljanosti modula i sl.) i u komponentama Fn sistema van panela (L_{BOS}).

2.3. Efikasnost sistema

Efikasnost sistema se posmatra kao srednja (prose na) efikasnost niza (*Mean Array Efficiency* – $\eta_{A,mean}$) u odre enom (posmatranom) vremenu i kao sveukupna efikasnost FNE (*Overall PV Plant Efficiency* – η_{TOT}) u odre enom (posmatranom) vremenu .

Efikasnost sistema definiše se kao odnos elektri ne energije dobijene od niza panela u periodu i referentne (maksimalno mogu e) energije za datu površinu panela (A_A) u periodu (maksimalne energije solarnog zra enja):

$$\eta_{A,mean} = E_{A,\tau} / A_A \cdot \tau \cdot G = \frac{Y_{A,y}}{\tau_y} \quad (11)$$

gde je $Y_{A,y}$ godišnji prinos niza, a τ_y godišnji broj sati (8760 h).

Sveukupna efikasnost FN elektrane u periodu (τ_{TOT}) ili samo energetska efikasnost (η) definiše se kao:

$$\eta_{TOT,\tau} = \eta = \eta_{A,mean} \cdot \eta_{BOS} \quad (12)$$

2.4. Kapacitet FN elektrane

Radi lakšeg uklapanja FN elektrane u elektroenergetski sistem i poređenja sa ostalim izvorima, definiše se kapacitet FNE (*Capacity factor, CF*) kao odnos krajnjeg prinosa (u satima), koji reprezentuje ostvarenu godišnju proizvodnju električne energije i raspoloživog broja sati, koji predstavlja maksimalno ostvarenje, odnosno maksimalni potencijal dobijanja električne energije ukoliko bi elektrana radila sa ukupnom instalisanom (nominalnom) snagom sve vreme (365/24) za godinu dana. Kapacitet solarne elektrane se može izraziti iz izraza:

$$CF = \frac{Y_f [h]}{8760 [h]} = PR \cdot \frac{Y_{r,y}}{8760} \quad (13)$$

Međutim, ako se (6) i (11) uvrste u (12) može se dobiti sledeće:

$$\eta = \frac{Y_{A,y}}{\tau_y} \cdot \frac{Y_{f,y}}{Y_{A,y}} = \frac{Y_{f,y}}{\tau_y} = \frac{Y_f}{8760} = CF \quad (14)$$

odnosno vidi se da je kapacitet FNE u stvari predstavlja njenu sveukupnu efikasnost.

2.5. Realno korišćeni parametri

Najčešće se koriste energetska efikasnost (η), krajnji (specifični) prinos (Y_f), odnos ostvarenja (odnos performansi sistema -PR) i kapacitet (CF) [7].

Međutim, za određivanje u inku celokupnog FN sistema najzgodniji su pokazatelji u odnosu na energetske produkciju, solarne resurse i sveukupne efekte gubitaka sistema. Za to je najpogodniji parametar koji opisuje u inku FNE, odnosno Odnos ostvarenja (*Performance Ratio – PR*) [6,7,8]. Ovaj parametar je pogodan i iz razloga što se preko njega mogu izraziti i svi ostali parametri, što se vidi iz (10) i (14).

3. ODNOS OSTVARENJA - PR

Odnos ostvarenja (PR) prikazuje realni u inku FNE u odnosu na teorijski maksimalan mogući i izražava se u procentima. To je jedan od najvažnijih parametara jedne FNE. Kako prikazuje ostvarenje normalizovano u odnosu na solarno zračenje, on kvantifikuje sveukupne efekte gubitaka u FN sistemu (gubici u invertoru, u instalaciji, u FN panelima, gubitke usled refleksije na panelima, smanjenja zbog zaprljanosti panela ili pokrivenosti u snegu, te zbog kvarova komponenta i raznih zastoja u radu).

Što je ovaj parametar bliži maksimalnim mogućim vrednostima elektrane, tim je efikasniji rad, odnosno smanjeni su gubici u radu. Za određivanje PR potrebne su različiti parametri, kao što su:

- Vrednost zračenja na lokaciji fotonaponske elektrane
- Površina površine FN panela
- Efikasnost FN panela

Period za koji se računa može biti dan, mesec ili godina, ali se smatra optimalnim da taj period bude jedna godina, jer su kraći i vremenski intervali manje tačni i mogu biti podložni uticaju kratkotrajnih (ekstremnih, min/max) vrednosti. Najčešći prikaz je za jednu godinu, s tim da se iskazuju mesečne vrednosti [6,7].

Odnos ostvarenja (PR) omogućava upoređivanje energetske efikasnosti FN elektrana na različitim lokacijama, bez obzira na ambijentalne uslove (zračenje, temperatura). U stvarnom radu PR=100% se ne može dostići, zbog raznih neizbežnih gubitaka, tako da se realni godišnji PR kreće između 60% i 90% [6,7,8]. Može se reći da je FN elektrana dobro projektovana i kvalitetna, ako je PR veća od 75%. Elektrane sa veoma kvalitetnim invertorima (velika efikasnost pri različitim uslovima rada) mogu dostići godišnji PR i do 85%.

4. FNE „FTN NOVI SAD“

Mrežna FNE „FTN Novi Sad“ je postavljena na ravan krov iznad amfiteatara Fakulteta tehničkih nauka i uspešno radi od oktobra 2011. god. Od januara 2012. god. zvanim je priključena na elektroenergetski sistem EPS-a, kao povlašćeni proizvođač „zelenih energija“. Instalirana snaga je 9,6 kW_p, dok je izlazna nazivna snaga 8 kW. Realizovana je sa trofaznim invertorom string koncepcije, Sunny Tripower 8000 TL, proizvođača SMA Solar Technology, nominalne izlazne snage 8 kW. Na dva nezavisna ulaza invertora priključena je po jedan FN niz (*string*), formiran od redne veze 20 FN panela, proizvođača Jinko Solar, oznake JKM-240P. Maksimalna snaga pojedinačnih FN panela iznosi 240 W_p. Oba ulaza opremljena su DC/DC konvertorima upravljanim sa MPPT algoritmom za praćenje maksimalne snage niza. Na sl. 3 se vide FN paneli postavljeni na nose u konstrukciju, koja je smeštena na ravnom krovu, s tim da su paneli usmereni ka jugu pod nagibnim uglom od 30°.

Mesto instalacije i izabrana noseća konstrukcija FN panela su omogući ili njihov idealan položaj. Pored FN panela i invertora, elektranu čine zaštitna i sklopna oprema, kako na jednosmernoj (DC), tako i na izlaznoj naizmennoj (AC) strani. Takođe, uređaj je i upravlja ko-nadzorni sistem koji čine niz senzora (SensorBox), uređaj za nadzor (WebBox) i računarsa softverom za praćenje stanja u elektrani [9].

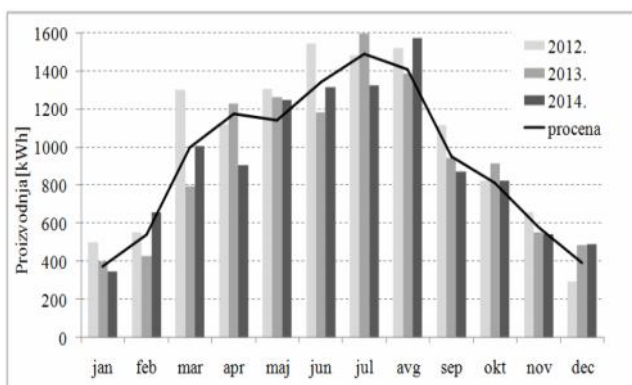


Sl.3. FNE „FTN Novi Sad“ – prikaz pozicije FN panela.

Zbog neposrednog okruženja, elektrana je projektovana sa visokim koeficijentom dimenzionisanja invertora k_{inv}

(koli nik nominalne snage FN panela i nominalne izlazne snage invertora), koji iznosi $k_{inv}=1,2$ (9600Wp/8000W). Zahvaljuju i položaju FN panela, kvalitetnom invertoru i velikom k_{inv} u inak elektrane je veoma velik, odnosno elektrana ima dobre performanse.

Na sl. 4 prikazana je procenjena proizvodnja FN elektrane po mesecima (puna linija), koja je određena na osnovu baze podataka zračenja softvera PVGIS. Na istoj slici prikazana je i ostvarena proizvodnja za prve tri godine rada elektrane. Vide se značajna odstupanja u proizvodnji od procene za pojedine meseci, što je posledica stvarnih meteoroloških prilika, koje su odstupale od dugogodišnjih proseka. Ipak, prose na godišnja suma proizvedene električne energije za tri godine se dobro slaže sa procenjenom vrednošću i iznosi 11,7MWh, dok je procenjena vrednost 11,2MWh. Dakle, ukupno odstupanje je samo +4,5%.



Sl.4. Procenjena i ostvarena proizvodnja električne energije FNE "FTN Novi Sad" [9].

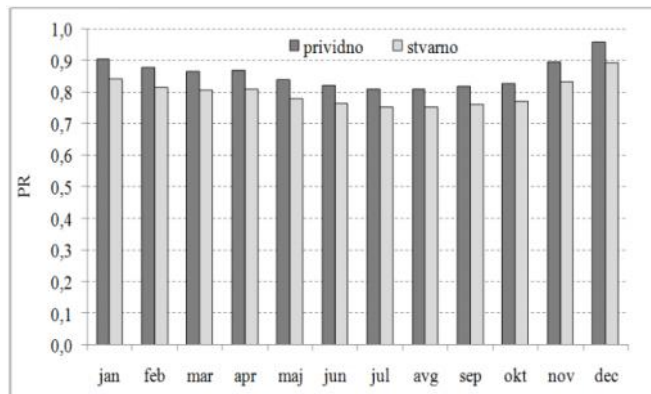
5. PREGLED OSTVARENJA (PR) ZA „FTN NOVI SAD“

Da bi se odredio Odnos ostvarenja (PR) FN elektrane, potrebno je u skladu sa (10) uporediti ostvarenu proizvodnju električne energije na izlazu FNE sa solarnom energijom (zračenjem), koja bi dospela na FN panele (referentna energija) u posmatranom intervalu vremena.

U FN elektrani "FTN Novi Sad" solarno zračenje se meri sa kalibrisanom FN elijom, koji je sastavni deo mini meteorološke stanice nazvane SensorBox. SensorBox je postavljen na nose u konstrukciju FN panela, pod istim uglom kao paneli. Zbog okolnih zgrada, FN paneli, a samim tim i SensorBox, nalaze se u senci u jutarnjim satima, što smanjuje ukupni potencijal zračenja, pa je PR, koje softver proračunava na osnovu podataka iz SensorBoxa, biti nazvan *Prividni PR*. Naime, ako postoji problem sa senenjem, dužina insolacije FN panela i senzora zračenja može biti različita. Različita dužina insolacije zavisi od položaja senzora u elektrani (kraće ili duže u senci) i na taj način indirektno utiče na veličinu PR (*Prividni PR*). Odnos ostvarenja definisan jednačinom (10) uzima u obzir teoretski maksimalni referentni prinos, što znači da se isključuje senenje tokom proračuna. Nadalje je PR definisan izrazom (10) biti zvan *Stvarni PR*. Analizom senenja lokacije pomoću softvera PVSyst procenjeno je da bi zračenje bez senenja bilo za 7% veće od stvarne situacije.

Na sl. 5 se prikazuje kretanje PR tokom godine, kako prividnog, tako i stvarnog PR. Ovakva promena tokom godine je karakteristična za naše podneblje. Vidi se da je

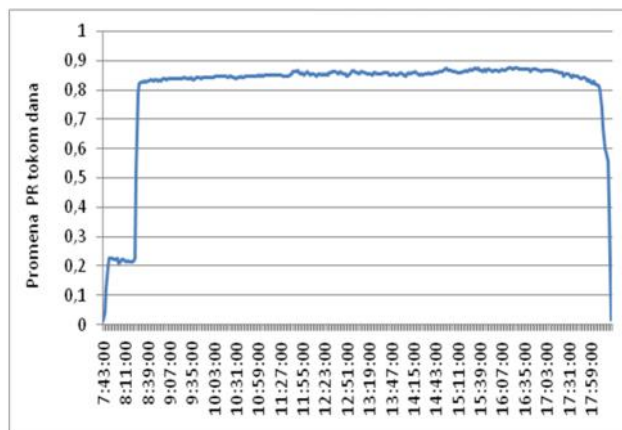
ostvarenje nešto bolje u mesecima kada je slabija proizvodnja (zimski meseci), nego tokom letnjih meseci. Slika 5 anemirani odnos za PR prijavljen je i u [7], s tim da je lokacija te FNE oko 330 km jugo-istočno nije od FNE „FTN Novi Sad“.



Sl.5. Odnos ostvarenja (PR), prividno i stvarno.

Međutim, slični takvi rezultati pokazuju se i u drugim područjima, kao što se može videti u [6], gde se radi o FNE u Arizoni (USA). Objašnjenje je u temperaturnoj zavisnosti izlazne karakteristike FN panela. Naime, zbog visoke temperature samog FN panela u toku letnjih meseci krajnji prinos elektrane Y_f se više smanjuje nego zimi, u odnosu na referentni prinos Y_r . Kretanje PR tokom sunčanog letnjeg dana za FNE „FTN Novi Sad“ prikazano je na sl. 6. Ono što je karakteristično za sliku je pojava grafika, odnosno jutarnji sati, kada se javlja efekt senke, koji nije mogao biti izbegnut. PR je veoma malo (oko 20%), jer se FN paneli nalaze u potpunoj, odnosno neposredno pre skoka vrednosti PR, u delimičnoj senci.

Za FNE „FTN Novi Sad“ se dobija da godišnji Odnos ostvarenja elektrane, odnosno godišnji *Prividni PR* iznosi 86%, dok je godišnji *Stvarni PR*, po definiciji (10), 80%. Obe vrednosti PR svrstavaju ovo postrojenje u FN elektranu sa odličnom energetsom efikasnošću. Bez obzira na gubitke usled senenja od 7%, zbog velikog koeficijenta dimenzionisanja invertora, vrednost PR je značajna. Istraživanje uticaja k_{inv} na PR je vršeno na elektrani, i utvrđeno je da je k_{inv} dobro odabrano i da bi eventualno njegovo smanjenje dovelo do linearnog smanjenja i PR [10].



Sl.6. Promena odnosa ostvarenja tokom dana.

6. ZAKLJU AK

U radu su posmatrani ključni parametri za određivanje energetske efikasnosti jedne FNE, a dati su konkretni podaci za FNE „FTN Novi Sad“ izlazne nominalne snage 8 kW. Pokazano je da se u cilju određivanja energetske efikasnosti koristi parametar Odnos ostvarenja (*Performance Ratio* – PR), koji se kreće između 60% i 90%. Temperaturna zavisnost karakteristike FN panela glavni je uzrok manjeg PR tokom letnjih meseci u odnosu na zimske, što može biti podsticaj da se razmatra primena hibridnih verzija panela (FN/Thermal).

Godišnji Odnos ostvarenja za FNE „FTN Novi Sad“ je PR=80%, a ako se uzme uticaj senjenja, onda se on penje na čak 86%. Ovako dobar rezultat posledica je veoma pažljivog i temeljnog projektovanja same elektrane, kojeg je izvela grupa profesora sa Fakulteta tehničkih nauka iz Novog Sada iz Centra za obnovljive izvore i kvalitet električne energije, kao i kvalitetnog odabira FN panela, sklopova i komponenti, te brižljivog održavanja elektrane u kojem važnu ulogu imaju studenti i diplomci fakulteta.

7. LITERATURA

- [1] M. Reinger, F. Thies, G. Masson and S. Orlandi, „Global Market Outlook for Solar Power 2015/2019“, Solar Power Europe, Brussels, 2015. Available On-line: http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/Publications/Global_Market_Outlook_2015_-_2019_lr_v23.pdf
- [2] G. Masson, S. Orlandi and M. Reinger, „Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018“, EPIA – European Photovoltaic Industry Association, Brussels, 2014. Available On-line: http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014_-_2018_-_Medium_Res.pdf
- [3] ***, Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, „Registar povlašćenih proizvođača električne energije 04.08.2015.“, Beograd, 2015, Available On-line: <http://www.mre.gov.rs/doc/registar04.08.html>
- [4] ***, Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, „Uredbu o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije“, *Službeni glasnik*, br.8/2013, Beograd, 2013, Available On-line: <http://www.mre.gov.rs/doc/efikasnost-izvori/B02%20Uredba%20o%20merama%20podsticaja%20za%20povlascene%20proizvodjace.pdf>
- [5] BS EN 61724:1998 / IEC 61724:1998, „Photovoltaic system performance monitoring — Guidelines for measurement, data exchange and analysis“, British Standard/IEC Standard, London/Geneva, 1998.
- [6] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, D. Shugar, H. Wenger, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich and T. Townsend, „Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems“, *31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*, Lake Buena Vista, Florida, USA, January 3-7, 2005
- [7] D. D. Milosavljević, T. M. Pavlović and D. S. Piršl, „Performance analysis of a grid-connected solar PV plant in Niš, Republic of Serbia“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.44, 2015, pp.423–435, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.031>
- [8] ***, „Performance ratio - Quality factor for the PV plant“, SMA – Technical Information: Perfratio-UEN100810, Ver.1.0, SMA Solar Technology AG, Available On-line: <http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-UEN100810.pdf>
- [9] V. A. Kati, Z. Orba, D. Milićević, B. Dumnić, B. Popadić, „Realizacija krovne fotonaponske elektrane na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu“, *Tehnika*, God.70, Br.4, 2015, pp.655-662.
- [10] J. Mati, „Analiza rada fotonaponske elektrane sa visokim koeficijentom dimenzionisanja invertora“, Završni rad (Mentor: Zoltan Orba), Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Jul 2015.

Abstract – An increasing number of photovoltaic generation plants (PVGP) in the World, but also in Serbia raises the question of the efficiency of their work, or their Performance ratio (PR). The paper presents energy efficiency and definitions of key parameters of a PVGP. Special attention is given to Performance ratio (PR), which is explained in details. As an example, some operational results of the PVGP "FTN Novi Sad" are presented. Results were compared with values from other reports. It is shown that the PVGP "FTN Novi Sad" has a very high value PR of 86%, indicating a good quality of project, component selection and maintenance work of the plant.

ENERGY EFFICIENCY OF IN-GRID PHOTO-VOLTAIC POWER PLANTS – CASE STUDY OF “FTN NOVI SAD”

Vladimir A. Kati, Zoltan Orba, Boris Dumnić, Dragan Milićević, Bane Popadić, Ilija Kovačević

ENERGETSKA EFIKASNOST KOGENERACIJSKE PROIZVODNJE ENERGIJE I OGRANIČENJA U REPUBLICI SRPSKOJ

Zdravko N. Milovanović, *Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka*
Svetlana R. Dumonjić-Milovanović, *Partner inženjering d.o.o. Banja Luka*

Sadržaj – Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije (Combined Heat and Power - CHP) i sistema daljinskog grejanja i hlađenja (District Heating and Cooling - DHC) predstavljaju niz provjerenih, pouzdanih i ekonomičnih tehnologija, koje već daju značajan doprinos ispunjenju globalne potražnje za toplotnom i električnom energijom. Zbog svoje povišene efikasnosti u snabdevanju energijom i korišćenju otpadne toplote i nisko-ugljeničnih obnovljivih izvora energije, CHP i DHC sistemi su već sada važan dio nacionalnih i regionalnih strategija za smanjenje stakleničkih gasova (Green House Gas - GHG). U okviru ovog rada dat je prikaz problematike korišćenja CHP i DHC sistema u Republici Srpskoj.

1. UVOD

Zakon o održanju energije definiše energiju kao oblik koji se ne može niti proizvesti niti uništiti, već samo transformirati iz jednog oblika u drugi. Energija je dakle samo pohranjena u obliku koji u pravilu nije podesan za neposredno korišćenje. Transformacije energije iz jednog u drugi energetska oblik teku sve do dobijanja energetskih oblika koje krajnji korisnici zahtijevaju (toplotna energija, mehanička energija, hemijska energija i energija rasvjetle). Pri tome su od posebnog značaja transformacije u kojima se proizvodi električna energija. Tehnološki nivo njene transformacije iz prirodnih oblika (primarna energija) u korisne poželjne oblike predstavlja osnov za mjerenje energetske efikasnosti, pri čemu svaki tehnološki napredak ima za posljedicu društveni i privredni rast. Proizvodnja, prenos (transport), akumulacija i inoviranje energije predstavljaju imperativno strateške ciljeve neophodne za rast ljudskog društva. Iako se je nakon energetske krize krajem sedamdesetih godina prošlog vijeka prestalo sa rasipnim trošenjem energije, u industrijski razvijenim zemljama njena potrošnja je skoro deset puta veća u odnosu na potrošnju prosječnog stanovnika zemlje.

Zbog svoje lake transformacije u druge oblike energije, kao i mogućeg transporta na veće udaljenosti prenosnom mrežom (naponski nivoi 110 kV, 220 kV i 400 kV), električna energija je izuzetno značajna za privredni razvoj svake zemlje. Empirijski je utvrđeno da je potrošnja električne energije po glavi stanovnika jedan od ključnih parametara, koji ukazuje na razvijenost nacionalne privrede i životni standard ljudi određene zemlje. Većina prognoza danas pokazuje da će se za pola vijeka broj stanovnika na zemlji udvostručiti, prije nego što bude zaustavljen na 12 milijardi, što zahtijeva obezbjeđenje dodatne energije.

Sve dosadašnje projekcije energenata u budućnosti pokazale su da će fosilna goriva biti i u narednom periodu značajan izvor energije. Prognoze iz 2004. godine o pravcima kretanja svjetske energije u budućnosti, pokazale su da će se potrebe za energijom u iduća dva desetljeća u zemljama u razvoju udvostručiti, budući da stanovništvo i ekonomija u

zemljama u razvoju rastu brže nego u industrijalizovanim zemljama. Pronalaženje načina koji će omogućiti razvoj i načina za zadovoljavanje rastućih svjetskih potreba za energijom treba istovremeno i ublažiti moguće uticaje snabdijevanja i upotrebe energije na životnu sredinu, uz osiguravanje dugoročnog kvaliteta za život na zemlji.

Zahtjevi za kontinuiranim obezbjeđenjem potreba za energijom u dovoljnim količinama za industrijska postrojenja, saobraćaj i standard života ljudi, zahtijeva razvoj novih tehnologija zasnovanih na fosilnim gorivima (postrojenja za sagorijevanje u fluidizovanim sloju, kombinovani ciklusi sa gasifikacijom, kombinovani ciklusi sa prirodnim gasom kao gorivom, gorive ćelije, tehnologije sa spoljašnjom toplotnom energijom - Stirlingova mašina, termofotonaponska konverzija, termalno-električni konvertori sa alkalnim metalima), kao i povećanje energetske efikasnosti (štednja i racionalno korišćenje energije, smanjenje distributivnih i drugih gubitaka). S druge strane, korišćenje raspoloživih izvora energije prate određeni problemi:

- ugalj, nafta i gas predstavljaju neobnovljive izvore energije, čije pojačano trošenje, osim što skraćuje period njihovog budućeg korišćenja, utiče na rast globalnog zatopljenja, uz vrlo ozbiljne posljedice;
- nuklearna energija, nakon havarije u Černobilju i Fukošimi, nailazi na ozbiljan problem društvenog prihvaćanja (nakon havarije u Fukošimi iz marta 2011. godine mnoge zemlje su odustale od već planiranih nuklearnih elektrana);
- obnovljivi izvori energije zahtijevaju poseban tretman i stimulacije, kako bi se razvili do mjere koja obezbjeđuje takva rješenja u primjeni koja bi bila ekonomski isplativa.

2. PLANIRANJE RAZVOJA ENERGETSKIH SISTEMA U BUDUĆNOSTI I MODULI ODLUČIVANJA

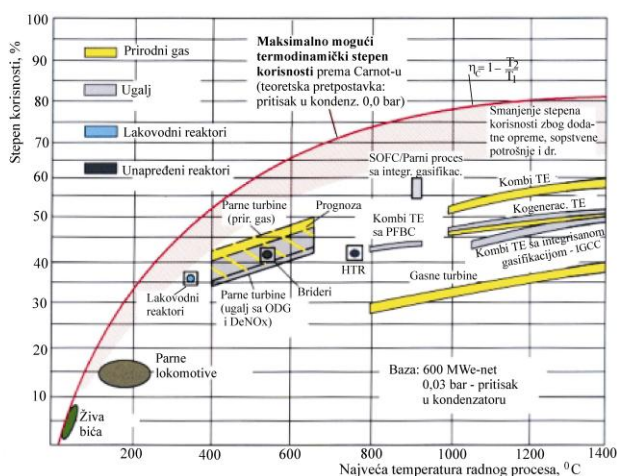
Kako je budućnost čovječanstva sa aspekta obezbjeđenja dovoljne energije prepuna određenih nesigurnosti (različite mogućnosti, rizici, problemi i sl.), prelazni period do 2050. godine karakterisaće veliki ritam promjena i burna dešavanja (enorman rast broja stanovnika na zemlji, sa tendencijom dostizanja i stabilizacije na 12 milijardi do kraja sljedećeg stoljeća, sve veći jaz između bogatih i siromašnih, vođenje ratova za energetske izvore, klima povjerenja i tolerancije između istoka i zapada, između sjevera i juga, između različitih narodnosti i religija, itd.). Povećanje rasta potrošnje energije u svijetu zahtijevaće i određeno povećanje u proizvodnji energije. Postrojenja s poboljšanim korištenjem fosilnih goriva (elektrane s naprednim tehnologijama u korištenju uglja sa težnjom da imaju nula emisije, elektrane s kombinovanim gasno parnim ciklusom, proizvodnja električne energije u gorivnim ćelijama), spadaju u tehnologije za proizvodnju električne energije, koje će sa

aspekta održivog razvoja biti prihvatljive u prvoj polovici 21. vijeka. Paralelno sa njima, biće korištene i poboljšane nuklearne tehnologije (nuklearne elektrane s unaprijeđenim lakovodnim reaktorima, nuklearne elektrane s visokotemperaturnim reaktorima, nuklearne elektrane s brzim oplodnim reaktorima)

Element koji je zajednički u svim dugoročnim strategijama razvoja energetskog sektora predstavlja usmjeravanje na proizvodne sisteme i na potrošnju sa visokom efikasnošću i niskim troškovima energije i materijala. Pronalaženje načina koji će omogućiti razvoj i načina za zadovoljavanje rastućih svjetskih potreba za energijom trebaju istovremeno i ublažiti moguće uticaje snabdijevanja i upotrebe energije na životnu sredinu, uz osiguravanje dugoročnog kvaliteta življenja na zemlji. Pri razvoju elektroenergetskih sistema posebna pažnja se poklanja mogućem povećanju efikasnosti elektrana. Naravno, pri tome postoji naša odgovornost u pogledu zadovoljenja sigurnosti u snabdijevanju energijom, ekonomičnošću i uticaja na klimatske promjene. Energetska efikasnost elektrane ili njenih sastavnih komponenti izražava se preko stepena korisnosti (η_{TE} , η_k , η_t , η_{RC}). Maksimalna vrijednost stepena korisnosti energetskog postrojenja ograničena je stepenom korisnosti Carnot-ovog ciklusa, $\eta_c = 1 - T_2/T_1$, gdje T_2 i T_1 predstavljaju temperature izotermske kompresije odnosno izotermske ekspanzije, što je prikazano na slici 1, [1]. Kod parnih postrojenja uzima se u obzir Renkinov ciklus, $\eta_{RC} = \eta_c \cdot \eta_{ex}$. Stepenn korisnosti se izražava kao odnos korisne energije dobijene u termoelektranama (električna energija + toplota) i uložene energije goriva. Specifična potrošnja energije izražava se odnosom utrošene toplote goriva za proizvodnju 1 kWh električne energije i predstavlja recipročnu vrijednost stepenu korisnosti elektrane:

$$q_{TE} = \frac{1}{\eta_{TE}} \quad (1)$$

Specifična potrošnja energije izražava se i kao specifična potrošnja goriva (kg, g) za proizvodnju 1 kWh električne energije, npr., g/kWh ili kg/kWh. Stepenn korisnosti se izražava kod donje toplotne vrijednosti goriva H_d^r (DTV, LHV).



Sl. 1. Stepenn korisnosti elektrana za različite energetske tehnologije, [1].

U SAD-u se za parne procese stepenn korisnosti izražava kod gornje toplotne vrijednosti goriva H_g^r (GTV, HHV), a za cikluse gasnih turbina kod DTV. Razlikuje se ukupni (bruto), neto i godišnji (pogonski) stepenn korisnosti. Ukupni stepenn korisnosti se dobije kada se ukupna proizvodnja električne energije na generatoru podijeli sa utrošenom toplotom goriva u kotlu elektrane, dok se kod neto stepena korisnosti računa električna energija na pragu elektrane (ukupna umanjena za sopstvenu potrošnju). Godišnji ili pogonski stepenn korisnosti se izračunava dijeljenjem godišnje proizvodnje električne energije (bruto ili neto) sa godišnjom potrošnjom energije goriva. Neto stepenn korisnosti elektrane na uglal može se definisati izrazom:

$$\eta_{TE} = \eta_{RC} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_k \cdot \eta_{s.p.}, \quad (2)$$

pri čemu su oznake i približne vrijednosti stepena korisnosti za temperaturu pare na ulazu u savremenu turbinu od 580 °C:

- $\eta_{RC} = \eta_c \cdot \eta_{ex} = 0,65 \cdot 0,94 = 0,61$ ili 61% - Renkinov stepenn korisnosti kod $\eta_c = 65\%$ i sadržaj eksergije u pari kod približno 94%;
- $\eta_t = 93\%$ - stepenn korisnosti savremenih parnih turbina;
- $\eta_g = 98\%$ - stepenn korisnosti savremenih električnih generatora;
- $\eta_k = 91\%$ - stepenn korisnosti savremenih kotlova;
- $\eta_{s.p.} = 93\%$ - stepenn korisnosti pomoćne opreme TE (sopstvena potrošnja oko 7%).

Neto stepenn korisnosti savremene elektrane na uglal sa unaprijeđenom klasičnom tehnologijom iznosio bi $\eta_{TE}^n = 61\% \times 93\% \times 98\% \times 91\% \times 93\% = 47\%$. Takav stepenn korisnosti ima danska termoelektrana na ugljeni prah kamenog uglja Nordjylland 3 snage 400 MW, puštena u rad 1998. godine sa dva međupregrijanja i sljedećim parametrima pare: 290 bar / 580 °C / 580 °C / 580 °C, [2]. Naravno, kod temperature pare na ulazu u turbinu od 700 °C, Renkinov stepenn korisnosti bi iznosio 65,2%, a neto stepenn korisnosti TE pod istim ostalim uslovima bio bi 50,3%. Povećanje energetske efikasnosti u svim zemljama svijeta je strateški cilj, ali teška su vremena za značajnije povećanje te efikasnosti, pa i kod nas. U današnje vrijeme na globalnom nivou dominiraju tri pitanja, vezana za politiku energetske efikasnosti: globalna finansijska kriza, zatim energetska sigurnost i pouzdanost snabdijevanja energijom, kao i problem klimatskih promjena.

Energetska efikasnost je sastavni dio razvojnih smjernica svih sektora energetskog sistema. Ipak, kada se govori o energetske efikasnosti najčešće se misli na mjere kojima se smanjuje potrošnja energije u sektorima neposredne potrošnje, tj. u zgradarstvu (zgrade stambene i nestambene namjene), transportu i industriji. Inače, energetska efikasnost u zgradarstvu je područje koje ima najveći potencijal za smanjenje ukupne potrošnje energije. Efikasna realizacija niza mjera kojima se poboljšava energetska efikasnost snažno će uticati na ekonomiju energije i smanjenje emisije CO₂ uz najniže troškove. Prema procjenama Međunarodne agencije za energiju (IEA), realizacija predloženih niza mjera na globalnom nivou, moguće bi bilo do 2030. godine smanjiti emisiju CO₂ za približno 8,2 mlrd t CO₂/godišnje, što je ekvivalentno 1/5 emisije CO₂ povezanom sa potrebama energije u globalnom scenariju za 2030. godinu

(www.iea.org/russian/workshops.html). Kogeneracija ili često korišćen izraz kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije (na njemačkom *Blockheizkraftwerke* - *BHKW*, odnosno na engleskom *Combined Heat and Power* - *CHP*) predstavlja proizvodnju električne energije sa istovremenim korišćenjem otpadne toplote, koja se inače gubi u industrijskim procesima. Principi kogeneracije poznati su već duže vrijeme, a tehnologija se poboljšava i razvija već godinama. Danas, moderni kogeneracioni sistemi postižu efikasnost i do 90%. Kogeneracija nudi veliku fleksibilnost; najčešće postoji kombinacija postrojenja i goriva koja zadovoljava većinu individualnih zahteva. Kogeneracija koristi otpadnu toplotu, koja uvijek nastaje prilikom dobijanja električne energije, čime se sprečava njeno ispuštanje u atmosferu. Prilikom konvencionalnih načina dobijanja električne energije, gotovo *dvije trećine* energetskeg inputa se gubi na ovaj način. Kao što je to u uvodu već rečeno, kogeneracija može da iskoristi većinu te (inače bačene) toplotne energije, čime se dobija znatno bolja iskorišćenost goriva i značajne uštede, što sve rezultira u energetskeg uštedi od 20 do 40%. Kombinovanje kogeneracionog postrojenja sa absorpcionim rashladnim sistemom omogućava iskorišćenje sezonskih viškova toplotne energije za hlađenje. Topla voda iz sistema za hlađenje kogeneracionog postrojenja služi kao pokretačka energija za absorpcione čilere. Vrući izduvni gas se može iskoristiti kao energetskeg izvor za visoko efikasne parne čilere. Na ovaj način se više od 80% termičke energije kogeneracionog postrojenja može pretvoriti u rashladnu vodu. Na ovaj način se znatno povećava ukupna efikasnost kogeneracionog postrojenja.

2.1. Modeli odlučivanja u energetici

Postojanje teškoća u vrednovanju određenih ekoloških i društvenih uticaja razvoja novih energetskeg objekata i veliki broj mogućnosti za izbor njihove lokacije zahtjeva primjenu metode višekriterijumske analize, a ne samo primjenu konvencionalne metode analize troškova i dobiti. Zbog osiguranja većeg obima prihvatljivih alternativa izbora lokacije, od posebne važnosti je identifikacija mogućih kriterijuma (eliminacioni i kriterijuma za poređenje), koji u osnovi moraju zadovoljavati elemente održivog razvoja - ekonomiju, životnu sredinu i društvo. Korišćenje metoda višekriterijalnog odlučivanja treba da obezbijedi pomoć donosiocima odluka u slučaju kada postoji veliki izbor alternativa za problem koji rješava. Pri tome, proces odlučivanja i izbora najoptimalnijeg rješenja prilikom projektovanja energetskeg postrojenja je višekriterijumskog tipa, pri čemu je potrebno u obzir uzeti veći broj faktora i interesa različitih grupacija i nivoa društvene zajednice (često i međusobno suprotstavljenih), uz učešće više interesnih grupa u procesu odlučivanja. Postavlja se pitanje kako pomiriti sve ove kriterijume, sa aspekta različitih preferencija i često međusobno suprotstavljenih interesa. Prilikom izbora varijantnih rješenja kod energetskeg postrojenja, idealan slučaj bi odgovarao situaciji kod koje bi se svi kriterijumi u problemu mogli klasifikovati u dvije kategorije: profitnu kategoriju, gdje se kriterijumi maksimiziraju, pri čemu kriterijum ne mora nužno biti profitni i troškovnu kategoriju, gdje se kriterijumi minimiziraju. Idealno rješenje bilo bi ono koje omogućava maksimiziranje svih profitnih i minimiziranje svih troškovnih kriterijuma, što je u praksi

veoma teško postići. Kako idealno rješenje nije moguće postići, potrebno je tražiti tzv. nedominiranih rješenja (rješenje je dominirano ako postoji bar jedno drugačije rješenje, koje je bar po jednom atributu bolje od posmatranog, uz uslov da je po drugim atributima bar jednako). Treću kategoriju čine tzv. zadovoljavajuća rješenja, kao redukovani podskup mogućih rješenja. Konačno, postoje poželjna rješenja koja su nedominirana, a najbolje zadovoljavaju očekivanja donosioca odluke. U principu razlikuju se dvije grupe metoda - jednostavne nekompenzacione metode za jednostavnija odlučivanja i preciznije kompenzacione metode za složenija odlučivanja.

3. SISTEMI ZA KOGENERACIJU

Kogeneracija, kao termodinamički uzastopna proizvodnja dva ili više korisnih oblika energije iz jednog primarnog energetskeg izvora (kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije u jednom postrojenju), najčešće se klasifikuje u određene grupe prema određenim i unaprijed definisanim kriterijumima. Zavisno od toga da li je proizvodnja električne ili toplotne energije primarna, razlikuju se *elektroprivredna* (primarna je proizvodnja električne energije) i *industrijska* kogeneracija, zajedno sa kogeneracijom u toplanama, gdje je primarna proizvodnja toplotne, a sekundarna proizvodnja električne energije. Kada se radi o elektroprivrednoj kogeneraciji, električna energija se posredstvom elektroprivrednih sistema (prenosnog i distributivnih) isporučuje krajnjim korisnicima, a posredstvom toplifikacionih dalekovoda, korisnicima toplotne energije (to su najčešće velike industrije i komunalni sistemi za rejonsko-daljinsko grejanje). U slučaju industrijske kogeneracije, toplotna i električna energija se prvenstveno koriste u tehnološkom procesu dotične industrije (proizvodnja papira, bojenje tekstilnih tkanina, štavljenje kože i sl.), dok se viškovi energije mogu slobodno prodavati i drugim korisnicima na energetskeg tržištu. Najčešća klasifikacija kogeneracije je prema *instalisanog električnoj snazi*, zatim prema redoslijedu korišćenja energije i prema prihvaćenoj šemi rada. U slučaju kada se proizvode tri različita oblika energije (električna, toplotna i rashladna energija) radi se o tzv. trigenerativnim postrojenjima. Na osnovu *redoslijeda korišćenja energije*, sistemi kogeneracije se klasificiraju u postrojenja sa vršnim (topping, gornjim) ili bazičnim (bottoming, donjim) ciklusom. Kogeneracija sa vršnim ciklusom pogodna je kod postrojenja sa preradom celuloze, zatim postrojenja za proizvodnju hrane, tekstilnoj industriji, daljinskom grijanju, kao i kod kliničkih i univerzitetskih centara. Kod postrojenja sa donjim ciklusom proizvodi se termalna energija visoke temperature, dok se otpadna toplota koristi za proizvodnju električne energije, korišćenjem kotla ulizatora i adekvatnog pripadajućeg turbogeneratorskeg postrojenja. Pogodni su za korišćenje u proizvodnim procesima koji zahtijevaju toplotnu energiju sa visokim temperaturama, a odbacuju toplotu na niskim temperaturama (peći i sušare). Ova postrojenja se često sreću u industrijama cementa, petrohemiji, čeličanama i sl. Po osnovu *šeme rada*, sistemi kogeneracije se mogu podijeliti na: sisteme za pokrivanje baznog električnog opterećenja, na osnovu poznavanja krive potreba konzuma, zatim na sisteme za pokrivanje baznog toplotnog opterećenja, kao i na sisteme za praćenje električnog odnosno sisteme za praćenje toplotnog

opterećenja (tzv. "sistem za sebe"), gdje se sistemi kogeneracije projektuju s ciljem pokrivanja ukupnih potreba za električnom odnosno toplotnom energijom na razmatranom lokalitetu. U slučaju većih potreba za toplotnom energijom, kod sistema za praćenje električnog opterećenja, koriste se pomoćni kotlovi, dok se u slučaju sistema za praćenje toplotnog opterećenja nabavka nedostajuće električne energije najčešće obavlja kupovinom od nadležne distribucije na tom lokalitetu. Ukoliko se kao kriterijum koristi *namjena*, kogeneracijska postrojenja se dijele na industrijsku kogeneraciju (temperature više od 140 °C), zatim kogeneraciju u zgradarstvu (temperature od 40 do 140 °C, specifični slučajevi: javne toplane, mikrokogeneracija), kao i kogeneraciju u poljoprivredi (temperature od 15 do 40 °C) , [3]. Prema *korišćenoj tehnologiji*, razlikuju se kombinovani procesi gasne turbine sa korišćenjem otpadne toplote, protivpritisne parne turbine, kondenzacione parne turbine sa regulisanim i neregulisanim oduzimanjima pare, gasne turbine sa korišćenjem otpadne toplote, SUS motore, mikroturbine, Stirlingove motore, parne mašine, organske Rankinove procese, kao i sve ostale vrste tehnologija ili sagorijevanja a koje predstavljaju istovremenu proizvodnju toplotne i električne (mehaničke) energije u jednom procesu. Sa aspekta *veličine instalisane električne snage*, razlikuju se: mikro-kogeneracija (kogeneracijska jedinica instalisane snage manje od 50 kW), mini-kogeneracija (kogeneracijska jedinica instalisane snage manje od 1 MW), mala-kogeneracija (kogeneracijska jedinica instalisane snage manje od 5 (10) MW), kao i velika kogeneracijska postrojenja snage preko 5 (10) MW. Prema Direktivi 2004/8/EC, postoje sljedeće četiri osnovne kategorije primjene kogeneracije: mala kogeneraciona postrojenja, koja se uz proizvodnju električne energije obično koriste za grejanje vode i zagrevanje prostora u zgradama (ona se baziraju na stabilnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem sa električnim paljenjem), velika kogeneraciona postrojenja, obično pridružena proizvodnji pare u velikim zgradama, koja se baziraju na SUS motorima sa kompresionim paljenjem, parnim ili gasnim turbinama, zatim veliki kogeneracioni sistemi za daljinsko grejanje („District Heating”) u okolini termoelektrana ili velikih postrojenja za spaljivanje otpada, sa rekuperatorima, koji snabdevaju toplotom lokalnu mrežu za grejanje, kao i kogeneraciona postrojenja, koja se snabdevaju primarnom energijom iz obnovljivih izvora, malih ili velikih kapaciteta. Adekvatnost primene kogeneracije prvenstveno se vidi za slučaj elektroprivredne kogeneracije, u velikim termoelektranama na fosilna goriva (ugalj, derivati nafte, prirodni gas), lociranim u blizini velikih gradova, gde je posebno izražena potreba za grejanjem, koje se može organizovati daljinski, ili nekih industrija kojima je neophodna tehnološka para. To su industrije celuloze i papira, hemijska, tekstilna, metaloprerađivačka i prehrambena industrija, industrija građevinskih materijala itd., kao i veliki javni i komercijalni kompleksi, koji iskazuju značajne potrebe za toplotnom energijom (tržni, rekreativni, zdravstveni i sportski centri, kasarne i drugi vojni objekti, aerodromi, turističko-rekreativni kompleksi itd.). U Evropi je u pogonu više hiljada kogeneracionih postrojenja. Smatrajući nedovoljnim učešće kogeneracije u ukupnoj proizvodnji električne energije u zemljama Evropske Unije od 9 %, Evropska komisija je 1997. godine postavila kao cilj da to

učešće u 2010. godini poraste na 18 %. Teoretski posmatrano, skoro svaka vrsta goriva se može koristiti za kogenerativne procese. U praksi se najčešće koriste fosilna goriva (najčešće prirodni gas), kako iz ekonomskih razloga tako i sa ekološkog aspekta. Čvrsti otpad, neki industrijski gasovi i biomasa imaju tendenciju povećanja upotrebe, posebno ukoliko se riješe pitanja za obavezujuće njihovo sakupljanje i zbrinjavanje. Pretpostavlja se da će njihova primjena uskoro dostići današnji nivo korišćenja prirodnog gasa. Kogenerativna postrojenja mogu biti projektovana da koriste više od jednog goriva, u nekim slučajevima čak i do četiri, s ciljem obezbjeđenja mogućnosti dodatne optimizacije izbora goriva po ekonomskom i ekološkom kriteriju. Upotreba goriva niskog kvalitetnog nivoa rezultuje smanjenim troškovima za gorivo, ali sa druge strane su prisutni znatni dodatni troškovi za rukovanje sa njima, kao i proces kontrolisanja samog sagorijevanja, uz ispunjenje propisanih ekoloških normativa. U opštem slučaju, goriva mogu biti tečna, gasovita i čvrsta. S druge strane, ona mogu biti komercijalna (fosilna goriva i derivati nafte) i otpadna (nusprodukti nekih industrijskih procesa). Obnovljivi izvori energije kao goriva nisu tretirani komercijalno, jer njihova ekonomska isplativost primjene omogućena je samo na specifičnim lokacijama. Izbor goriva najčešće se svodi na razmatranje više ekonomski prihvatljivih solucija, s tim da se praktično bira između jedne od vrsta fosilnih goriva. Važi generalno pravilo da prirodni gas (u slučaju dostupnosti i konkurentnosti i ekonomske održivosti njegove cijene nabavke), zbog svojih prednosti, predstavlja osnovni izbor goriva.

U okviru tabele 1 dat je uopšteni prikaz osnovnih karakteristika kogeneracijskih postrojenja i njihove najčešće primjene. Kao primjer sve aktuelnije primjene kogeneracije, izdvaja se korišćenje kogeneracije u staklenicima. Kroz hemijski proces fotosinteze, biljke sa hlorofilom kao katalizatorom preuzimaju CO₂ iz vazduha i iz njega stvaraju ugljenik, koji je izvor rasta biljke. U prirodnom okruženju se po pravilu nalazi oko 350 ppm CO₂ (optimalni udio CO₂ koji biljke mogu konzumirati je oko 800-1.000 ppm). Zahvaljujući obogaćenju atmosfere u staklenicima na ovaj nivo sadržaja CO₂, na prirodan i ekološki način rast biljaka će se povećati i do 40% (tzv. tehnika "CO₂ đubrenja"). Uobičajeni način obogaćenja atmosfere sa CO₂ u staklenicima se obavlja sagorijevanjem zemnog gasa u CO₂-gorionicima. Kao alternativa ovom procesu, može se uz odgovarajuću pripremu koristiti izduvni gasovi iz gasnih motora. Nezavisno od metode dobijanja CO₂ nastaje oko 0,2 kg CO₂ na svaki kWh dovedene energije gasa. Koncentracija CO₂ u izduvnom gasu gasnog motora je 5 do 6 vol. %. Ubrizgavanjem karbamida, u SCR katalizatoru (Selective Catalytic Reduction) se azotni oksidi (NO_x) iz izduvnog gasa redukuju za oko 90%, a naknadno postavljeni oksidacioni katalizator smanjuje emisije CO i HC. U dvostepenom izmjenjivaču toplote izduvni gas se hladi na 50 do 55°C i pomoću duvaljke nerazrijeđen ili razrijeđen transportuje u staklenik, preko perforiranih plastičnih cijevi. Radi zaštite biljaka kontinualno se mjere emisije NO_x prečišćenog izduvnog gasa i u skladu sa njima reguliše se ubrizgavana količina karbamida. U slučaju eventualnih nedostataka u sistemu prečišćavanja izduvnog gasa, isti se usmjerava ka dimnjaku. Ukupni stepen korisnog dejstva ovakvog koncepta primjene kogeneracije je oko 95%.

Ovakvo postrojenje donosi značajnijem porastu prinosa u staklenicima, pri čemu se plasman viška električne energije realizuje u elektrodistributivnu mrežu. Takođe se vrši smanjenje izdataka za plaćanje vršnog opterećenja (maxigraf) i izbjegava nepotrebna investicija u dizel agregate za

proizvodnju nužne struje. Toplotna energija se koristi za grijanje staklenika i/ili eksternih potrošača (naselje, banja, topli vazduh za sušare, i sl.), dok se postojeći kotlovi koriste samo kao rezervni ili vršni (minimalni broj pogonskih sati).

Tabela 1. Prikaz osnovnih karakteristika CHP postrojenja i njihove primjene, [1].

Vrsta agregata i gorivo	Električna snaga, MWe	Energetska efikasnost, %		Raspoloživa toplotna energija, °C	Najčešća primjena
		Električna	Toplotna		
Parna turbina, bilo koje gorivo	0,500-500	7-20	60-80	120-400	korišćenje biomase, područno (ostrvsko) grijanje i industrija
Gasna turbina, gasovito i tečno gorivo	0,250-50	25-42	65-87	120-500	industrija, područno (ostrvsko) grijanje
Kombinovani ciklus, gasovito i tečno gorivo	3-300	35-55	73-90	1220-400	industrija područno (ostrvsko) grijanje
Gasni i dizel motor, gasovito i tečno gorivo	0,003-20	25-45	65-92	80-120	GVK sistemi, prehrambena i tekstilna industrija, staklenička proizvodnja
Mikro turbina, gasovito i tečno gorivo	0,005-0,3	15-30	60-85	100-400	GVK sistemi, procesi sušenja
Goriva ćelija, gasovito i tečno gorivo	0,003-3	cca 37-50	cca 85-90	80-100	GVK sistemi
Stirling motor, bilo koje gorivo	0,003-1,5	cca 40	65-85	80-120	GVK sistemi

4. SPECIFIČNOSTI I OGRANIČENJA PRIMJENE KOGENERATIVNIH SISTEMA

4.1. Definicije i ograničenja

Kako je već rečeno, kogeneracija predstavlja istovremenu proizvodnju električne i toplotne energije s ciljem smanjenja evidentnih gubitaka toplote u okolinu, uočenih pri radu klasičnih konvencionalnih postrojenja za odvojenu proizvodnju toplotne i električne energije (i tehnološke pare). Jedini uslov (ograničenje) kod primjene ovih postrojenja predstavlja zahtjev sa osiguranjem potrošača električne i toplotne energije. Sistemi kogeneracije obuhvataju tri oblasti: preduzeća komunalne javne kogeneracije (snabdijevanje sistema daljinskog grijanja i/ili hlađenja), industrijsku kogeneraciju (rafinerije nafte, rafinerije ulja i maziva, čelik, proizvodnja keramike, cementare, hemijska procesna industrija, proizvodnja papira, predionice tekstila, proizvodnja hrane i bezalkoholnih pića) i komercijalno-institucionalnu kogeneraciju (institucije sa kontinuiranim radom: hoteli, bolnice, univerzitetski kampusi i sl.). Kogeneracijska postrojenja su vrlo efikasna tehnologija, samo u slučaju kada postoji stvarno tržište za električnu i toplotnu energiju (regionalno tržište za električnu energiju i lokalno tržište za toplotnu energiju).

Po prirodi tehnološkog procesa, kombinovano postrojenje za proizvodnju električne i toplotne energije treba da bude energetska efikasno, sa značajnom uštedom primarne energije pri njenoj transformaciji u toplotnu i električnu energiju. To bi sa svoje strane uslovalo niže troškove u proizvodnji energije i dalo doprinos relativnom smanjenju emisije štetnih materija, a posebno gasova sa efektom staklene bašte. S druge strane, ovakva postrojenja imaju dobru šansu da kroz primjenu Direktive 2004/8/EC obezbijede povoljno vrednovanje električne energije u spregnutom procesu proizvodnje toplotne i električne energije ("zelena" energija),

te omogućiti korišćenje stimulativnih mjera pri finansiranju izgradnje, kao i beneficije pri plasmanu takve energije na energetska tržišta. Ovo bi moglo da stvori dobre uslove za prodor na energetska tržišta, bez obzira na relativno male količine energije i jaku konkurenciju na tržištu.

4.2 Tipovi i specifičnosti

Kogeneracija definisana kao kaskadna proizvodnja (generisanje) dva korisna oblika energije (električne i toplotne) iz jednog izvora primarne energije (mehanička ili toplotna energija), pri čemu se mehanička energija koristi kao pogon generatora za proizvodnju električne energije ili za pogon neke druge energetske mašine (motor, kompresor, pumpa ili ventilator), dok se toplotna energija može koristiti direktno za neki proces ili indirektno za proizvodnju pare, vrele (tope) vode, toplog vazduha ili ohlađene vode (sistemi za grijanje i klimatizaciju stambenih ili poslovnih objekata). Dakle, kogeneracija pokriva širok spektar tehnologija za namjenu u različitim privrednim oblastima. Izdvajaju se sljedeći tipovi kogenerativnih sistema:

- kogenerativni sistemi zasnovani na primjeni parne (protivpritisne ili kondenzacione sa oduzimanjima) turbine ili parno-turbinski kogenerativni sistemi;
- kogenerativni sistemi zasnovani na primjeni gasne (sa i bez dodatnim loženjem) turbine ili gasno-turbinski kogenerativni sistemi;
- kogenerativni sistemi zasnovani na primjeni parne i gasne (kondenzaciona i/ili oduzimno kondenzaciona, protupritisna) turbine ili parnogasno-turbinski kogenerativni sistemi;
- kogenerativni sistemi zasnovani na primjeni motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (sa i bez dodatnim loženjem), dizel ili gasnog motora ili motorni kogenerativni sistemi;
- kogenerativni sistem sa gorivim ćelijama;

- f) kogenerativni sistemi sa magnetno - hidrodinamičkim (MHD) generatorom;
- g) integrisani kogeneracijski sistemi.

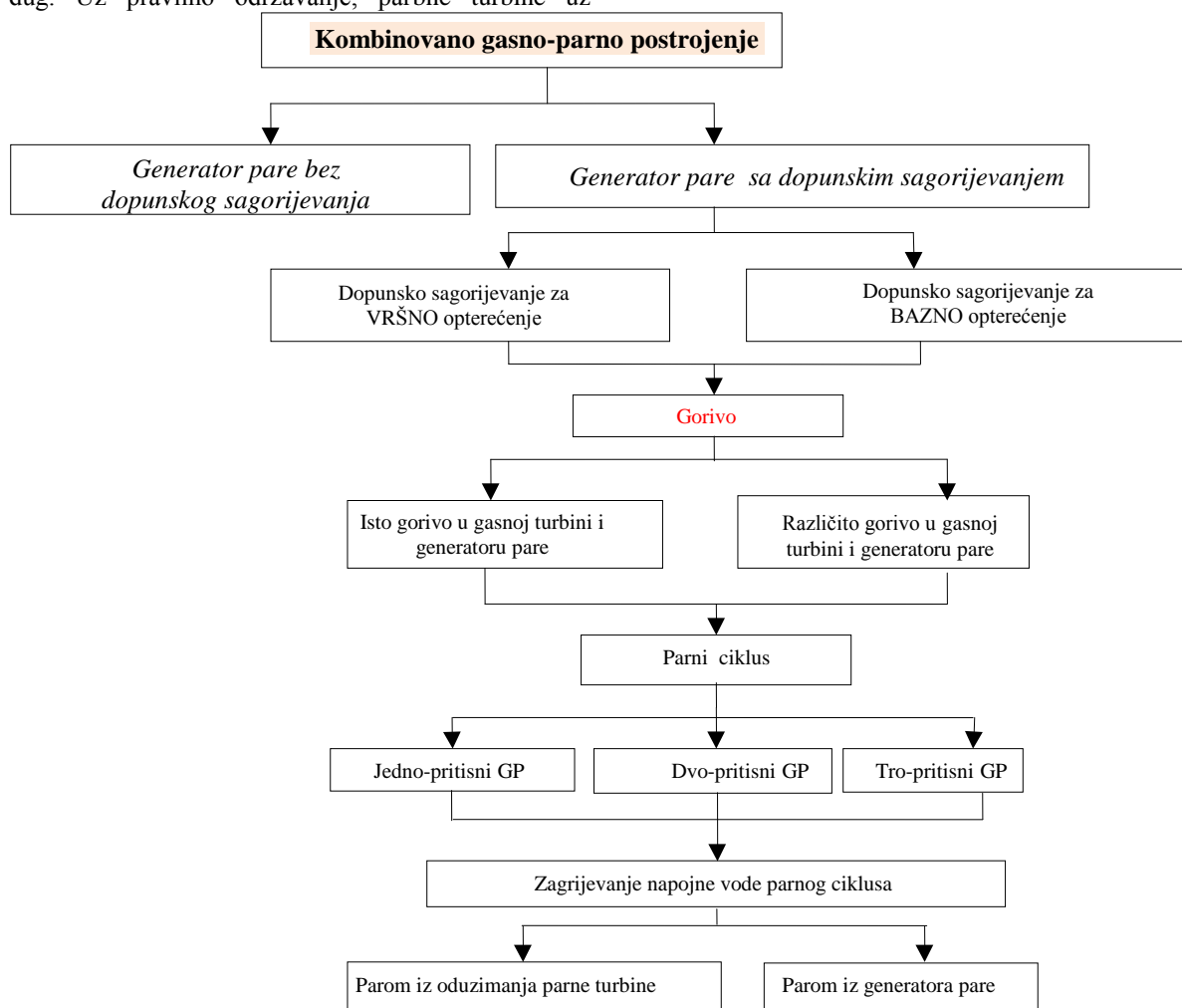
Ponekad se kao posebna grupa izdvajaju i kogenerativni sistemi sa mikroturbinama, odnosno kogenerativni sistemi sa alternativnim (proces sa parnom mašinom, ORC procesi) i inovativnim (gorive ćelije, stirling mašine, vijčane parne mašine, ciklus sa turbinom na vrelu vazduh, ciklus sa inverznom gasnom turbinom) procesima. Svaki od prethodno datih tipova se dalje dijeli u nekoliko podtipova postrojenja za kogenerativnu proizvodnju električne i toplotne energije.

Sistemi kogeneracije sa parnom turbinom su uglavnom zasnovani na korištenju protupritisne parne i oduzimno-kondenzacione turbine, zavisno od količina pare i toplotne energije, temperaturnog nivoa (kvalitet) toplotne energije i ekonomskim pokazateljima. U slučaju kada potrošač zahtijeva toplotnu energiju na dva temperaturna nivoa, sistem kogeneracije se sastoji od oduzimno-protupritisne turbine, dok se čisto kondenzacione parne turbine koriste na lokacijama gdje se sva otpadna toplota koristi isključivo za proizvodnju električne energije. U poređenju sa drugim primarnim pokretačima, najveća rednost parnih turbinama je njihova fleksibilnost u korištenju konvencionalnih (ugalj, nafta, prirodni gas) i alternativnih goriva (drvo, biomasa, produkti otpada i sl.). Takođe, životni vijek parnih turbin je vema dug. Uz pravilno održavanje, parne turbine uz

revitalizaciju dostižu i 50 godina eksploatacije. Svoju primjenu u kogenerativnim sistemima našle su tipske jedinice snage od 100 kW pa do i preko 250 MW.

Sistem kogeneracije sa gasnom turbinom koristi se za proizvodnju dijela ili ukupne potrebne električne energije na lokaciji, dok se energija sa dimnog otsisa može dalje koristiti za potrebe grijanja i/ili hlađenja. Kao gorivo najčešće se koristi prirodni gas (moguće koristiti i druga goriva, kao što su lož ulje ili diesel gorivo). Moderne gasne turbine, koje se koriste u kogenerativnim ciklusima, uz pravilno održavanje i korišćenje, mogu postići i 25.000 do 50.000 radnih sati. Tipičan opseg snaga gasnih turbina u kogeneracijama se kreće od 0,5 do 250 MW. Veoma intenzivan razvoj kogeneracije sa gasnim turbinama posljedica je sve veće dostupnosti prirodnog gasa, brzog razvoja tehnologije, smanjenja troškova gradnje (mogućnost modularne izvedbe), kao i povoljnosti u vezi zaštite životne sredine. Gasne turbine imaju i kraći period pokretanja, a fleksibilnije su za rad sa prekidima.

U nastojanju da se poveća efikasnost gasno turbinskih postrojenja, kao i da se zadovolji veća potražnja za električnom energijom na jednom lokalitetu, u praksi se vrlo često koristi *kombinovani sistem kogeneracije sa izgradnjom kombinovanih gasno-parnih turbina*, slika 2.



Sl. 2. Klasifikacija kombinovanih gasno-parnih postrojenja.

Kombinovanim parno-gasnim (ili gasno-parnim) postrojenjima nazivaju se postrojenja u kojima se istovremeno koriste dva radna fluida: voda-para, koja mijenja agregatno stanje i gas koji ne mijenja stanje. Veliki broj različitih tipova kombinovanih postrojenja može da se razvrsta u dvije principijelne grupe: kombinovana postrojenja sa razdvojenim konturama radnih fluida (gasnoturbinska i parnoturbinska i kontaktna (miješana) gasnoparna postrojenja sa gasnoparnim turbinama u kojima se koristi smjesa produkata sagorijevanja organskog goriva sa vodenom parom. Za razvoj energetike najperspektivnija kombinovana postrojenja su parnogasna postrojenja sa kotlovima, u kojima vlada nadpritisak u ložištu i gasnom traktu kotla.

Kogenerativni sistemi sa dizel, klipnim motorima (motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem) i gasnim motorima imaju visoke stepene efikasnosti proizvodnje električne energije u odnosu na druge primarne pogonske mašine. Karakteriše ih veća popularnost pri korištenju u malim sistemima potrošnje energije, posebno kada se zahtijeva veća potrošnja električne u odnosu na toplotnu energiju, kao i na mjestima gdje je zahtijeva termički nivo toplote nizak (para niskog pritiska, topla voda i sl.). Elementi kogenerativnih sistema sa gasnim motorom su motor, generator, sistem za iskorišćenje otpadne toplotne energije i upravljačko-kontrolni sistemi. U kogenerativnim postrojenjima motori imaju pokretačku ulogu u odnosu na generatore, odnosno u energetskom smislu, da putem konverzije hemijske energije goriva u mehaničku energiju obrtanja izvrše odgovarajući rad. Koriste se dva izvora povrata toplotne energije - izduvni gasovi na visokoj temperaturi i rashladna voda iz košuljice motora na niskom temperaturnom nivou. Veličina instalisane snage klipnih motora ide od nekoliko kilovata (10 i više) pa i do 5 MW za motore sa visokim brojem obrtaja. Umjesto dizel goriva, sve više se za pogon primarne mašine koriste destilati nafte ili prirodni gas. Primjena ovakvih sistema potvrdila je njihovu veliku pogodnost kod zahtjeva za pogonima sa velikim brojem prekida. Njihove performanse su u odnosu na gasne turbine manje osjetljivije na promjenu temperature spoljašnjeg vazduha. Gorivo, odnosno radni fluid koji predstavlja mješavinu goriva i vazduha sagorijeva, pri čemu se hemijska energija goriva pretvara u toplotnu energiju. Toplota koja se može iskoristiti je toplota izduvnih gasova, zatim toplota rashladnog sistema motora (sistem vodenog hlađenja, sistem za hlađenje sredstva za podmazivanje i hladnjaka nakon kompresije smješe kod turboprehranjivanih motora), kao i toplota spoljnih površina motora. Nizak odnos snaga i cijene, mogućnost primjene različitih vrsta goriva, visoka operativnost, dugi servisni intervali i kratko vrijeme stajanja radi održavanja predstavljaju osnovne zahtjeve koji se postavljaju pred motore kogenerativnih postrojenja. Upotreba gasnih mašina kao stacionarnih izvora mehaničke i električne energije koncipirana je u vidu dijela postrojenja sa kogeneracijom. Kako stacionarna postrojenja za proizvodnju električne i toplotne energije zahtijevaju znatno duži vijek trajanja u kontinuiranoj eksploataciji, nego što je to kod motora sa unutrašnjim sagorijevanjem za pogon saobraćajnih sredstava (kompaktnost mašine odlučujuće važna), danas su razvijeni sporohodi motori SUS sa 1.500 obrtaja u minuti (automobilski su sa preko 5.000). Pored toga, došlo je i do sniženja temperature u procesu sagorijevanja, čime je vijek kontinualnog rada produžen na preko 100.000 sati (uz

normalno održavanje). Snižavanje temperature sagorijevanja donosi značajno smanjenje udjela štetnih sastojaka u izduvnim gasovima (posebno azotni oksidi). Uz elektronsku kontrolu procesa sagorijevanja i ostalih procesa, gasni motori zadovoljavaju sve zahtjeve vezane za izgradnju i eksploataciju kogenerativnih pogona. Stacionarna kogenerativna postrojenja ekonomski podnose i tečna i gasovita goriva, ali su značajno povoljnija gasovita, naročito kod već razvijene mreže gasovoda. Uobičajno je da se pod *mikroturbinama* podrazumijevaju male gasne turbine za isporučene snage od 5 do 300 kW. Karakteriše ih velika fleksibilnost u pogledu korišćenja pogonskog goriva (prirodni gas, tečni naftni derivati, biogas, deponijski gas, alkohol i sl.). Zbog malog stepena iskorišćenja, u slučaju proizvodnje samo električne energije (mali stepen kompresije 3-5), najčešće se koriste kao sastavni dio kogeneracijskog postrojenja. Kao takve, one su i obuhvaćene Direktivom 2004/8/EC. S obzirom da koriste rekuperator za povrat toplote izduvnih gasova sagorijevanja, mikroturbine su daleko efikasnije u odnosu na druge gasne turbine (25-30%). Rekuperator, snižavajući temperaturu izduvnih gasova na temperaturu ispod vrijednosti pri kojoj nastaju neki azotni oksidi, ima i svoju ekološku prihvatljivost u odnosu na druge gasne turbine. Ovim se ukupan stepen iskorišćenja primarne energije sadržane u gorivu diže i do 70-90%. Mikroturbine se hlade vazduhom, a postoje i izvedbe sa tzv. vazduhom podmazivana ležišta, čime je eliminisana potreba za sistemima hlađenja vode i ulja za podmazivanje ležišta. Životni vijek ovih postrojenja je 40.000 do 80.000 h rada, uz adekvatno opsluživanje i održavanje tokom eksploatacije. Kod većine mikroturbina, broj obrtaja rotora se kreće iznad 100.000 o/min, pa je neophodan i pogon visokobrzinskog generatora. Izlaz iz generatora se pretvara na 50 ili 60 mHz. U opticaju su i rješenja sa dvoosovinskom turbinom za pogon rashladnih sistema (350 do 1.000 kW ili 100 do 350 tona leda dnevno).

Stepeni iskorišćenja *gorive ćelije* sa fosfornom kiselinom (PAFC- Phosporic Acid Fuel Cell), gorive ćelije sa tečnim karbonatom (MCFC- Molten Carbonate Fuel Cell), gorive ćelije sa čvrstim oksidom (SOFC- Solid Oxide Fuel Cell), kao i gorive ćelije sa membranskom razmjenom protona (PEMFC- Proton Exchange Membrane Fuel Cell), [4-5]. Gorive ćelije se u principu grupišu u tri sekcije: procesor goriva, snop gorivih ćelija za generisanje snage i kondicioner snage. Povećanje koncentracije vodonika vrši se transformacijom goriva u procesoru, odakle se gorivo obogaćeno vodonikom i kiseonikom iz vazduha se dalje vodi u sekciju za generisanje energije, gdje se proizvodi istosmjerna struja i korisna toplotna energija. Ova struja se dalje pretvara u naizmjeničnu struju u kondicioneru (transformatoru) energije. Zavisno od namjene bira se i tip gorivih ćelija za CHP postrojenje. Tako, gorive ćelije sa čvrstim oksidom su veoma pogodne za kombinovanu hibridnu proizvodnju električne energije sa gasnom turbinom.

4. RAZLOZI I TEŠKOĆE PRIMJENE KOGENERACIJE I PODSTICAJNE MJERE

Razlozi za sve veću primjenu kogeneracijskih sistema mogu se klasifikovati u nekoliko grupa:

- *Grupa I:* povećana efikasnost transformacije primarnog goriva i iskorišćenja utrošene primarne energije za istu proizvodnju toplotne i električne energije, što ima za

- posljedicu smanjene troškove i poboljšanje ekonomičnosti poslovanja proizvođača;
- *Grupa II:* mogućnost korišćenja otpadnih energetskih sirovina i biomase kao gorivo u kogeneracionom procesu, čime se poboljšava efektivnost u smanjenju troškova i potreba za velikim deponijama za njihovo odlaganje;
 - *Grupa III:* postizanje adekvatnih ušteda kod potrošača toplotne energije u industriji i domaćinstvima, uz jeftiniju njihovu isporuku;
 - *Grupa IV:* povoljna realizacija decentralizovane i distribuirane proizvodnje električne energije po pristupačnim proizvodnim cijenama, (izgradnja kapaciteta u blizini potrošača, izbjegavanje velikih investicija i gubitaka u prenosnoj i distributivnoj mreži, poboljšanje fleksibilnosti sistema i sl.);
 - *Grupa V:* povećanje lokalne, regionalne i opšte sigurnosti kroz decentralizovanu proizvodnju električne energije (smanjenje rizika prekida u snabdijevanju električnom i toplotnom energijom potrošača, izbjegavanje dijela gubitaka u prenosu od 2 do 3% na prenosnoj električnoj mreži i do 14% na distributivnoj električnoj mreži, smanjenje rizika od uvozne zavisnosti i sl.);
 - *Grupa VI:* diversifikacija i jačanje konkurencija na slobodnom tržištu električne i toplotne energije sa nezavisnim (*Independent Power Producers, IPP*) i neelektroprivrednim proizvođačima (*Non-Utility Generators, NUG*), što predstavlja osnovni koncept liberalizacije energetskog tržišta;
 - *Grupa VII:* povećanje zaposlenosti (razvoj kogeneracije otvarao nova radna mjesta);
 - *Grupa VIII:* bolji efekti zaštite životne sredine (smanjenje štetnih emisija ugljen-dioksida, sumpordioksida i azotnih oksida), pri čemu se najveće uštede postižu kod smanjenja emisije CO₂, kao i emisija SO₂ i NO_x;
 - *Grupa IX:* korišćenje jednog te istog goriva za istovremenu proizvodnju električne i toplotne energije (uštede zavise od razlike u cijeni između energije primarnog goriva i cijene električne energije koju kogeneraciona šema zamjenjuje, pri čemu korektno projektovan i dobro održavan kogeneracioni sistem u industriji uvijek obezbjeđuje bolju energetsku efikasnost nego što bi to dala konvencionalna postrojenja za odvojenu proizvodnju istih količina toplotne i električne energije, uz smanjenje potrošnje primarne energije i troškova);
 - *Grupa X:* kako profitabilnost industrijske kogeneracije u opštem slučaju predstavlja rezultat jeftine proizvodnje električne energije od produktivnog korišćenja otpadne toplote, prvi kriterijum uspješnosti predstavlja adekvatna potreba posmatrane grane industrije za toplotnom energijom (kogeneracija ima izgleda da bude ekonomična, ukoliko postoji ravnomjerna potreba za toplotom od min. 4 do 4.5 hiljada h u godini);
 - *Grupa XI:* raspored potreba za električnom energijom je takođe vrlo značajan (industrijska kogeneracija najprofitabilnije funkcioniše u periodima viših tarifa, tj. tokom dnevnih časova kada su prodajna i kupovna cijena proizvedenog kWh više, pri čemu sa tekućom cijenom goriva i važećim tarifama za kupovinu i prodaju

električne energije, na većini kogeneracionih postrojenja može se ostvariti vrijeme povraćaja investicija do 10 godina, dok se u ekonomsko-finansijskim analizama računa sa životnim vijekom kogeneracionih postrojenja od 20 do 25 godina, uz mogućnost dodatne revitalizacije, uz prateću rekonstrukciju i modernizaciju i produženje radnog vijeka za dodatnih 10 do 15 godina).

Bez obzira na prednosti koje ima kogeneracija u odnosu na odvojenu proizvodnju toplotne i električne energije, brži razvoj njenog korišćenja sprečava postojanje različitih barijera kako zbog ranijeg monopolističkog povlašćenog položaja elektroprivreda (zakonski onemogućena konkurencija neelektroprivrednih proizvođača električne energije, monopolistička organizacija tržišta električne energije, odsustvo prava za pristup na mrežu neelektroprivrednih proizvođača električne energije, tehničke barijere i skupa uslovljavanja i dugo vrijeme realizacije). Potencijal za korišćenje kogeneracije kao mjere za uštedu energije je sada nedovoljno definisan, a samim tim i neiskorišćen u Republici Srpskoj. Promovisanje visoko-efikasne kogeneracije na bazi potražnje korisne toplote je prioritet, s obzirom na potencijalne koristi od kogeneracije u pogledu uštede primarne energije, izbjegavanje gubitaka u mreži i smanjenja emisija (posebno gasova staklene bašte). Pored toga, efikasno korišćenje energije dobijene kogeneracijom može takođe da pozitivno doprinese sigurnosti snabdijevanja električnom energijom i konkurentnosti Republike Srpske, a samim tim i BiH u cjelini. Stoga je neophodno preduzeti mjere kako bi se obezbijedilo bolje eksploitanje ovog potencijala u okviru internog energetskog tržišta (EES Republike Srpske).

Za uspješno prognoziranje stvarne primjene kogenerativnih tehnologija neophodno je poznavanje realnih kapaciteta svih relevantnih potrošača električne energije i prirodnog gasa, koji se sada koristi za transformaciju u potrebnu toplotnu energiju. Takve podatke ne možemo potpuno sigurno sagledati za svako pojedinačno preduzeće za narednih nekoliko godina, ali bi se mogli dovoljno tačno predvidjeti zbirni bilansi za Republiku Srpsku. Postoji nekoliko razloga za sadašnju relativno nisku zastupljenost kogeneracije u Republici Srpskoj, a i u BiH u cjelini, [6]. Monopoli nacionalnih proizvođača električne energije stvorili su nekonkurentne tržišne uslove za alternativne izvore energije. Osim toga, značajan problem je i snažna birokratija i procedure za dobijanje svih potrebnih saglasnosti i dozvola. Druge prepreke uključuju protivljenje nacionalnih proizvođača, koji ne žele da izgube svoje velike industrijske potrošače (koji mogu da izaberu da postave kogeneraciona postrojenja kao znatno isplativiju opciju u odnosu na kupovinu struje iz državne ED mreže), što se samo može riješiti kroz dalju liberalizaciju evropske električne mreže, koje će onda omogućiti pristup kogeneracionim postrojenjima ED mreži. Primjena sistema kombinovane proizvodnje toplotne i električne energije u industriji, ako se posmatra odnos troškova snabdijevanja energijom na uobičajen način i kogeneracijom, prate neki objektivni problemi koji onemogućuju praktičnu realizaciju. Neki od njih su:

- Nepostojanje distribucije prirodnog gasa na čitavoj teritoriji Republike Srpske, niti postoje objektivni nagovještaji da će to uskoro biti obezbijeđeni (projekat "SAVA" je već duži period u potpunom zastoju). Na tim

- mjestima veoma je zastupljena upotreba drugih izvora kao što su uglj, mazut, piljevina i dr.;
- Slaba mogućnost korišćenja otpadne toplotne energije (takvo stanje je uslovljeno zastarjelom proizvodnom tehnologijom). To su slučajevi gde je potrošnja električne energije znatno veća od potrošnje toplotne energije;
 - Industrijski kompleksi kao što su crna i obojena metalurgija, tekstilna industrija, proizvodnja i prerada papira i sl., nisu u pogonu ili rade sa smanjenim kapacitetima, što otežava uvođenje sistema kogeneracije (trigeneracije) u Republiku Srpsku;
 - Visoka još uvijek cijena.
- Da bi se proces značajnije ubrzao, kao prioritet se postavlja rješavanje pitanja usvajanja odluke o garantovanim cijenama i prioritetu otkupa električne energije iz kogenerativnih postrojenja od strane nadležnih elektroprivrednih distributivnih preduzeća. S druge strane, potrebno je paralelno sa usvajanjem odluke otklanjati preostale razloge koji usporavaju efikasnije korišćenje kogeneracije u Republici Srpskoj:
- donošenje stabilnijeg zakonodavstva (zakon o energetici, uspostava Agencije za energetsku efikasnost i sl.), sa jasnije ugrađenom obavezom otkupa električne energije i dovoljno visokom cijenom koja bi ih učinila konkurentnim sa konvencionalnim izvorima;
 - ukidanje ograničenja po snazi od 5 MW, koje je do sada bilo važeće kod obavezujućeg otkupa električne energije;
 - uspostavljanja mehanizma plaćanja od strane nadležnog distributivnog preduzeća, a s ciljem davanja potpore kogenerativnom proizvođaču;
 - uraditi i prilagoditi uslove za elektroenergetsko priključenje i dobijanje potrebnih saglasnosti za rad od nadležne Regulatorne komisije za električnu energiju;
 - riješiti metodologiju pristupa transportnom ili distributivnom gasnom sistemu (kompanije Gas Promet Pale i Sarajevo Gas, Istočno Sarajevo);
 - uraditi kampanju promocije kogeneracije sa promocijom postupaka za dobijanje koncesije, kao i potrebnih saglasnosti u smislu konačne realizacije ovih postrojenja (urbanistička saglasnost, ekološka saglasnost, građevinska dozvola, procedura tehničkih pregleda, dozvola za upotrebu);
 - podsticajne mehanizme razraditi po tzv. razredima kogeneracije, uspostavljenim na bazi instalisane termičke i električne snage (mikro, mala, srednja i velika kogeneracija), u funkciji potreba za toplotnom/električnom energijom, izabranom tehnologijom kogeneracije i mrežnih uslova za pojedine regione Republike Srpske;
 - regulisanje pitanja povlašćenih cijena za goriva za pogon kogeneracijskih postrojenja (posebno za tečna goriva i primjenu motora SUS u kogeneracijskim ciklusima);
 - rješavanje i uravnoteženje troškova za osigranjem tzv. pomoćne energije (penalizacija za ispade sa mreže (najčešće potiskivanje zbog reaktivnih snaga), elektroenergetska saglasnost, ugovaranje maksimalnih snaga nezavisno od dužine trajanja njihovog korišćenja (tzv. vršna obračunska snaga i sl.);
 - povlašćene i pojednostavljene uslove za priključak na mreži i prioritetni *dispatching* viškova električne energije

- proizvedene u sistemima kogeneracije od strane Nezavisnog operatora sistema (NOS BiH);
- utvrđivanje Pravilnika o vrednovanju doprinosa kogeneracijskog postrojenja u smanjenju vršnog opterećenja, izbjegnutim troškovima za gradnju novih energetskih kapaciteta, smanjenje prenosnih i distributivnih gubitaka u mreži, vrednovanje reaktivne snage, kao i vrednovanje zaštite životne sredine;
 - pojednostavljenje administrativne procedure za dobijanje potrebnih dozvola (posebno do nivoa srednjih kogeneracija) u smislu preciziranja krajnjih rokova za njihovo rješavanje, čijim istekom koncesionar praktično dobija traženu saglasnost;
 - finansiranje kogeneracije sredstvima iz fonda IRB, uz davanje fiskalnih i drugih podsticaja (za prihvatanje i brži razvoj primjene kogeneracije, veoma su važne podsticajne mjere kao podsticajni instrumenti koji ohrabruju primjenu ekonomski opravdanih mjera za smanjenje i/ili bolje iskorišćenje primarne energije energenata i poboljšanje energetske efikasnosti i nivoa zaštite životne sredine, kao što su: olakšice pri dobijanju dozvole za gradnju, smanjenje državnih taksa i poreza, dobijanje tzv. zelenih sertifikata, obezbjeđenje direktnih subvencija cijena proizvođaču, donošenje povoljnih tarifa za prodaju, a isto tako i za kupovinu rezervne i dopunske električne energije i snage koje bi uživali vlasnici kogeneracionih postrojenja u industriji, kao i druge olakšice, npr. za pristup na javnu električnu mrežu i sl.).
- Iako su prednosti uvođenja kogeneracijskih postrojenja poznate, neophodno je pristupiti određenoj promociji ovih postrojenja s ciljem uklanjanja određenih barijera. Osim tehničkih prepreka koje su ranije obrazložene, neophodno je dodatno i riješiti pitanje nedostatka finansijskih sredstava (IRB Republike Srpske, kredit EBRD u visini od 50 miliona EUR-a za mala i srednja preduzeća), zatim pitanja u vezi neadekvatne zakonske i institucionalne regulative (formiranje Agencije za energetsku efikasnost, koja bi dalje preuzela određene aktivnosti s ciljem donošenja svih potrebnih zakonskih akata), kao i veću promociju ovih sistema u Elektroprivrednim distributivnim preduzećima. Kako je razvoj kogeneracije u Republici Srpskoj, a samim tim i u BiH u cjelini i političko pitanje, neophodno je sprovesti određenu stručnu raspravu u smislu donošenja potrebne političke odluke o značaju uvođenja inovativnih tehnologija u proizvodnju električne i toplotne energije, što bi kao rezultat imalo povećanje energetske efikasnosti u cijeloj BiH. Postavljanjem korektnih odnosa između kogenerativnih preduzeća i nadležnih distributivnih preduzeća, stvaraju se novi odnosi za njihovu partnersku saradnju, kroz zajedničko djelovanje u promociji i razvoju kogeneracije, kao i zajedničkom učešću ("joint-venture"). U zapadno evropskim zemljama ubrzano se širi distribuirana (na lokacijama pojedinih firmi) proizvodnja električne energije. U ovom momentu tamo se ovako proizvodi više od 25 % od ukupne proizvodnje velikih TE. Glavni razlozi za to su povoljan odnos cijena električne energije i primarnog goriva (prirodnog gasa, uglja, mazuta i sl.), vrlo razvijena mreža gasovoda i elektroenergetska mreža, dobra efikasnost postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije, koja energiju goriva valorizuje i sa preko 90 %,

smanjen uticaj na životnu sredinu, kao i demonopolizacija u oblasti proizvodnje električne energije i stvaranje tržišne konkurencije. Dalja liberalizacija energetskeg tržišta BiH u okviru šire energetske zajednice Jugoistočne evrope, uz premještanje proizvodnje električne energije na mjesto njene potrošnje, stvorice i ostale neophodne pretpostavke za ubrzaniji razvoj kogenerativnih postrojenja.

Modulska isporuka kogenerativnih postrojenja sa relativno kratkim rokovima isporuke od oko pola do jedne godine, kompaktnost konstrukcije i relativno jednostavno priključenje na postojeće mreže električne i toplotne energije, omogućuje vrlo brzu i efikasnu integraciju u proces energetske proizvodnje. S druge strane, investiciona ulaganja, specificirana na jedinicu snage postrojenja su apsolutno konkurentna i najvećim u energetici, a "male" sopstvene potrebe ih dovode na nivo vrlo lako i brzo ostvarivih. Na taj način, dobro osmišljeno postrojenje za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije "manjih snaga" pri ekonomičnom odnosu cijena električne energije i primarnog goriva može donijeti značajne finansijske uštede tokom jedne godine rada, a na desetine miliona evra tokom radnog vijeka, koji se za slučaj korišćenja gasnih motora npr. kreće od 100.000 do 150.000 radnih sati. Takođe, moderna tehnologija sa kompletnim elektronskim upravljanjem, koja se koristi u ovoj oblasti, obezbjeđuje pouzdano optimalno vođenje procesa proizvodnje energija i sigurno i jednostavno priključenje na postojeće mreže električne i toplotne energije. Ekonomska ocjena opravdanosti izgradnje CHP postrojenja treba da da odgovor na pitanje njene opravdanosti u poređenju sa drugim načinima dobijanja potrebnih količina električne i toplotne energije. Kao referentni slučaj, najčešće se uzima nabavka električne energije iz elektrodistributivne mreže, dok se za toplotnu energiju uzima proizvodnja potrebne energije u vlastitoj kotlovnici, dakle troškovi goriva kod njihove odvojene proizvodnje. Ekonomski efekti izgradnje kogenerativnih postrojenja skoro isključivo zavise od odnosa cijena električne energije i goriva.

5. EVROPSKA STRATEGIJA ZA OSTVARENJE KONKURENTNE I TRAJNE ENERGIJE I KOGENERACIJA

"Zelena knjiga" ili Evropska strategija za ostvarivanje konkurentne i trajne energije iz 2006. godine, kao i drugi strateški planovi EU donešeni u narednim godinama (2007-2010. godina), predviđaju rastuću zavisnost zemalja EU od uvoza energije, zatim nagli rast cijena, globalno otopljanje, rast stanovništva, poboljšanje komfora i time potražnje za energijom, kao i moguće prepreke na domaćem (unutrašnjem) tržištu energijom. Pri tome, energetska politika EU je u potpunosti bazirana na osnovna tri principa: *dugotrajnost* (aktivna borba protiv klimatskih promjena, sa stavljanjem u prvi plan korišćenja obnovljivih izvora i energetske efikasnosti), zatim *konkurentnost* (poboljšanje efikasnosti evropskih mreža, kroz ostvarenje unutrašnjeg tržišta energijom), kao i *sigurnost snabdijevanja energijom* (bolja koordinacija unutrašnje ponude i potražnje energije u EU u kontekstu međunarodnih odnosa). Prva aktivnost je bila uspostava efikasnog unutrašnjeg tržišta električne energije i gasa, uz realizaciju određenih prioriteta, poput:

- razvoja evropskih mreža, sa zajedničkim pravilima prekogranične razmjene, s ciljem olakšanja isporuke

energije i usklađenog pristupa mrežama (prenosnoj u oblast električne i transportnoj u oblasti gasne energetike);

- plan razvoja prioriternih interkonekcija (veza), kroz investicije u infrastrukturu za povezivanje odvojenih nacionalnih mreža u EU;
- plan investiranja u proizvodne pogone, radi zadovoljenja vrhova opterećenja, a na bazi otvorenosti tržišta i povećanja konkurencije;
- računovodstveno i finansijsko razdvajanje aktivnosti u elektroprivrednim preduzećima (razdvajanje prenosa i transporta energije, proizvođača od distribucije, kao i neproizvodnih funkcija unutar proizvodnih pogona);
- uspostavljanje konkurentne cijene energije, uzrast konkurentnosti evropske industrije.

Aktivnosti koje dalje slijede obuhvataju formiranje institucija za nadzor nad snabdijevanjem energijom, uspostavljanje mehanizama brze pomoći u slučaju kriznih situacija, određivanje energenata za buduću potrošnju od strane članica EU a na bazi raspoloživih izvora, s ciljem povećanja stepena energetske sigurnosti u zemljama EU i u EU u cjelini. Poseban segment čini racionalnija upotreba energije i energetska efikasnost, tj. poboljšanje energetske karakteristika objekata. Tako, smanjenjem potrošnje energije za 20% do 2020. godine, procjenjuje se ušteda od 60 milijardi eura godišnje, koja se dalje može koristiti u novim energetskim investicijama. Na ovaj način bi dodatno bila ojačana konkurentnost evropske industrije, otvaranje novih radnih mjesta, ali i obezbjeđenje dobre osnove za osstvarivanje uslova iz Kjoto protokola u vidu smanjenja emisije CO₂ do 50%, što bi za posljedicu imalo i povećan udio zaštite životne sredine.

Sljedeća oblast djelovanja je proizvodnja energije i povećanje njene efikasnosti. Polazeći od tabele 2, u kojoj je data energetska iskoristivost (zasnovana na prvom zakonu termodinamike) u pojedinim energetskim postrojenjima, nije teško zaključiti da se prema korišćenim sadašnjim tehnologijama gubi 20 do 70% primarne energije potrebne za proizvodnju električne energije u samom procesu proizvodnje (transformacija energije u koristan oblik). S druge strane, značajan napredak se može ostvariti u polju građevinarstva (stambeni i javni objekti). Negdje oko 40% od ukupne energije utroši se za grijanje i osvjetljavanje objekata, što daje mogućnost racionalnijeg korišćenja (planovi ušteda po sektorima u zemljama EU: od 20% od 2006. godine pa do 2020. godine, uz primjenu postojećih propisa moguće je ostvariti 10% u oblastima transporta, proizvodnje toplote i korišćenja objekata, dok presotali 10% ušteda zahtijeva donošenje novih propisa, kao i uspostavljanje novog načina ponašanja državne, regionalne i lokalne administracije, javnih službi, preduzeća i građana). Jedan od načina daljih ušteda su investicije u nove tehnologije i njihov međunarodni transfer u oblasti energetike. Održivo korišćenje resursa uključuje kako održivu proizvodnju (proizvodnju uz što manje gubitaka) tako i racionalnu potrošnju. Razvoj održive proizvodnje i potrošnje predstavlja ključ za dugoročni prosperitet, kako za EU tako i za svijet. Strateški pristup postizanju održive upotrebe prirodnih resursa bi trebao da ima prednost, koja je potrebna radi efikasnije upotrebe resursa i ublažavanja negativnih posljedica po životnu sredinu. Konačni cilj je smanjenje negativnih posljedica po životnu sredinu nastalih

upotrebom prirodnih resursa, a u isto vrijeme poboljšati produktivnost resursa u ekonomiji EU.

Tabela 2. *Energetska iskoristljivost energetskih sistema*, [1].

Energetski sistem	Stepen energetske iskoristljivosti, $[\eta_{en}]$
Parne elektrane sa konvencionalnim načinom sagorijevanja	0,25-0,40 (0,45)
Gasne elektrane	0,20-0,35 (0,40)
Dizelske elektrane	0,35-0,45 (0,52)
Elektrane sa kombinovanim procesom	0,45-0,55 (0,60)
Kogenerativne elektrane	0,50-0,80 (0,95)

Direktiva 2004/8/EC utvrđuje svrhu, daje potrebne definicije, utvrđuje kriterijume za izračunavanje energetske efikasnosti u kogeneraciji, prepoznaje garancije o porijeklu električne energije iz kogeneracije, utvrđuje obavezu za države-članice da utvrde nacionalne potencijale za visoko efikasnu kogeneraciju, obavezu izrade nacionalnih planova za podršku primjene kogeneracije, smjernice za utvrđivanje pristupa javnoj električnoj mreži i utvrđivanje tarifa električne energije za vlasnika postrojenja za kogeneraciju, obezbjeđenje fer i transparentnih administrativnih procedura i periodiku i način izvještavanja. Direktiva specificira tehnologije za kogeneraciju (Aneks 1), utvrđuje način proračuna proizvodnje električne energije iz kogeneracije (Aneks 2), zatim utvrđuje metodologiju za određivanje efikasnosti kogeneracije (Aneks 3) i definiše kriterijume za izradu nacionalnih planova za podršku kogeneracije (Aneks 4). U skladu sa principima subsidiarnosti i proporcionalnosti u EU, Direktiva 2004/8/EC utvrđuje opšte principe koji daju okvir za promovisanje kogeneracije na internom tržištu energije, a detaljna implementacija je prepuštena državam-članicama kako bi one izabrale modele koji najviše odgovaraju njihovim konkretnim situacijama. Direktiva se, dakle, ograničava na definisanje minimalnog okvira koji je potreban za ostvarivanje utvrđenih ciljeva. Države, koje apliciraju na kandidatski status trebaju donijeti odluku o stupanju na snagu zakona, propisa i administrativnih odredbi, koje su potrebne za primjenu Direktive. Pri tome, kogeneracija se definiše kao istovremena proizvodnja toplote i električne i/ili mehaničke energije u jednom procesu. *Korisna toplota* predstavlja toplotu koja se proizvodi u kogeneraciji radi zadovoljenja ekonomski opravdane tražnje toplote ili hlađenja. *Ekonomski opravdana tražnja* označava potrebu za toplotom koje bi se zadovoljile po tržišnim uslovima kroz proces odvojene proizvodnje toplote. *Električna energija* iz kogeneracije označava električnu energiju koja se proizvede u procesu koji je povezan sa procesom proizvodnje toplote i koja je izračunata u skladu sa metodologijom propisanom u Aneksu 2 ove Direktive. *Rezervna električna energija* jeste električna energija koja se nabavlja preko javne električne mreže za slučaj poremećaja u procesu kogeneracije, uključujući periode planskog održavanja ili kada je postrojenje u otkazu. *Dopunska električna energija* označava električnu energiju koja se nabavlja preko javne električne mreže u slučajevima kada je tražnja veća od proizvodnje u procesu kogeneracije.

Direktiva 2004/8/EC prepoznaje visoko efikasnu, malu (električna snaga ispod 1 MWe) i mikro (ispod 50 kWe) kogeneraciju. *Visoko efikasna kogeneracija* predstavlja

kogeneraciju kojom se ostvaruju uštede primarne energije od najmanje 10% u odnosu na odvojenu proizvodnju toplote i električne energije. *Mala kogeneracija* obuhvata jedinice za distribuiranu kogeneraciju, u slučaju snabdijevanja izolovanih oblasti ili za stambene, komercijalne ili industrijske potrebe, kao i jedinice za mikro kogeneraciju. Direktiva 2004/8/EC predviđa obavezu da proizvedena električna energija iz kogeneracije mora biti pokrivena garancijama o porijeklu, koje, međutim, same po sebi ne podrazumijevaju i automatsko ostvarivanje beneficija kroz nacionalne stimulativne mehanizme. Garancije o porijeklu energije moraju specificirati: donju toplotnu moć goriva za proizvodnju električne energije, korišćenje proizvedene korisne toplote, datume i mjesta proizvodnje, količinu električne energije iz visoko efikasne kogeneracije, kao i uštedu primarne energije izračunate na bazi referentnih vrijednosti efikasnosti.

U cilju obezbjeđenja povećane primjene kogeneracije na srednjoročnom nivou, sve države potencijalne članice imaju obavezu da usvoje i objave *izveštaj o nacionalnom potencijalu za primjenu visoko efikasne kogeneracije* (uključujući mikro kogeneraciju), uz korišćenje utvrđenih kriterijuma. U izvještaju se mora identifikovati potencijal za tražnju korisnog grijanja i hlađenja, koji je pogodan za primjenu visoko efikasne kogeneracije, raspoloživost goriva i ostalih izvora energije koji će se koristiti za kogeneraciju. Izvještaj treba da sadrži i analizu prepreka za primjenu visoko efikasne kogeneracije, posebno prepreka koje se odnose na cijene, troškove i dostupnost goriva, pitanja javne električne mreže, administrativne i druge prepreke, kao i mjera koje se preduzimaju. Nacionalni planovi za podršku kogeneraciji treba da imaju važnost od najmanje 4 godine. Oni treba da sadrže i nacionalne podsticajne planove za podršku kogeneraciji na bazi ekonomske opravdanosti. *Visoko efikasna kogeneracija* treba da obezbjeđuje uštedu primarne energije od najmanje 10% u odnosu na odvojenu proizvodnju toplote i električne energije. Pri tome, sva kogeneracija iz male i mikro kogeneracije smatra se visoko efikasnom kogeneracijom ako se ostvare bilo kakve uštede primarne energije.

Faktori koji direktno utiču na ekonomičnost pogona su konstruktivna izvedba energetskih uređaja i postrojenja, pogonsko opterećenje, režimi rada, zatim održavanje pogonske spremnosti (ispravnosti) energetskih postrojenja i uređaja, kao i status i uloga postrojenja u okviru hijerarhijski višeg energetskog sistema (elektroenergetski sistem, energetska zajednica Jugoistočne evrope, UCTE i sl.). Pri tome, troškovi poslovanja za već izgrađeno postrojenje obuhvataju, pored troškova vlastite potrošnje energije, i troškove nabavke goriva, troškove nabavke repromaterijala, troškovi radnog medijuma (npr. vode), troškove održavanja i eksploatacije, troškove amortizacije, troškove radne snage i ostale troškove (bankarski troškovi).

Ekonomska ocjena opravdanosti izgradnje CHP postrojenja treba da da odgovor na pitanje njene opravdanosti u poređenju sa drugim načinima dobijanja potrebnih količina električne i toplotne energije. Kao referentni slučaj, najčešće se uzima nabavka električne energije iz elektrodistributivne mreže, dok se za toplotnu energiju uzima proizvodnja potrebne energije u vlastitoj kotlovnici, dakle troškovi goriva kod njihove odvojene proizvodnje.

Ulazna baza podataka za ovaj dio ekonomske analize, pored ranije pripremljenih podataka, zahtijeva i podatke o investicionim troškovima kogeneracije, pogonskim troškovima, troškovima održavanja, troškovima kupljene i prodane električne energije, planirani godišnji broj sati rada postrojenja (kriva trajanja opterećenja), kao i ostale troškove koji prate proizvodnju, kao što su radna snaga, troškovi kapitala (bankarske provizije, interkalarne kamate, i sl.), doprinosi (koncesiona nadoknada, vodoprivredna nadoknada, porez lokalne zajednice i sl.) i drugo. Ekonomska iskoristivost kogeneracije za pojedini kogeneracijski proizvod (električna energija, toplotna energija) zavisi od metodologije koja se koristi pri raspodjeli troškova na električnu i toplotnu (rashladnu) energiju. Treba istaći da ne postoji objektivna metoda raspodjele. Ovo je od posebnog značaja, jer novi energetske zakoni koji stvaraju uslove za liberalizaciju tržišta zabranjuju prelijevanje sredstava "cross - subsidies". Liberalizacija tržišta, uz prateću deregulaciju cijena električne energije i skladu sa EU regulativom dovode kogeneraciju u otežanu tržišnu situaciju. Polazeći od značaja kogeneracije koju ona ima u povećanju energetske efikasnosti, kao i doprinosu u smanjenju emisija stakleničkih gasova i povećanju sigurnosti u snabdijevanju, Evropska regulativa pridaje kogeneraciji značaj kroz određivanje njenog udjela u ukupnoj proizvodnji električne energije, ali prepušta nacionalnim zakonodavstvima da propišu mehanizme i mjere

6. MODELI I RIZICI KOD IZGRADNJE KOGENERACIJSKIH POSTROJENJA U REPUBLICI SRPSKOJ

Postoji više modela za realizaciju pozitivno ocijenjenog projekta realizacije kogeneracije u Republici Srpskoj. Izdavaju se dva najčešća - ugovor po sistemu "ključ u ruke" i izgradnja postrojenja u vlastitoj režiji. Izgradnja sistema prema ugovoru "ključ u ruke" podrazumijeva angažovanje specijalističkih inženjering organizacija za izradu projektne dokumentacije, nabavku opreme, angažman izvođača za građevinske i montažne radove, obuku osoblja i puštanje postrojenja u probni rad. Probni rad treba da dokaže instalisani kapacitet, kretanje utroška primarnog goriva i pomoćnih materija, sigurnost i pouzdanost u radu. Pri tome, izabrana inženjering organizacija treba odmah po potpisivanju ugovora dostaviti prihvatljive bankarske garancije, s ciljem zaštite investitora od bilo kakvih rizika. Zadatak investitora je obezbjeđenje svih potrebnih saglasnosti i dozvola, zatim tehnički nadzor i kontrola u toku realizacije projekta. Izgradnja postrojenja u vlastitoj režiji podrazumijeva potpunu organizaciju i rukovođenje procesom izgradnje od strane samog investitora, čime se preuzimaju svi rizici izgradnje i pojave moguće neusaglašenosti u toku realizacije projekta.

Postoje i drugi modeli realizacije projekta, u vidu određenih kombinacija prethodna dva modela. Jedan od takvih modela je i model inženjering u usluge "lump - sum", "forfait" ili "globalna cijena", gdje investitor sklapa pojedinačne ugovore sa inženjering organizacijama specijalizovanim za izradu projektne dokumentacije, isporuku kompletne opreme, nadzor nad izgradnjom i puštanje u pogon, sa svim potrebnim garantnim ispitivanjima. Posebno se ugovaraju izvođenje građevinskih odnosno montažnih

radova. Svojim učešćem u realizaciji, investitor može sniziti troškove realizacije projekta. Samo finansiranje može biti iz vlastitih sredstava, bankovni kredit, vanjsko ili specijalno finansiranje (povoljni krediti za zaštitu životne sredine, javno partnerstvo i sl.), ili pak kombinacija vlastitog učešća (do 25%) i bankarskog kredita (do 75%). Analiza osjetljivosti predstavlja jednostavnu tehniku za ocjenu nepovoljnih efekata na sam projekat u toku njegovog životnog vijeka. U principu analizu osjetljivosti treba sprovesti na onim projektnim veličinama koje su numerički velike ili na onim na kojima postoji izvjesna neizvjesnost. Fazni elementi analize rizika u pripremi investicijskih projekata kogeneracije obuhvataju:

- a) identifikaciju rizika sa kojima se može suočiti projekat,
- b) konstrukciju matrice rizika za predloženi projekat, rangirajući rizike prema stepenu njihove vjerovatnoće i veličini njihovog mogućeg uticaja,
- c) identifikaciju mogućnosti kvantitativnih opisa pojedinih od varijabli (promjenljivih),
- d) identifikaciju izvora podataka savke od mogućih varijabli projektnih rizika,
- e) identifikaciju distribucije vjerovatnoće ključnih varijabli,
- f) sprovođenje uprošćene analize vjerovatnoće s ciljem dobijanja procjene maksimalne i minimalne vrijednosti odnosa ekonomske neto sadašnje vrijednosti (ENSV) i ekonomske interne stope prinosa (EIRR),
- g) razmatranje izvođenja zaključaka iz primarnih empirijskih izvora, s ciljem sprovođenja analize vjerovatnoće na bazi dobijene distribucije vjerovatnoće, odlučiti da li je rizik opravdan u smislu ispunjenja uslova EIRR manji od EOCC (ekonomske prihvatljivi troškovi kapitala) ili ENSV manja od nule.

Ako se stepen rizika smatra prihvatljivim, promjena projekta možda nije potrebna, ali treba provjeriti sve pojedinačne distribucije vjerovatnoća. U slučaju ako se razmjere rizika smatraju neprihvatljivim, neophodno je (po mogućnosti) pristupiti promjeni projekta. U svakom slučaju, odluka o ulasku u izgradnju kogenerativnog postrojenja bazira se na pozitivnim finansijskim indikatorima izračunatim iz tokova gotovine ("cash flow"), pri čemu se ukupni investicioni troškovi tretiraju kao finansijski odliv, a gotovinski prilivi predstavljaju razlike između godišnjih ukupnih pogonskih troškova kogeneracije i troškova snabdijevanja energijom na konvencionalni način.

7. ZAKLJUČAK

Smanjene uvozne zavisnosti i povećano zapošljavanje predstavljaju elemente na bazi kojih pobornici korišćenja nekonvencionalnih izvora energije, gdje spada i kogeneracija, zasnivaju svoj stav o širem društvenom interesu njihove primjene i potrebe za što ubrzanijim njihovim razvojem. Primarni nekonvencionalni oblici energije su po svojoj prirodi domaći izvori, čime se za njihov relativno skromni udio u ukupnom snabdijevanju električne energije smanjuje uvozna zavisnost kod energetski deficitarnih zemalja. S druge strane, domaći proizvod je najčešće manje efikasan od uvoznih alternativa, skuplji je i najčešće nije podržan povoljnim kreditnim aranžmanima niti postoje adekvatni podsticaji državnim subvencijama. S druge strane, stepen zapošljavanja raste sa povećanjem domaće proizvodnje komponenti ili postrojenja za transformaciju energije iz

nekonvencionalnih izvora, kao i mogućem rastu izvoza na inostrano tržište. Prijedlog za podsticajne mjere trebao bi povećati interes potencijalnih domaćih i stranih investitora za ulaganja u nekonvencionalne izvore u Republici Srpskoj i BiH u cjelini. Da bi mogli sagledati sve aspekte primjene nekonvencionalnih izvora energije, neophodno je njihova osnovna svojstva posmatrati paralelno sa opštim svojstvima klasičnih konvencionalnih izvora. Upoređivanjem tih svojstava moguće je dati vjerodostojne kvalifikacije vezane za njihovu primjenu. S obzirom da su neka svojstva nekonvencionalnih izvora poželjna a neka nepoželjna, neophodno je dodatno razmotriti pojedinačna svojstva svih danas komercijalno dostupnih nekonvencionalnih izvora energije, te istaknuti poželjna i nepoželjna svojstva kod korištenja pojedinih oblika energije. Države Europske unije (EU) postavile su ambiciozan cilj da povećaju udio obnovljivih izvora energije s 8,5% u 2005. godini na 20% cjelokupne potrošnje energije u EU do 2020. godine. Ovaj cilj je preuzeo i Grad Banja Luka. Ovo povećanje udjela obnovljivih izvora energije prdstavljaće veliki doprinos u borbi s globalnim klimatskim promjenama i značajni iskorak prema većoj energetskej nezavisnosti unije, što također predstavlja vrlo važan dugoročni cilj država članica Europske unije. Ratifikacijom Ugovora o energetskej zajednici Jugoistočne Evrope, BiH i Republika Srpska preuzele su obavezu da usklade svoje zakonodavstvo sa pravnim tekovinama EU u oblasti električne energije, pri čemu propisi Republike Srpske i BiH treba da se u potpunosti usklade sa odredbama Direktive 2003/54 o unutrašnjem tržištu energije i Direktive 2001/77 o promovisanju električne energije proizvedne iz obnovljivih izvora na unutrašnjem tržištu, po termin planu datom u Aneksu Ugovora. Ove odredbe su obavezale nadležna tijela u BiH da utvrde indikativne ciljeve učešća električne energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji za period od 10 godina, mjere kojima se planiraju postići ti ciljevi, kao i da podnose periodične izvještaje o postizanju postavljenih ciljeva. Određujući nivo garantovane otkupne cijene i premije, zavisno od vrste energetskeg izvora, obezbjeđuje se podloga za investiranje u postrojenja koja koriste najefikasniju raspoloživu tehnologiju na najisplativijim lokacijama, kako bi troškovi za društvo u cjelini bili što niži (održiv razvoj).

8. LITERATURA

[1] Z. Milovanović, D. Miličić, „Monografija Energetske mašine - Parne turbine za kogeneracijsku proizvodnju

energije“, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2012., 520 str.

- [2] Z. Milovanović, „Mogući rizici tokom projektovanja, izgradnje i eksploatacije termoenergetskih postrojenja“, *EEE - Energija, ekonomija, ekologija*, List SE, Broj 1-2, Godina X, 2008., UDC 620.9, str. 046-052
- [3] Đ. Bašić i drugi, „Nacionalni program energetske efikasnosti - mogućnost korišćenja gasnih motora za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije“, Novi Sad, 2003., 47 str.
- [4] J. Bugge and R. Blum, „High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives“, www.dongenergy.com/SiteCollectionDocuments/NEW%20Corporate/PDF/Engineering/45.pdf, 15 str.
- [5] L. Busse, R. Šindelar, „SEKUNDEN-LEISTUNGSRESERVE UND WÄRMEVERBRAUCH BEI VERSHIEDENEN BETRIEBSARTEN VON DAMPFTURBINEN“, *VGB Kraftwerkstechnik*, Nr. 9, 1989., s. 892-895
- [6] Z. Milovanović and I. Smajević, „Thermo-energy potential of Bosnia and Herzegovina - today and projections for the future“, Academy of Sciences and Arts of BiH, Scientific Cooloquium „Decision Making Principles in Building of Electric Power Sources, Sarajevo, March 27-28, 2008, 33 pages

Abstract – Combined heat and power (CHP) and district heating and cooling (DHC) represent a series of proven, reliable and cost-effective technologies that are already making an important contribution to meeting global heat and electricity demand. Due to their enhanced energy supply efficiency and use of waste heat and low-carbon renewable energy resources, CHP and DHC are already an important part of national and regional greenhouse gas (GHG) emissions reductions strategies. The present work presents the problem of use of CHP and DHC systems in the Republic of Srpska.

ENERGY EFFICIENCY COGENERATION PRODUCTION OF ENERGY AND LIMITATIONS OF THE REPUBLIC OF SRPSKA

Zdravko N. Milovanovic
Svetlana R. Dumonjić-Milovanovic

ODREĐIVANJE PARAMETARA ZA ENERGETSKU OPTIMIZACIJU TRANSPARENTNIH ELEMENATA OMOTAČA STAMBENIH ZGRADA U BIH

Darija Gajić, *Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci*

Sadržaj – Predmetni rad prikazuje tržište materijala i proizvoda koji čine arhitektonske otvore stambenih zgrada, čije osobine i performanse i jesu odredile postavku adekvatnih parametara, koji učestvuju u proračunima energetske karakteristika zgrada pri obnovi zgrada, kao i pri građenju novih na području Bosne i Hercegovine. U radu su analizirani odnosi U-koeficijentata i cijene koštanja materijala i proizvoda koji čine transparentne elemente omotača.

UVOD

Omotač zgrada, u temi energetske optimizacije omotača, prateći važeći regulativni okvir Evropske unije vezan za energetske efikasnosti zgrada, ne sagledava se samo kao element koji sprečava toplotne gubitke, nego se koristi kao element koji svojom optimizacijom doprinosi održavanju i dobijanju toplote, izbjegavanju pregrijavanja, raspodjeljivanju ventilacije, korištenju dnevne svjetlosti i proizvodnji električne energije.[1] Obezbjedivanje cilja održavanja i dobijanja toplote, vezano je za koncepte: toplotne izolacije od transparentnih elemenata omotača (odnos zastakljenja i kvalitet stakla), pasivnog korištenja solarnog zračenja (zastakljenje lođa i transparentna termoizolacija) i minimiziranja ventilacionih toplotnih gubitaka (vazduhopropusnost). U cilju sprečavanja pregrijavanja, prisutan je koncept redukovanja dolaznog solarnog zračenja (specijalna stakla i sistemi zasjenčenja), u cilju decentralizacije ventilacije, koncept prirodne ventilacije (ventilacija preko otvora-prozora) i u cilju korištenja dnevne svjetlosti, kroz koncepte geometrijske optimizacije (odnos zastakljenja i raspored otvora-prozora) i sistema za dnevno osvjetljenje (prenošnje svjetlosti reflektujući, preusmjeravajući, transparentno i translucetno). Za energetske optimizacije omotača, pri odabiru najadekvatnijeg materijala i proizvoda za transparentne elemente omotača, neophodno je sagledati tržište istih na predmetnom području. Istraživanjem reprezentativnih uzoraka postojećih stambenih zgrada grada Banjaluka, određeni su karakteristični postojeći otvori, na osnovu kojih su se rangirali materijali i proizvodi, na tržištu Bosne i Hercegovine, sa svojim energetske karakteristika i cijenom koštanja.

ODABIR ADEKVATNIH MATERIJALA I PROIZVODA ZA ENERGETSKU OPTIMIZACIJU TRANSPARENTNIH ELEMENATA OMOTAČA

Pri konceptu toplotne izolacije od transparentnih elemenata omotača, parametri i mjere koji utiču na to su: odnos zastakljenja i kvalitet stakla. Za energetske optimizacije omotača i to za njegov dio koji se tiče transparentnih elemenata, moraju se sagledati materijali i proizvodi elemenata koji sačinjavaju otvore, a to su okviri, te jedinica zastakljenja, sa svojim elementima (jedinice stakla, distanceri, punjenje plemenitim gasom ili vazduhom). Prozori (otvori) su elementi koji proporcionalno, obično u zavisnosti od dimenzija okvira, broja krila i podjele unutar krila, sadrže maksimalno 66% jedinice zastakljenja.[2]

Prozori na reprezentativnim uzorcima postojećih stambenih zgrada Banjaluke sadrže 65% zastakljenja, što ujedno govori o važnosti jedinice zastakljenja, odnosno termoizolacionog stakla koje se najčešće ugrađuje u prozore. U Bosni i Hercegovini, ravno staklo se ne proizvodi, već se uvozi (najviše prisutno staklo proizvođača ACG - Češka i Guardian - Mađarska) i u odnosu na zadane konfiguratore proizvođača naknadno se doručuje u termoizolaciono staklo (RAMA-GLAS, KRISTAL, Širbegović grupa, DAS-PROM). Na tržištu Bosne i Hercegovine, u stambenoj izgradnji i obnovi, najraznovrsnija je ponuda plastičnih okvira (Aluplast, VEKA, INOUTIC-nekad THYSEN POLYMER, REHAU, TROCAL, KOMMERLING, GEALAN, SCHUCO), okvira koji se ne proizvode na području Bosne i Hercegovine, dok se drveni (FAGUS, AM Međugorje) i aluminijumski (FEAL) okviri proizvode, ali na tržištu postoje okviri i najpoznatijih evropskih proizvođača (SCHUCO, Jelovica okna). Analizirane su energetske karakteristike materijala i proizvoda, odnosno koeficijenti U_g , U_f i U_w (koeficijenti prolaza toplote za jedinicu zastakljenja, za okvir i za cijeli prozor), g-koeficijent (dotok sunčeve energije kroz jedinicu zastakljenja) i Ψ_g -koeficijent (linijski toplotni gubici na spoju između jedinice zastakljenja i okvira).

2.1. Odabir jedinice zastakljenja

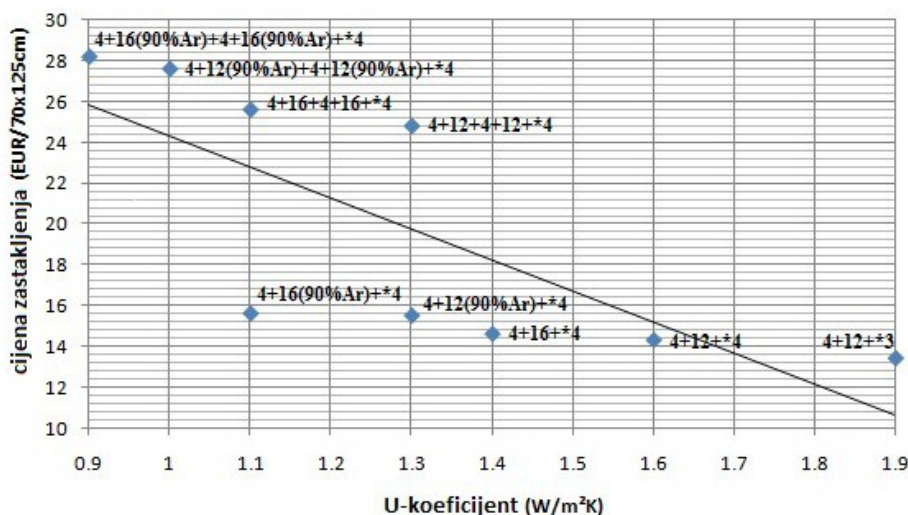
Pri odabiru najadekvatnijeg termoizolacionog stakla, kao jedinice zastakljenja prozora i/ili balkonskih vrata, u svrhu energetske optimizacije omotača, istraživanje se vodilo spoznajom u kakvom se obliku proizvode, odnosno nude na tržištu Bosne i Hercegovine, Evrope, pa čak i Amerike iz razloga, što su to proizvođači sa istim nazivom na svim područjima, a proizvodi im se razlikuju nazivom i strukturom, pa je zamisao istraživanja i bila da se možda treba unaprijediti postojeća ponuda tržišta Bosne i Hercegovine.

Proizvođač Guardian prisutan je na svim navedenim tržištima, ali u Americi je u strukturi proizvoda termoizolacionog zastakljenja zastupljeno staklo debljine 3mm. Interesantno je da poređenjem dvije strukture proizvoda koje se razlikuju debljinom stakla i razmakom međuprostora, istog proizvođača Guardian, proizvod u Americi pod nazivom ClimaGuard HiLightR802 (3+12,7+*3*mm) i proizvod u Evropi Clima Guard N (4+16+*4mm), ukazuju na iste koeficijente prolaza toplote ($U_g=1,4W/m^2K$) i isti koeficijent transmisije svjetlosti (oko 80%), dok proizvod u Americi ima za 12% veći koeficijent dotoka sunčeve energije (g-koef.). Proizvođač Guardian na tržištu Evrope [3] ima najviše zastupljen proizvod ClimaGuard u strukturi 4+16+*4mm, od kojih je međuprostor ispunjen 100% vazduhom ili 90% argonom i 10% vazduhom i to unutrašnje (drugo) staklo je obično sa prevlakom niske emisije (*low E*) na unutrašnjoj strani prema međuprostoru (kod proizvođača pozicija 3.).

Svi proizvođači termoizolacionog zastakljenja u Bosni i Hercegovini imaju zastupljenije staklo AGC-a iz Češke, zbog ekonomske isplativosti, i većina se, u proizvodnji, vodi njihovim konfiguratorima, pa se istraživanje vodilo

navedenim konfiguratorom za upoređivanje struktura zastakljenja. [4] Za razliku od gore navedenog proizvođača Guardian, koji svojim proizvodima ukazuje da razmak između stakala ne utiče na koeficijent prolaza toplote, kod AGC-a, pri upoređivanju različitih struktura običnog termoizolacionog zastakljenja sa vazduhom (100%), zaključujemo da razmak sa 12mm na 16mm između stakala istih debljina poboljšava koeficijent prolaza toplote za 7%, dok su koeficijenti g i τ_v ostali na istom nivou. Isti razmak između stakala sa povećanjem debljine stakla sa 4mm na 6mm, poboljšaće koeficijent prolaza toplote za 3,5%, dok će g -koeficijent sa većom debljinom biti smanjen za oko 4%, a transmisija svjetlosti biti manja za 2,5%. Kod upoređivanja iste strukture običnog termoizolacionog stakla sa vazduhom (4+16+4 - 2,7W/m²K) sa niskoemisionim drugim staklom (4+16+*4 - 1,7W/m²K) poboljšaće koeficijent prolaza toplote za 37%, dok će g -koef. biti niži za 5%, a τ_v -koef. za 7,4%. Interesanto je da i upoređivanjem iste strukture običnog termoizolacionog stakla (4+16(100% vazduh)+4 - 2,7 W/m²K) sa vazduhom (100%) i sa argonom (90% argon +10% vazduh), kod jedinice sa argonom (4+16(argon)+4 - 2,6 W/m²K), poboljšan je koeficijent za 3,7%, dok su ostali koeficijenti isti. Ako uporedimo punjenje vazduhom i argonom istu strukturu zastakljenja sa niskoemisionim

drugim staklom (4+16+*4), struktura sa argonom (1,5 W/m²K) imala je poboljšan koeficijent prolaza toplote za 11,8% u odnosu na vazduh (1,7 W/m²K), da bi takođe ostali koeficijenti ostali na istom nivou. Proizvođač Guardian posjeduje i različite vrste niskoemisionih prevlake, što je nazivima proizvoda i istakao, pa tako struktura 4+16(100% vazduh)+*4 u zavisnosti od prevlake ima U-koef. 1,3 W/m²K, 1,4 W/m²K i 1,6 W/m²K, te proizvodi sa nižim koeficijentom prolaza toplote imaju i niže koeficijente g i τ_v . Niskoemisione prevlake, kod proizvođača, se takođe razlikuju, pa ista struktura zastakljenja 4+16(90% Ar)+*4 kod Guardian-a ima niži koeficijent prolaza toplote za 14% od AGC-a, g -koef. je niži za 25%, dok je τ_v -koef. viši za 10%. Prema analizi cijena proizvođača termoizolacionih stakala na području Bosne i Hercegovine, za jedno zastakljenje istih dimenzija (karakteristično krilo prozora kod dva reprezentativna uzorka postojećih stambenih zgrada), pa raznih struktura i vrsta, dolazi se do zaključka da kod dvoslojnog stakla, razmak između stakala, distancer, u najmanjoj mjeri utiče na visinu cijene (oko 2% viša cijena distancera od 16mm u odnosu na 12mm), a ostvari porast U-koeficijenta za 0,2 W/m²K (za 18% ako je punjeno argonom, za 14% ako je punjeno vazduhom) – Sl. 1.



Sl. 1. Odnos U-koeficijenta i cijene bez PDV-a raznih jedinica termoizolacionog zastakljenja kod istog proizvođača u Bosni i Hercegovini (mart 2013. god.)

Termoizolaciono staklo 4+12+*4 punjeno argonom za oko 7% je skuplje od stakla sa vazduhom, koliko je i niža cijena termoizolacionog zastakljenja ako mu je drugo staklo 3mm. Kod troslojnog stakla istih dimenzija distancer je činio za 3% skuplju varijantu sa razmakom od 16mm u odnosu na 12mm, dok je punjenje argonom za oko 10% činilo skupljim zastakljenje nego punjenje vazduhom. Cijena zastakljenja krila prozora istih dimenzija za troslojno staklo punjeno argonom je za oko 44% skuplje od dvoslojnog stakla punjenog argonom, da bi nešto niži procenat od 43% bio kod varijante sa vazduhom. Cijena termoizolacionog stakla u Bosni i Hercegovini prateći trend rasta cijene kod jednog proizvođača, ukazuje da pri dostizanju koeficijenta prolaza toplote od 1,6 W/m²K do 0,9 W/m²K (porast U-koeficijenta za 78%) cijena poraste za 96%. Termoizolaciono zastakljenje strukture 4-16-*4 punjeno 90% argonom je najbolje rangirano zastakljenje, ima niži koeficijent prolaza toplote za 0,3 W/m²K (za 27% niži) od zastakljenja iste strukture samo punjeno vazduhom, da bi cijena zastakljenja sa argonom bila viša za 7%.

2.2. Odabir cjelovitog prozora

Osim jedinice zastakljenja i njene vrijednosti koeficijenta prolaza toplote (U_g) za energetska optimizaciju transparentnih elemenata omotača važni su okviri (U_f) i spojevi između stakla i okvira, gdje se javljaju linijski toplotni gubici (Ψ_g).

Pri analizi plastičnih profila, koji su namjenjeni dvoslojnom termoizolacionom staklu, raspon vrijednosti U-koeficijenta kreće se od 1,0-1,6 W/m²K. Proizvodi su nazive unutar svakog proizvođača dobili u zavisnosti od širine ugrađivanja (60-82mm) pozicije zaptivne mase (bočno i/ili u sredini) i nekad broju komora (2,3,4,5,6,7). Kod plastičnih profila koji su namjenjeni za troslojna termoizolaciona stakla proizvođači su profile prilagodili pasivnom standardu i najčešće su koeficijenta $\leq 1,1$ W/m²K. Najviše profila ove vrste je sa $U = 1,0$ W/m²K i najčešće je zabilježen najniži koeficijent od 0,8 W/m²K. Certifikovani koeficijent ispod 0,8

W/m²K zabilježen je kod proizvođača koji su komore svojih profila punili izolacijom.

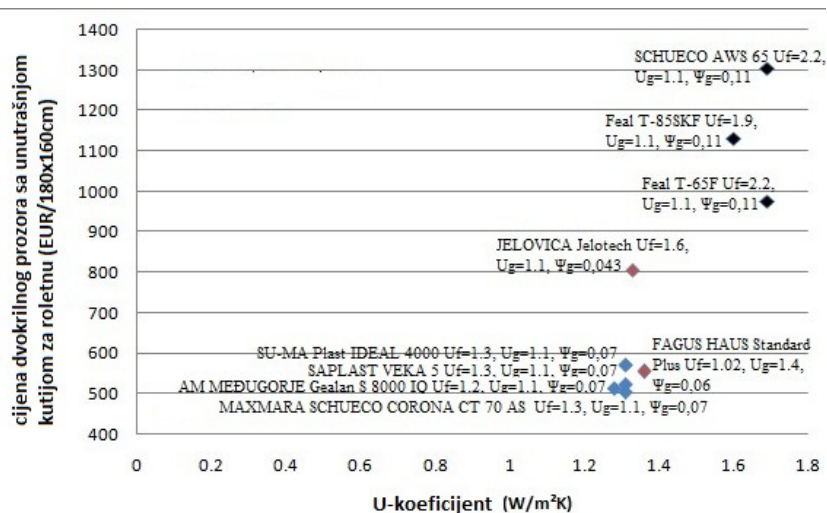
Kod certifikovanih okvira od drveta za dvostruka termoizolaciona stakla, najčešća širina ugrađivanja je 68mm, a vrijednost U-koeficijenta okvira je oko 1,5 – 1,9 W/m²K i zavisi od koje je vrste drveta, pa tako najčešće od smreke je u prosjeku oko 1,6 W/m²K, dok je od hrasta 1,9 W/m²K. Pri upoređivanju okvira od drveta treba se voditi proizvodima proizvođača iz Evropske unije. Na vrijednost U-koeficijenta osim vrste drveta utiče debljina okvira, pa tako za okvir od smreke za širinu ugrađivanja od 68mm kreće se od 1,36 - 1,8 W/m²K, dok kod okvira predviđenih najčešće za pasivni standard i upotrebu troslojnih stakala za 78mm i 95mm je 1,23 – 1,56 W/m²K, a ako u sebi sadrže i vazdušne komore ili izolaciju u segmentima okvir od 78mm ima koeficijent 0,87 – 1,22 W/m²K, dok za 110mm je 0,73 W/m²K.

Aluminijumski profili širina od 45-85mm za dvoslojna stakla proizvođača iz Bosne i Hercegovine kreću se od 1,9-3,4 W/m²K, s tim da je najniži U-koeficijent od 1,9 W/m²K ostvaren kod najšireg profila od 85mm sa ispunom od izolacije (do 40mm) i potpunim termičkim prekidom u središnjem dijelu profila (PA-poliamidne trake), dok je za troslojno staklo obezbijeđen, takođe kod najšireg profila od 85mm, U-koeficijent od 1,5 W/m²K, s tim što ispun od izolacije ima veću širinu (do 64mm). Kod proizvođača iz Evropske unije čiji su profili prisutni na tržištu Bosne i Hercegovine za dvoslojno staklo (AWS 65 - 2,2 W/m²K, AWS 60 - 2,6 W/m²K), ali ne i oni koji su od 2009. godine u upotrebi na tržištu Evropske unije, dostižu U-koeficijent od 1,4-1,6 W/m²K kod profila širine 70-75mm, pa i do 1,0 W/m²K kod profila od 90mm za troslojno staklo. Različitosti u profilima mogu se tražiti u kvalitetu i strukturi termičkih prekida, odnosno više komora, u EPDM-u (zaptivnoj gumi-

elastomer nastako vulkanizacijom etilen-propilen-dien-a) i poliamidnoj traci. Od sredine 2013. godine, na tržištu je novi profil proizvođača iz Bosne i Hercegovine, koji dostiže certifikovani U_f=0,92 W/m²K (poliamidni štapići zamijenjeni ABS-om- termoplastičnim materijalom nastao kopolimerizacijom akrilonitril-butadienstirenom, zaptivna guma od EPDM-a zamijenjena gumom od termoplastičnog elastomera nastalog kopolimerizacijom polietilena -TPE).

Najmanji linijski toplotni gubici na spoju između stakla i plastičnog okvira, u većini slučajeva kod prozora sa troslojnim staklom koji su deklarirani od strane Passivhaus Institut-a iz Darmštata, kreću se oko 0,03 W/mK (GEALAN S 7000 IQ pasive house-0,029 W/mK, SCHUECO Corona SI 82+-0,034 W/mK, REHAU GENE0 PHZ-0,03 W/mK). Prema proizvođačima u Bosni Hercegovini kod prozora sa plastičnim okvirima linijski toplotni gubici između stakla i okvira čine Ψ_g=0,07 W/mK. Kod drvenih prozora, ako je distancer od PVC-a Ψ_g=0,04 W/mK, a od aluminijuma 0,06 W/mK, dok kod aluminijumskih okvira, ako je distancer od PVC-a Ψ_g=0,05 W/mK, a od aluminijuma Ψ_g=0,11 W/mK. Prema proizvođačima jedinica termoizolacionih zastakljenja najviše je prisutan, zbog cijene, aluminijumski distancer. Prema njihovim riječima pet puta je jeftiniji aluminijumski od plastičnog zbog procesa proizvodnje.

Prema odnosu U-koeficijenta i cijene za proizvod, kada sagledamo ponudu svih proizvođača, dvokrilnog prozora 180x140cm sa jedinicom zastakljenja U_g=1,1 W/m²K (4+16+*4) i unutrašnjom kutijom za roletnu od 20cm sa U=0,85 W/m²K i najčešćom vrijednosti U_f za okvir, na koji su sami proizvođači ukazivali najpovoljniji su prozori sa PVC profilima, zatim drvenim, pa aluminijumskim profilima – Sl. 2.



Sl. 2. Odnos U-koeficijenta i cijene sa PDV-om proizvođača prozora sa PVC okvirima (plava boja), drvenim (smeđa) i aluminijumskim (crna) okvirima na tržištu Bosne i Hercegovine (mart 2013. god.)

ODREĐIVANJE ADEKVATNIH PARAMETARA ZA ENERGETSKU OPTIMIZACIJU TRANSPARENTNIH ELEMENATA OMOTAČA

Analiza odnosa energetske karakteristika i cijena materijala i proizvoda na području Bosne i Hercegovine, kao i rangiranja potrošnje toplotne energije za grijanje i cijene primjenjenih mjera na cjelokupnoj obnovi omotača postojećih stambenih zgrada [5], u klimatskim uslovima Banjaluke (u Bosni i Hercegovini oblasti/regije Sjever),

izdefinisala je da je najpovoljnija postavka dozvoljenih vrijednosti koeficijenata prolaza toplote, koji bi zadovoljili i zahtjev za transmisionim gubicima toplote u odnosu na faktor oblika zgrade (reprezentativni uzorak), za spoljašnji zid 0,3 W/(m²K), za otvore na omotaču (prozore i balkonska vrata) 1,6 W/(m²K), za međuspratnu konstrukciju ispod negrijanog prostora 0,3 W/(m²K), za međuspratnu konstrukciju iznad negrijanog prostora 0,3 W/(m²K).

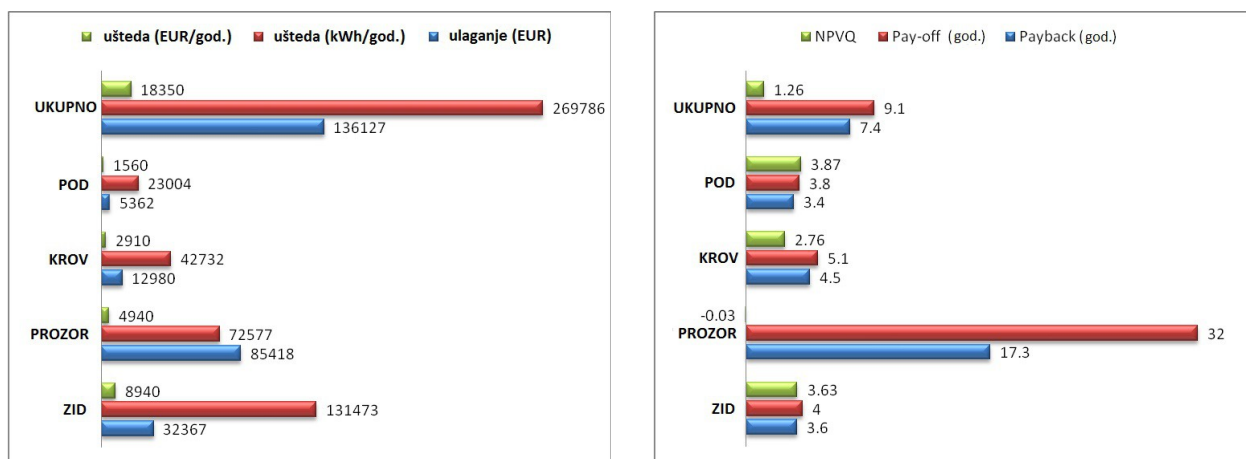
Obezbjeđivanje minimalnih zahtjeva za energetskim karakteristikama zgrada, kod postojećih stambenih zgrada, u slučaju omotača zgrade, kod planiranja mjere zamjene

prozora, zbog konstruktivnih i tehničkih rješavanja detalja, ako ne postoji termoizolacija na fasadnom zidu, neophodno je da se obje mjere izvedu zajedno.

U analizi energetske optimizacije zgrada značajan je ekonomski vijek trajanja pojedinih elemenata (proizvoda, mjera) koji su ugrađeni u zgradu, koji je dva do tri puta niži od tehničkog/fizičkog vijeka trajanja. Ekonomski vijek trajanja mjera i/ili elemenata omotača, zgrada prema studijama i literaturi Norveške [6] i Njemačke[7], u prosjeku

je 30 godina, osim za zaptivnu masu koja ima vijek trajanja 5 godina.

Energetskom i ekonomskom analizom energetske optimizacije omotača zgrada [5], reprezentativnih uzoraka postojećih stambenih zgrada Banjaluke, ukazano je da je najveći efekat uštede energije i isplativosti mjera, ako se obnovi cjelokupni omotač, a ne pojedinačni elementi omotača (posebno u slučaju zamjene prozora, mjera koja se pokazala kao neisplativa) – Sl. 3.



Sl. 3. Uporedni prikaz ekonomskih pokazatelja na pojedinačnim mjerama i pri obnovi cjelokupnog omotača, na slici lijevo prikaz inicijalnog finansijskog ulaganja u EUR i uštede na godišnjem nivou u EUR i kWh, na slici desno prikaz perioda otplate (Payback i Pay-off) i kvocijenta NPVQ, kao najboljeg pokazatelja pri rangiranju mjera

Odabrani adekvatni parametri za transparentne elemente omotača, pri proračunima energetske karakteristika u obnovi postojećih stambenih zgrada i gradnji novih, preko gore navedenih energetske i ekonomske analize i ekonomskog vijeka trajanja pojedinih mjera i/ili elemenata omotača su okviri koji dostižu $U_f=1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (npr. PVC profili), sa dvostrukim termoizolacionim staklom od 4mm sa razmakom (šupljini) od 16mm, pri tome da unutrašnje staklo sa unutrašnje strane prema šupljini ima niskoemisionu prevlaku i da je šupljina ispunjena vazduhom $U_g=1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (šupljina punjena argonom, nakon izvjesnog vremena može postati punjena vazduhom zbog ekonomskog vijeka trajanja zaptivne gume) sa faktorom dotoka od sunca kroz zastakljenje od $g=0,63$ ($4+16+*4$). Aluminijski distancer između stakala koji zajedno sa staklom kada je ugrađeno u navedeni profil ima linijske toplotne gubitke od $\Psi_g=0,07 \text{ W/mK}$, te svi navedeni koeficijenti ukazaće da je za karakteristični prozor (dvokrilni prozor 180x140cm) $U_w=1,57 \text{ W/m}^2\text{K}$.

ZAKLJUČAK

Masovna upotreba stakla od 3mm u prozorima stambenih zgrada Amerike (posmatrajući istu klimatsku zonu, kao što je regija Sjever u Bosni i Hercegovini), može se tražiti u činjenicama da se takva vrsta zastakljenja koristi na montažnim drvenim konstrukcijama prizemnih ili dvoetažnih kuća, da je jedinica zastakljenja najčešće u drvenim okvirima, i da pri prirodnim katastrofama koje su česte na američkom tlu, želi se prouzrokovati što manje građevinskog otpada, što ako uzmemo u obzir životni ciklus materijala i njegov uticaj na prirodno okruženje, tako bi se i trebalo odnositi prema građevinskim materijalima (proizvodima).

Prema proizvođačima u Bosni i Hercegovini, u proizvodnji termoizolacionog stakla za stambene zgrade

mogla bi se primjenjivati debljina od 3mm, jedino na šta oni ukazuju je da pri proizvodnji termoizolacionih stakala debljine 3mm više se uništi stakla, pa da iako je jeftinije staklo od 3mm nego od 4mm, njegova upotreba u termoizolacionim jedinicama zastakljenja za njih je ekonomski neisplativa.

Najpovoljnija dozvoljena vrijednost U-koeficijenta za otvore na omotaču stambenih zgrada (prozore i balkonska vrata) na području Bosne i Hercegovine za oblast (regiju) Sjever je $1,60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Evropska unija sa deklaracijama proizvoda o uticaju na životnu sredinu (EPD- *Environmental Product Declaration*) ukazuje da će biti neophodno za adekvatnu ekološku analizu istražiti koliki je utrošak primarne energije (neobnovljive) i potencijal globalnog zagrijavanja za građevinske materijale koji se proizvode u Bosni i Hercegovini. Materijali iz Evropske unije koji posjeduju ekološke deklaracije, a na tržištu su Bosne i Hercegovine, moraju se ponovo analizirati na području Bosne i Hercegovine, zbog udaljenosti proizvodnog pogona i potencijalnog enormnog utroška energije za transport istog.

LITERATURA

- [1] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark and M. Zeumer, „Energy Manual: sustainable architecture“, Basel: Birkhäuser, 2008., pp. 85.
- [2] R. Krippner, F. Musso, „Basic Facade Apertures“, Birkhauser: Basel, Boston, Berlin, 2008., pp. 19.
- [3] O. Beier Costa, R. Greiner, R. Rinkens, „Glass Time –technical manual“, Luxembourg: GUARDIAN Europe, 2012.
- [4] AGC Glass Europe. Datum preuzimanja 25.02.2013. Internet:

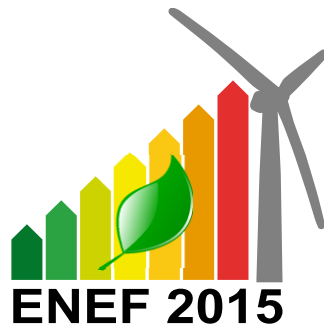
<http://www.yourglass.com/configurator/gb/en/toolbox/configurator/main.html>

- [5] D. Gajić, „Energetska optimizacija omotača reprezentativnih uzoraka postojećih stambenih zgrada grada Banjaluka“, Beograd – doktorska disertacija, 2014.
- [6] ENSI, „Profitability Calculations“, interni dokument, 2008.
- [7] G. Giebeler, R. Fisch, H. Krause, F. Musso, K.-H. Petzinka and A. Rudolphi, „Refurbishment Manual“, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2009., pp. 23.

Abstract – *This paper displays market materials and products that make architectural openings of residential buildings, whose characteristics and performance determined the setting of appropriate parameters involved in the calculations of building energy performances in the reconstruction of buildings, as well as during the construction of new ones in Bosnia and Herzegovina. The relationships of U-value and costs of materials and products that are envelope transparent elements, are analysed in this paper.*

DETERMINATION OF PARAMETERS FOR ENERGY OPTIMIZATION OF ENVELOPE TRANSPARENT ELEMENTS OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN BOSNIA AND HERZEGOVINA

Darija Gajic



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015
25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesija B1

Sesija B1

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Đorđe Lekić

**TRENDVI IMPLEMENTACIJE
INTELEKTNIH ELEKTROENERGETSKIH MREŽA47**

Predrag Mršić, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković

**DEMONSTRACIJA UPOTREBE LOKATORA KVAROVA
U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI52**

Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić

**PRORAČUN MAGNETNE INDUKCIJE U BLIZINI SREDNJENAPONSKIH NADZEMNIH
VODOVA ZA POTREBE DETEKCIJE STRUJE KVARA58**

Branimir N. Petrović

**SAVREMENE METODE ZA OGRANIČAVANJE STRUJA KRATKOG SPOJA U
ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA U SLUŽBI ENERGETSKE EFIKASNOSTI64**

Jelena Milojković, Vančo Litovski, Miljana Milić

**PREDVIĐANJE MESEČNE POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE
NA NIVOU PRIGRADSKE TRAFOSTANICE70**

TRENDOVI IMPLEMENTACIJE INTELIGENTNIH ELEKTROENERGETSKIH MREŽA

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Đorđe Lekić, *Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci*

Sadržaj – *Upotreba savremenih informacionih i komunikacionih tehnologija omogućava da se tradicionalna elektroenergetska mreža transformiše u tzv. inteligentnu mrežu. Napredni sistemi upravljanja koordinišu rad svih subjekata koji se javljaju u modernoj mreži (sistema za upravljanje potrošnjom, pametnih brojila, distribuirane proizvodnje, sistema za skladištenje energije, električnih vozila i dr.) i tako obezbjeđuju efikasno i održivo okruženje za pouzdano i kvalitetno snabdijevanje korisnika električnom energijom. Zadatak ovog rada je identifikacija trendova razvoja inteligentnih mreža u svijetu i istraživanje mogućnosti za primjenu u našem okruženju.*

1. UVOD

Elektroenergetska mreža Republike Srpske nalazi se pred značajnim izazovima i promjenama koje su uslovljene:

- razvojem informaciono-komunikacionih tehnologija, koje omogućavaju nove metode za nadzor i upravljanje mrežom,
- liberalizacijom tržišta električne energije, koja ima za cilj da podstakne konkurenciju i poboljša kvalitet, ali koja nesumnjivo usložnjava princip funkcionisanja mreže,
- razvojem tehnologija obnovljivih izvora energije i njihovim sve većim udjelom u elektroenergetskoj mreži,
- mogućnošću da korisnici učestvuju u elektroenergetskom sistemu kao proizvođači energije, a ne samo kao kupci, što je do skoro bio slučaj,
- razvojem tehnologija za upravljanje potrošnjom, sa ciljem efikasnijeg i ekonomičnijeg snabdijevanja, u skladu sa cijenom električne energije i, indirektno, u skladu sa ostalim elementima mreže i
- pojavom električnog vozila kao potrošača autentičnih karakteristika, sa velikom snagom punjenja baterija i mogućnošću za skladištenje viškova energije iz elektroenergetskog sistema.

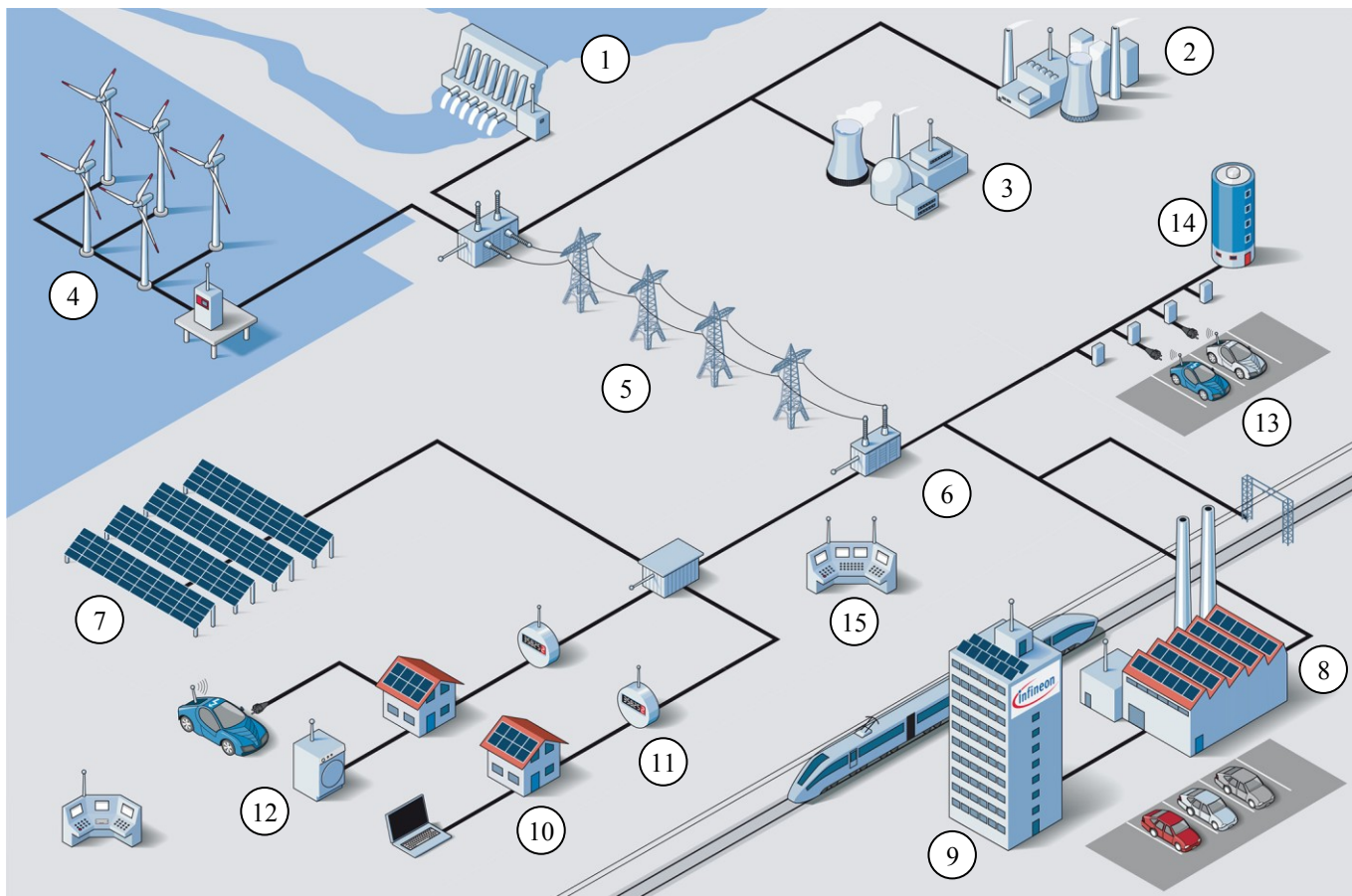
Svijet je prepoznao potrebu za osavremenjavanjem elektroenergetske mreže i ulaganja u ovaj sektor su se značajno povećala u posljednje vrijeme. Intenziviranjem upotrebe informacionih i komunikacionih tehnologija, tradicionalna elektroenergetska mreža se transformiše u inteligentnu (pametnu, naprednu) mrežu. Dosadašnji jednosmjerni tok energije od proizvođača ka potrošačima, pretvara se u dvosmjerni tok, kako energije tako i informacija. Koordinisano funkcionisanje svih subjekata u inteligentnoj mreži vodi ka efikasnom i održivom sistemu uz visok stepen kvaliteta i pouzdanosti snabdijevanja korisnika [1][2].

Poenta ovog rada je identifikacija trendova razvoja inteligentnih mreža u svijetu i istraživanje mogućnosti za primjenu u našem okruženju.

2. KOMPONENTE INTELIGENTNE MREŽE

Za sveobuhvatno sagledavanje koncepta inteligentne mreže korisna je slika 1. Najznačajnije komponente će biti opisane uz navođenje pozicije na slici.

U tradicionalnom elektroenergetskom sistemu proizvodnja energije bazirana je na centralizovanim elektranama velike snage izgrađenim u hidro (1), termo (2) ili nuklearnoj (3) tehnologiji. U novom konceptu, javljaju se takođe i velike elektrane realizovane u tehnologijama obnovljivih izvora energije, kao npr. velike farme vjetroelektrana (4). Energija se do potrošačkih centara prenosi visokonaponskom prenosnom mrežom (5). Prenosna mreža se u konceptu inteligentne mreže oprema savremenim uređajima kao što su npr. PMU (*Phasor Measurement Units*) ili FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) uređaji. To se radi s ciljem efikasnijeg korišćenja kapaciteta dalekovoda, smanjenja gubitaka i povećavanja pouzdanosti. Distributivni podsistem (6) je izložen najvećim promjenama. U savremenim mrežama se, osim centralizovane proizvodnje, pojavljuje i distribuirana proizvodnja (7) - elektrane relativno male snage, koje su na mrežu priključene na distributivnom naponskom nivou, u blizini potrošača. Takođe, i sami korisnici energije, industrijski (8), komercijalni (9) ili rezidencijalni (10), mogu da investiraju u sopstvene proizvodne kapacitete. Time im se otvara mogućnost da balansiraju između vlastite proizvodnje i kupovine energije od snabdjevača. Korisnici umjesto klasičnih brojila dobijaju "pametna" brojila (11) koja se umrežavaju u tzv. naprednu infrastrukturu za mjerenje (AMI - *advanced metering infrastructure*). Komunikacija postaje dvosmjerna, pa osim što snabdjevači očitavaju podatke o potrošnji, oni korisnicima šalju informacije o cijeni električne energije, daju statistiku potrošnje i savjete za uštedu. Određenim uređajima čije je vrijeme uključenosti fleksibilno (12), kao što su npr. bojleri, veš mašine, uređaji za grijanje i hlađenje, moguće je upravljati tako da se uključuju u periodima kada je cijena električne energije niža. Posebno karakterističan prijemnik energije je električno vozilo (13). Sa snagama i do pedesetak kilovata, električna vozila itekako utiču na vršnu snagu potrošnje i zakrčenje kapaciteta distributivne mreže. S druge strane baterije električnih vozila, predstavljaju alternativu za skladištenje energije u dužim periodima parkiranosti. Skladištenje energije je veoma važno s obzirom da proizvodnja iz obnovljivih izvora najčešće ne koincidira sa potrebama potrošnje. Na primjer, fotonaponski paneli najviše proizvedu oko podneva, a vršna snaga potrošnje se javlja u sumrak. Iz tog razloga se u sistem povezuju i posebni uređaji za skladištenje energije (14), koji pomažu oko balansiranja između proizvodnje i potrošnje, povećavaju ekonomsku efikasnost i pouzdanost. Očigledno je da moderna mreža postaje veoma kompleksan sistem i da su za optimalno koordinisanje svih njenih učesnika potrebni najsavremeniji upravljački informaciono-komunikacioni resursi (15).



Sl. 1. Komponente inteligentne mreže (www.infineon.com).

3. TRENDOVI RAZVOJA

3.1. Metodologija istraživanja

S obzirom da obim istraživanja pokriven ovim radom nije suviše veliki, za reference su traženi izvori od najvećeg povjerenja. Najmodernije implementacije u svijetu su praćene u dokumentima koje izdaju tijela koja prave izvještaje za npr. Evropsku komisiju ili Kongres SAD. Zatim su korišćeni internet sajtovi uticajnih asocijacija, visokobudžetnih projekata i vodećih svjetskih kompanija iz oblasti inteligentnih mreža. Iz naučne sfere korišćeni su časopisi sa SCIE liste (npr. *Electric Power Systems Research* je cijelo izdanje 120 iz marta 2015. godine posvetio implementacijama inteligentnih mreža u svijetu), te zbornici radova sa vodećih konferencija.

Situacija u našoj zemlji je istraživana pregledom internet stranica bitnih učesnika u elektroenergetskom sistemu, dakle regulatorne agencije, operatora sistema, prenosne kompanije i distributivnih kompanija. Pregledan je set skorije raspisanih tendera. Na kraju, neizbježno je intervjuisanje inženjera koji rade na poslovima koji se tiču implementacije inteligentne mreže.

3.2. Evropa

Evropska Unija je čvrsto orijentisana ka razvoju inteligentne elektroenergetske mreže, što potvrđuje niz direktiva [3]. Najnoviji izvještaj urađen u Institutu za energiju i transport JRC-a Evropske komisije potvrđuje da aktuelna baza broji 459 projekata u oblasti inteligentnih mreža [4]. Od navedenog broja 211 projekata pripada grupi istraživačkih i

razvojnih projekata (*Research and Development - R&D*), dok je 248 projekata iz grupe demonstracionih i fizički postavljenih (*Demo and Deployment - D&D*). Budžeti prevazilaze 830 miliona evra kod R&D i 2,3 milijardi evra kod D&D grupe projekata. Autori izvještaja se ograđuju da postoje i drugi projekti u EU koji zbog nedostatka podataka kasne sa evidentiranjem u bazu. Evidentirani projekti su bez izražene pravilnosti distribuirani po Evropi i različite zemlje su na drugačiji način rasporedile fokus na pojedine aspekte inteligentne mreže.

Projekat *Grid4EU* se navodi kao najskuplji projekat iz oblasti inteligentnih mreža kojeg finansira Evropska Unija [5]. Ukupan budžet projekta je 54 miliona evra. Nosioci projekta su 6 operatora distributivnih sistema koji pokrivaju 50% potrošača električne energije u Evropi (*ERDF, Enel Distribuzione, Iberdrola, CEZ Distribuce, Vattenfall Eldistribution i RWE*). Cilj projekta je da se u četvorogodišnjem periodu testiraju potencijali inteligentne mreže u pogledu integracije obnovljivih izvora energije i električnih vozila u sistem, automatizacije mreže, skladištenja električne energije, poboljšanja energetske efikasnosti i kontrole opterećenja. Dosadašnji rezultati projekta su opisani u više od 80 publikacija [6].

I ostali, uslovno rečeno jeftiniji projekti, su takođe izrodili niz zaključaka, koji su javno publikovani i koji mogu poslužiti kao korisne smjernice za naredne korake. Rezultati i diskusije su date na primjer o cjelovitom konceptu inteligentne mreže [7][8], naprednoj infrastrukturi za mjerenje [9], integraciji obnovljivih izvora energije [10], upravljanju potrošnjom [11], skladištenju energije [12][13], integraciji električnih vozila [14], itd.

U implementaciji u realnim mrežama najviše je postignuto u segmentu inteligentnih brojila. Prema direktivi 2009/72/EC Evropske komisije, od država članica je traženo da provedu analizu isplativosti, te da se procedura uvođenja inteligentnih brojila pokrene tamo gdje rezultati analize budu pozitivni. Postavljen je cilj da do 2020. godine udio inteligentnih brojila u ukupnom broju dostigne 80%. Evropska komisija u svojim dokumentima izvještava da je zadovoljna sa progresom [15], dok postoje i primjeri kalkulacija nezavisnih institucija u kojima se tvrdi da je korist od prelaska na inteligentna brojila daleko manja od obećane i rentabilne [16]. Finska, Italija i Švedska prednjače sa 45 miliona instaliranih inteligentnih brojila do 2014. godine, što je oko 23% od cilja predviđenog za 2020. godinu. U još 13 zemalja (npr. Austriji, Danskoj, Francuskoj, Grčkoj, itd.) rezultat ekonomske opravdanosti je bio pozitivan, tako da će se proces uvođenja inteligentnih brojila pokrenuti ili je već pokrenut. Kod 7 zemalja (među njima Njemačka, Češka, Portugal, i dr.) analiza isplativosti je bila negativna i inteligentna brojila će biti instalirana eventualno samo kod odabranih grupa korisnika.

3.3. Sjedinjene Američke Države (SAD)

Uz Evropu, veliki pokretač razvoja tehnologija inteligentnih mreža, definitivno jeste i SAD. Paket mjera za izlazak iz recesije, poznat pod originalnim nazivom *American Recovery and Reinvestment Act of 2009 (ARRA)*, značajno je podržao napredak u ovoj oblasti [17]. Tokom četvorogodišnjeg perioda (2010-2013) potrošeno je oko 18 milijardi dolara na postavljanje različite opreme, pri čemu su investicije javnog i privatnog sektora pod okriljem ARRA paketa iznosile oko 8 milijardi dolara. Četiri aspekta inteligentnih mreža su najviše razvijeni u aktuelnom trenutku: napredna infrastruktura za mjerenje, tehnologije upravljanja potrošnjom na strani korisnika, upravljanje distributivnom mrežom i upravljanje prenosnom mrežom.

Slično kao i u Evropi, ispred svega se ističe visok stepen implementacije inteligentnih brojila, pripadajuće komunikacione infrastrukture i informaciono-upravljačkih sistema. Procjenjuje se da će do kraja 2015. godine broj inteligentnih brojila dostići 65 miliona, što predstavlja više od trećine od ukupnog broja. Ističu se pozitivni efekti kako za korisnike, koji dobijaju sugestije za efikasniju potrošnju energije, tako i za snabdjevače kojima se olakšava adekvatno iskorišćavanje elektroenergetske mreže.

Tehnologije upravljanja potrošnjom na strani korisnika takođe predstavljaju uspješan segment inteligentne mreže. Programabilni termostati u domaćinstvima i sistemi za energetske menadžment komercijalnih i industrijskih korisnika preuzimaju od inteligentnih brojila informacije o cijeni električne energije i raspoređuju korišćenje energije na vremenskom horizontu. Navodi se pozitivni primjer iz kompanije *Oklahoma Gas and Electric* gdje se sadejstvom tarife sa vremenski promjenljivom cijenom energije i uređaja za upravljanje potrošnjom postiglo odgađanje investiranja u elektranu od 170MW, koja je bila potrebna za pokrivanje vršnih opterećenja [17].

Treći značajan segment inteligentne mreže je napredna automatizacija u distributivnom podsistemu. Integracija senzorskih, komunikacionih i upravljačkih tehnologija poboljšava pouzdanost i efikasnost rada. Posebni zadaci koji se uspješnije rješavaju su brže nalaženje kvarova,

kontrolisanje naponskog profila i tokova reaktivnih snaga, te praćenje stanja komponenata mreže i vođenje optimalnog održavanja.

Konačno, primjetan napredak se postiže i u oblasti uvođenja informaciono-komunikacionih tehnologija u mrežama najviših napona. Primjera radi, savremeni uređaji za sinhrofazorno mjerenje omogućavaju operatorima prenosnog sistema da mnogo brže reaguju na nestabilnosti napona i učestanosti u sistemu, a takođe im otvaraju mogućnost da u slučaju potrebe opterećenje prenosnih dalekovoda dovode do samih ivica tehničkih ograničenja.

3.4. Ostali karakteristični regioni u svijetu

U posljednjih nekoliko godina Kina dostiže i prestiže zapadne zemlje u raznim sferama, pa tako i u području razvoja inteligentnih mreža. Kao najmnogoljudnija zemlja na svijetu, Kina predstavlja ogromno tržište za elektro industriju. Izvještava se da je broj instaliranih inteligentnih brojila dostigao 370 miliona u 2013. godini, te se očekuje da će se do kraja 2015. godine dostići cifra od impozantnih 500 miliona ugrađenih primjeraka [19]. Brojila su domaće proizvodnje, a osim što se upotrebljavaju u Kini, izvoze se u 130 zemalja svijeta. Kina elektroenergetsku mrežu ojačava i u ostalim aspektima, od bazičnih komponenata kao što su konvencionalne elektrane i prenosni vodovi ultra visokih napona, do sofisticirane informaciono-komunikacione nadogradnje. Povećavanjem ulaganja iz godine u godinu, cilj Kine je da postane svjetski lider u oblasti inteligentnih mreža.

Indija je druga na listi najmnogoljudnijih zemalja i, slično kao i Kina, predstavlja ogroman poligon za razvoj inteligentne mreže. Od novijih tehnologija, Indija je posebno posvećena rapidnoj integraciji obnovljivih izvora energije i tehnologijama vezanim za interakciju mreže sa električnim vozilima [20]. S druge strane, u mnogim dijelovima zemlje, egzistiraju primarni problemi kao što su visoki gubici u prenosu i distribuciji, krađa energije, ili uopšte apsolutna nedostupnost mrežnog priključka za veliki procenat stanovništva.

Na kraju ovog kratkog pregleda, potrebno je još spomenuti zemlje azijsko-pacifičke zone Japan, Južnu Koreju i Australiju, te Kanadu iz sjevernoameričke [21].

3.5. Situacija kod nas

Nakon opisa trendova razvoja inteligentnih mreža u svijetu, slijedi kratak pregled aktuelnih karakteristika mreže u Republici Srpskoj i BiH. Ilustrativno je ponovo proći kroz komponente savremene mreže prikazane na slici 1 i povlačiti paralele između domaćih i svjetskih dostignuća.

Instalirani proizvodni kapaciteti u RS i BiH su izgrađeni u hidro i termo tehnologiji i stari su barem 25 godina. Trenutno su u stanju da pokriju potrebe našeg konzuma i da čak ostvaruju izvoz, ali zbog zastarijevanja i lošeg ekološkog stanja termoelektrana, potrebno je misliti na investiranje u nove elektrane. Investiranje u proizvodne kapacitete bazirane na obnovljivim izvorima energije nije trenutno isplativo, s obzirom da je cijena električne energije u BiH praktično najjeftinija u Evropi. Profitabilnost za investitora postiže se jedino uz pomoć podsticaja u vidu *feed-in* tarifa, ali iznos ovih podsticaja je veoma limitiran, jer predstavlja dodatni namet siromašnom stanovništvu. Iz tog razloga, stepen integracije obnovljivih izvora energije je skroman u

poređenju sa svjetskim liderima. Takođe, još se ne nameće potreba za koordinisanim djelovanjem obnovljivih izvora sa potrošnjom i tržištem.

Prenosna mreža je, slično elektranama, izgrađena prije ratnih godina 1991-1995. Zbog pada industrijske proizvodnje i smanjenja potrošnje električne energije, mnogi prenosni vodovi najvišeg napona su slabo opterećeni i uglavnom rade daleko od granica stabilnosti i maksimalne prenosne moći. Trenutno ne postoji prijeka potreba za ulaganje u napredne sisteme mjerenja i upravljanja na prenosnom nivou (PMU, FACTS, i sl.). Komunikaciona mreža je razvijena, s obzirom da su važniji dalekovodi opremljeni zemljovodnim uzadima koje sadrže optičke vodove (OPGW).

U distributivnom podsistemu situacija je nepovoljnija od situacije opisane za prenosnu mrežu. Distributivni vodovi su procentualno više opterećeni i daleko su više izloženi kvarovima. Vrijednosti pokazatelja pouzdanosti su trenutno ispod standarda koji se zahtijevaju od modernih mreža. Na primjer, u tabeli 1 je prikazan standard postavljen za inteligentnu mrežu u okolini Milana, Italija, za pokazatelje SAIFI (prosječan broj prekida po korisniku godišnje za mrežu) i SAIDI (prosječno trajanje isključenja po korisniku godišnje za mrežu) [7]. Da je ovaj standard visok za situaciju u BiH pokazuje izvještaj sačinjen u Elektroprivredi BiH, u kojem pokazatelji za SN mrežu u 2012. godini iznose 8,75 prekida po korisniku godišnje za SAIFI i 713,24 minuta isključenja po korisniku godišnje za SAIDI.

Tabela 1: Standard pouzdanosti u SN mreži
A2A Reti Elettriche, Italija

Oblast	SAIFI [prek/kor/god]	SAIDI [min/kor/god]
Gradska	1	25
Prigradska	2	40
Ruralna	4	60

Posebno su kritični dijelovi mreže u ruralnim oblastima, gdje su pokazatelji pouzdanosti daleko ispod sistemskog prosjeka, u kojima vrijeme isključenja po korisniku nerijetko iznosi i više stotina sati godišnje. Da je ovaj problem prepoznat od menadžmenta distributivnih kompanija, u prilog govore činjenice da su u 2015. godini raspisani tenderi za nabavku sistema za upravljanje i nadzor u distributivnim mrežama (SCADA/DMS) sa neizostavnom komponentom OMS (engl. *Outage Management System* - sistem za upravljanje ispadima), praktično kod sve tri elektroprivrede u BiH.

U posljednjih nekoliko godina određen napredak je postignut u oblasti infrastrukture za mjerenje potrošnje energije. Kod značajnijih korisnika ugrađena su brojlara nove generacije koja posjeduju mogućnost daljinskog očitavanja (engl. AMR - *Automatic Meter Reading*). Set podataka koji se očitava proširen je, pa je osim potrošene aktivne energije moguće očitavati i dodatne podatke kao što su npr. vršna snaga, aktivna i reaktivna energija na nivou 15 minuta, faktor snage i slično. Eventualno je aktivirana i mogućnost daljinskog isključivanja. Autorima nije poznato da su do današnjeg trenutka ugrađivana inteligentna brojlara koja bi utrošak energije obračunavala u realnom vremenu, odnosno koja bi mogla da vrše uključivanja pojedinih prijemnika u intervalima kada je energija jeftinija (AMI).

Takođe, ne postoje primjetne akcije vezane za uvođenje najnaprednijih funkcija inteligentnih mreža - integraciju električnih vozila, integraciju sistema za skladištenje energije i uređaja za upravljanje potrošnjom na strani korisnika.

4. ZAKLJUČAK

Današnje elektroenergetske mreže nalaze se pred velikim izazovima, s obzirom da je potrebno da usvoje nove aspekte kao što su na primjer integracija obnovljivih izvora energije, distribuirane proizvodnje, sistema za skladištenje energije, sistema za upravljanje potrošnjom, električnih vozila i slično. Razvijene zemlje su prepoznale ovaj problem i sve veća finansijska sredstva se alociraju za projekte iz oblasti savremenih inteligentnih mreža. U našem okruženju, u skladu sa razlikom u stepenu razvoja, ulaganja su značajno manja. Bez obzira na sve, transformacija tradicionalne mreže u inteligentnu mrežu je neminovnost i potrebno je osnažiti akcije na ovom polju. U aktuelnom trenutku akcenat treba staviti na automatizaciju distributivnog podsistema sa ciljem povećanja pouzdanosti i kvaliteta snabdijevanja korisnika. Na taj način bi se najbrže i sa najmanjim ulaganjima postigli najveći pozitivni efekti. U drugoj fazi treba računati sa razvojem i ostalih komponentata inteligentne mreže, koje će se, iako uz određeno kašnjenje, neizostavno nametnuti i kod nas kao potreba.

5. ZAHVALNICA

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske u okviru projekta INGRID.

6. LITERATURA

- [1] M. G. Morgan, J. Apt, L. B. Lave, M. D. Ilic, M. Sirbu, and J. M. Peha, "The many meanings of smart grid", Tech. Rep., Carnegie Mellon University, July 2009.
- [2] A. Carvallo and J. Cooper, "The Advanced Smart Grid: Edge Power Driving Sustainability," Norwood: Artech House, 2011.
- [3] M. A. Brown and S. Zhou, "Smart-Grid Policies: An International Review," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 2, no.2, pp. 121-139, 2013.
- [4] C. F. Covrig, M. Ardelean, J. Vasiljevskaa, A. Mengolini, G. Fulli, and E. Amoiralis, "Smart Grid Projects Outlook 2014," European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, 2014.
- [5] L. Bertling Tjernberg, "The Smart Grid Experience in Europe," IEEE Smart Grid Newsletter, August 2014.
- [6] The Grid4EU project, "Publication & articles," [Online]. <http://www.grid4eu.eu/dissemination/publications.aspx>
- [7] M. Delfanti, E. Fasciolo, V. Olivieri, and M. Pozzi, "A2A project: A practical implementation of smart grids in the urban area of Milan," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 2-19, March 2015.
- [8] C. Gouveia, D. Rua, F. J. Soares, C. Moreira, P. G. Matos, and J. A. Peças Lopes, "Development and implementation of Portuguese smart distribution system,"

- Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 150-162, March 2015. [15] European Commission, "Benchmarking smart metering deployment in the EU-27 with a focus on electricity," Report from the Commission, June 2014.
- [9] G. López, J. I. Moreno, H. Amarís, and F. Salazar, "Paving the road toward Smart Grids through large-scale advanced metering infrastructures," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 194-205, March 2015. [16] T. Zgajewski, "Smart electricity grids: A very slow deployment in the EU," Egmont Paper No. 74, The Royal Institute for International Relations, Brussels, Belgium, February 2015.
- [10] G. Bianco, C. Noce, and G. Sapienza, "Enel Distribuzione projects for renewable energy sources integration in distribution grid," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 118-127, March 2015. [17] US Department of Energy, "2014 Smart Grid System Report," Report to Congress, August 2014.
- [11] E. Karfopoulos, L. Tena, A. Torres, Pep Salas, Joan Gil Jorda, A. Dimeas, and N. Hatziaargyriou, "A multi-agent system providing demand response services from residential consumers," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 163-176, March 2015. [18] JP EPBiH, "Godišnji izvještaj 2012," Sarajevo, 2013.
- [12] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson, "Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 128-135, March 2015. [19] Research in China, "China Smart Meter Industry Report, 2014-2018," Report, October, 2014.
- [13] S. Barsali, M. Ceraolo, R. Giglioli, and D. Poli, Storage applications for Smartgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 109-117, March 2015. [20] Ministry of Power - Government of India, "Smart Grid Vision and Roadmap for India," Report, August, 2013.
- [14] D. Sbordone, I. Bertini, B. Di Pietra, M.C. Falvo, A. Genovese, and L. Martirano, "EV fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 96-108, March 2015. [21] Global Smart Grid Federation, "2012 Report," Report, 2012.

Abstract – The use of modern information and communication technologies makes it possible to transform the traditional power grid in the so-called smart grid. The advanced control systems coordinate all the entities participating in the modern grid (demand response, smart meters, distributed generation, energy storage, electric vehicles, etc.) and thus provide efficient and sustainable surroundings for reliable and quality supply of electricity consumers. The aim of this study was to identify trends in the development of smart grids in the world and explore possibilities for use in our environment.

THE SMART GRID IMPLEMENTATION TRENDS

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Đorđe Lekić

DEMONSTRACIJA UPOTREBE LOKATORA KVAROVA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Predrag Mršić, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković, *Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci*

Sadržaj – Većina subjekata i pravnih lica koja kupuju električnu energiju zahtijevaju da znaju koliko pouzdano će biti napajanje električnom energijom i traže da se zadovolji određeni nivo pouzdanosti. Najveći broj kvarova u elektroenergetskom sistemu, koji uzrokuju prekid napajanja krajnjih potrošača, dešava se u distributivnoj mreži. U radu je razmatran način za povećanje pouzdanosti napajanja krajnjih potrošača ugradnjom lokatora kvarova u distributivnu mrežu. Analiza pouzdanosti napajanja izvršena je na primjeru realne 20 kV distributivne nadzemne mreže.

1. UVOD

Osnovni zadatak elektroenergetskog sistema je da pouzdano, sigurno i ekonomično napaja potrošače električnom energijom [1]. U elektroenergetskom sistemu koji se danas koristi nisu se dešavale veće promjene više od 100 godina. Međutim, rast populacije i povećanje potreba za električnom energijom, globalne klimatske promjene, smanjenje resursa za konvencionalne elektrane i pojava obnovljivih izvora električne energije, te razvoj naprednih komunikacionih tehnologija dovodi do promjena u elektroenergetskom sistemu i pojave inteligentnih elektroenergetskih mreža (*Smart Grids*) [2].

Inteligentne mreže su elektroenergetske mreže koje koriste digitalne i ostale napredne tehnike za nadzor i upravljanje elektroenergetskim sistemom kako bi se smanjili troškovi prenosa električne energije, a povećala pouzdanost i sigurnost napajanja krajnjih potrošača [3] -[5].

Potrošači električne energije, zbog svog položaja u elektroenergetskom sistemu, trpe prekide napajanja usljed kvarova u bilo kom dijelu elektroenergetskog sistema. Zbog različite konfiguracije prenosne i distributivne mreže, ispostavlja se da se 94% kvarova, koji uzrokuju prekid napajanja krajnjih potrošača dešava u distributivnoj mreži [6].

Postoje dva načina da se poveća pouzdanost napajanja krajnjih korisnika električnom energijom. Jedan način je da se smanji broj prekida napajanja potrošača u toku godine, što je direktno vezano sa novim investicijama i mijenjanjem konfiguracije same mreže. Drugi način je da se smanji vrijeme trajanja prekida napajanja. Jedan od mehanizama za smanjenje vremena trajanja prekida napajanja je ugradnja lokatora kvarova [7].

Lokatori kvarova treba da daju informaciju operateru da li je struja kvara protekla vodom na kome se nalazi lokator ili ne. Dobijanjem ove informacije smanjuje se vrijeme izolacije mjesta kvara, a sa tim i vrijeme prekida napajanja potrošača koji nisu ugroženi kvarom. Lokatori kvarova mogu biti dizajnirani da informaciju o struji kvara prikazuju lokalno ili da je šalju operateru u SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) sistem [7].

U ovom radu će biti demonstrirana upotreba lokatora kvarova na nadzemnoj distributivnoj 20 kV mreži preko

pokazatelja pouzdanosti: srednjeg broja prekida napajanja potrošača u toku godine (SAIFI), kumulativnog vremena trajanja prekida napajanja jednog potrošača (SAIDI), prosječnog vremena trajanja jednog prekida (CAIDI) i neisporučene električne energije (ENS) [1]. Realni podaci o mreži preuzeti su od kompanije ZP „Elektrokrajina” a.d. Banja Luka.

2. METODOLOGIJA

Distributivne mreže obično imaju jedan prekidač i više rastavljača. Ugradnjom lokatora kvarova ne može se uticati na broj prekida napajanja krajnjih potrošača, nego samo na trajanje prekida. Vrijeme trajanja prekida se može izračunati kao zbir vremena potrebnog da se otkrije kvar i vremena potrebnog da se popravi kvar:

$$T = T_{tk} + T_p. \quad (1)$$

Na vrijeme popravke kvara lokator kvara ne može uticati, ali utiče na vrijeme traženja kvara. Na primjer, neka je prosječno vrijeme traženja kvara 3 h, za mrežu prikazanu na slici 1. Ugradnjom lokatora kvara vrijeme traženja kvara se smanjuje proporcionalno dužini vodova ispred i iza lokatora:

$$T_{tk1} = \frac{7}{7+8} \cdot 3 = 1,4 \text{ h}, \quad (2)$$

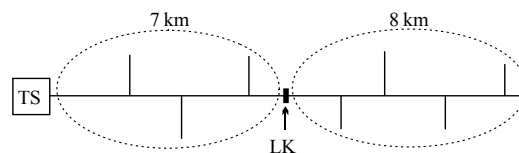
$$T_{tk2} = \frac{8}{7+8} \cdot 3 = 1,6 \text{ h}. \quad (3)$$

Generalno, ako se u distributivnu mrežu ugradi n lokatora kvarova, mreža je podijeljena na (n+1) dijelova i vrijeme traženja kvara u svakom od dijelova je [8], [9]:

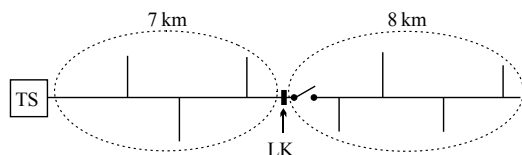
$$T_{tk(i)} = T_{tk} \frac{L_i}{\sum_{j=1}^{n+1} L_j}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, (n+1), \quad (4)$$

gdje je L_i dužina vodova između dva ili više lokatora kvarova.

U slučaju da je lokator kvara ugrađen ispred rastavljača, kao na slici 2, onda vrijeme traženja kvara zavisi od lokacije potrošača koji se posmatra. Za potrošače koji su priključeni na distributivnu mrežu između transformatorske stanice i lokatora kvara, vrijeme traženja kvara za kvarove koji se dogode iza lokatora kvara jednako je nuli, jer se odmah po nastanku kvara zna da je kvar na vodu iza rastavljača. Ovdje se smatra da su rastavljači 100% pouzdani.



Sl. 1. Distributivna mreža sa jednim lokatorom kvarova



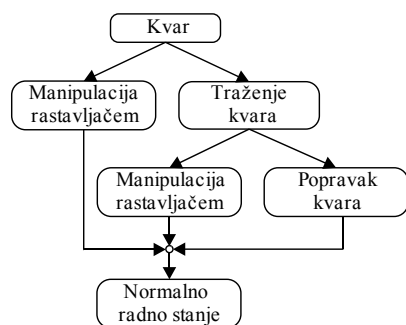
Sl. 2. Distributivna mreža sa rastavljačem i lokatorom kvara

Za potrošače koji su priključeni na distributivnu mrežu iza rastavljača, vrijeme traženja kvara računa se po formuli (3) za primjer sa slike 2, odnosno u opštem slučaju po formuli (4). Vrijeme popravke kvara, također, zavisi od lokacije potrošača u odnosu na lokator kvara. Ako je potrošač priključen na distributivnu mrežu prije rastavljača i ako se kvar desi iza rastavljača, vrijeme popravke kvara je vrijeme koje je potrebno osoblju da ode do rastavljača i izvrši manipulaciju. Naravno, ovdje se smatra da postoji lokator kvara koji će dati informaciju da li je kvar ispred ili iza rastavljača. U opštem slučaju, vrijeme popravke kvara može biti jednako vremenu potrebnom da se izvrši manipulacija rastavljačem ili stvarnom vremenu potrebnom da ekipa popravi kvar.

Na osnovu prethodnih primjera i teorije, može se napraviti set akcija koje treba izvršiti nakon pojave kvara kako bi se u najkraćem roku uspostavilo ponovno napajanje svih potrošača u nekoj mreži:

- 1) Ako u mreži postoje lokatori kvarova potrebno je izvršiti manipulacije rastavljačima kako bi se izolovala zona, dio mreže omeđen lokatorima kvarova, na kojoj je nastao kvar i vratilo napajanje ostatku mreže, ako je to moguće.
- 2) Zatim, potrebno je locirati kvar i izvršiti manipulaciju rastavljačima kako bi se ponovo uspostavilo napajanje dijela potrošača, u zoni koja je prethodno izolovana, koji nisu ugroženi kvarom.
- 3) I na kraju, nakon popravke kvara, uspostaviti napajanje ostatku potrošača u mreži.

Algoritam po kome se određuje vrijeme trajanja prekida napajanja, bilo kog potrošača, za bilo koji kvar u mreži prikazan je na slici 3. Vrijeme prekida napajanja za bilo koji potrošač se dobija sabiranjem vremena odgovarajućih stanja kroz koje je potrebno proći da bi se došlo do normalnog radnog stanja.



Sl. 3. Algoritam za određivanje trajanja prekida napajanja bilo kog potrošača u mreži

3. REZULTATI PRORAČUNA

Demonstracija upotrebe lokatora kvarova u cilju povećanja pouzdanosti napajanja potrošača sprovede se na primjeru jedne distributivne nadzemne 20 kV mreže. Jednopolna šema, sa dužinama vodova i oznakama potrošača prikazana je u dodatku ovog rada. Prosječno vrijeme za

nalaženje kvara, manipulaciju rastavljačem i popravku kvara su 13 h, 0,5 h i 12 h, respektivno. Učestanost otkaza je 0,2 1/(km·god) i smatra se da je ista za sve vodove. Podaci o srednjim snagama opterećenja i broju priključenih potrošača dati su u tabeli 1. Uticaj lokatora kvarova na pouzdanost ovog sistema izvršice se kroz dva proračuna.

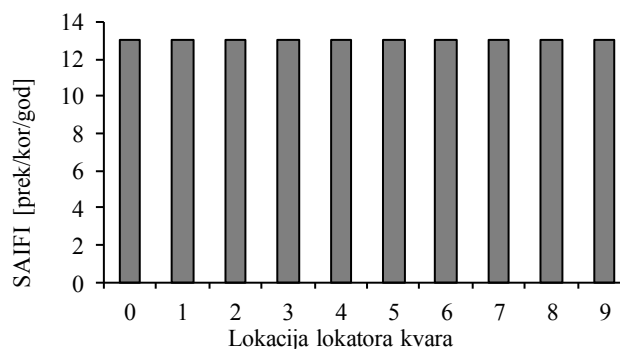
Tabela 1 - Prosječne snage i broj potrošača na svakom od priključaka

Priključak	Broj potrošača	Srednja snaga
P ₁ , P ₁₃	269	112,24 kW
P ₅ - P ₇	171	71,27 kW
P ₈ , P ₂₃	106	44,54 kW
P ₂ - P ₄ , P ₉ - P ₁₂ , P ₁₄ - P ₂₂ , P ₂₄ - P ₂₉ , P ₃₁ - P ₃₄ , P ₃₆ , P ₃₇ , P ₃₉ - P ₄₁ , P ₄₃ , P ₄₅ , P ₄₇ , P ₅₀ , P ₅₃ - P ₅₆ , P ₅₈ , P ₆₀ , P ₆₁	68	28,51 kW
P ₂₇ , P ₃₀ , P ₃₅ , P ₃₈ , P ₄₂ , P ₄₄ , P ₄₆ , P ₄₈ , P ₄₉ , P ₅₇ , P ₅₉	42	17,82 kW
P ₅₁ , P ₅₂	21	8,91 kW

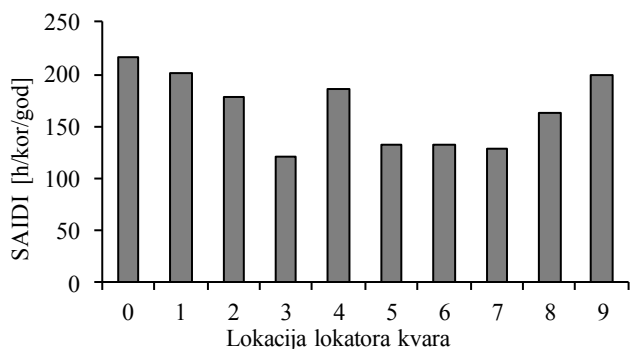
3.1. Proračun A

U ovom proračunu analizira se uticaj jednog lokatora kvara postavljenog na nekoliko lokacija u mreži. Zatim, uticaj više lokatora kvarova postavljenih na prethodno označena mjesta u mreži. Pri tome se ne vrši optimizacija izbora mjesta postavljanja lokatora kvara. Lokacija lokatora kvara označena sa nulom na jednopolnoj šemi ne postoji, ona predstavlja stanje u mreži bez lokatora kvarova.

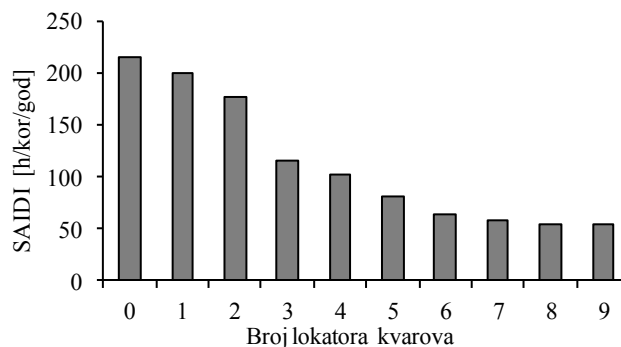
Na slici 4 prikazan je srednji broj prekida napajanja potrošača za analiziranu mrežu. On ne zavisi od broja ni mjesta postavljanja lokatora kvara jer u mreži postoji samo jedan prekidač koji isključuje napajanje svim potrošačima u slučaju kvara. Međutim, prosječno kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača u toku godine zavisi od mjesta ugradnje lokatora kvara. Za mrežu analiziranu u ovom radu, izabrano je devet mogućih lokacija za postavljanje lokatora kvarova na osnovu čega je dobijena slika 5. Ispostavlja se da je lokacija 3 optimalno mjesto za postavljanje jednog lokatora kvara u mrežu, čime se SAIFI smanjuje sa 216 h/god na približno 121 h/god ili za 43,85 %. Prosječno vrijeme trajanja jednog prekida prikazano je na slici 6. Takođe, i ono zavisi od mjesta ugradnje lokatora kvara. Za optimalnu lokaciju ugradnje lokatora kvara ono se smanjuje sa 16,60 h na 9,32 h ili za 43,85 %.



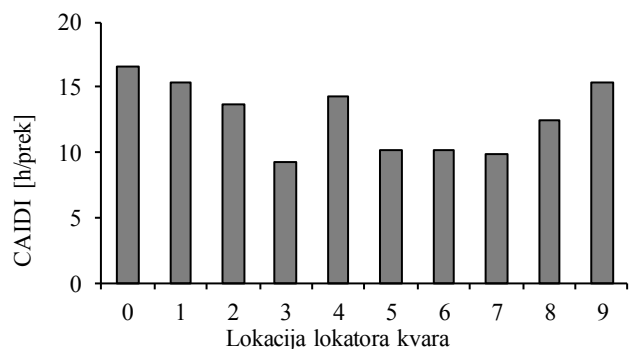
Sl. 4. SAIFI za proračun A sa jednim lokatorom kvara



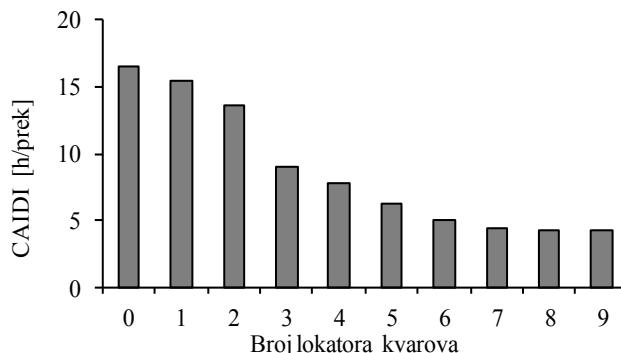
Sl. 5. SAIDI za proračun A sa jednim lokatorom kvara



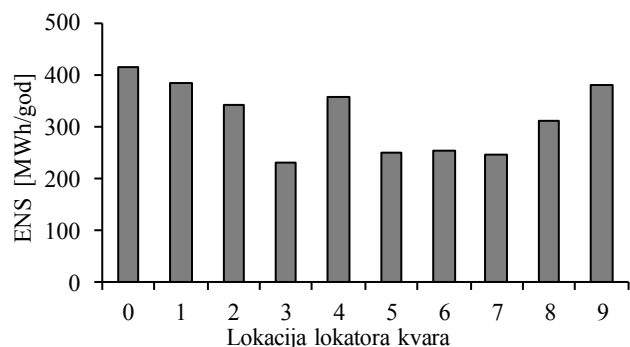
Sl. 8. SAIDI za proračun A sa više lokatora kvarova



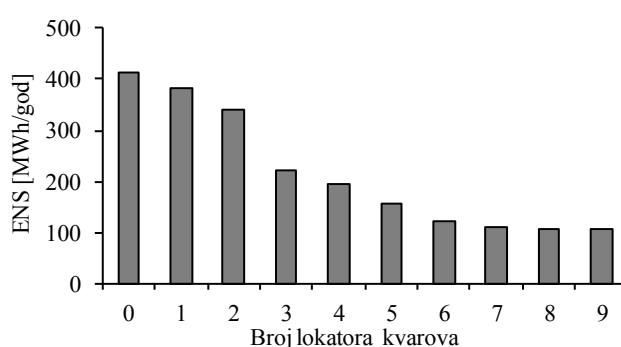
Sl. 6. CAIDI za proračun A sa jednim lokatorom kvara



Sl. 9. CAIDI za proračun A sa više lokatora kvarova



Sl. 7. ENS za proračun A sa jednim lokatorom kvara



Sl. 10. ENS za proračun A sa više lokatora kvarova

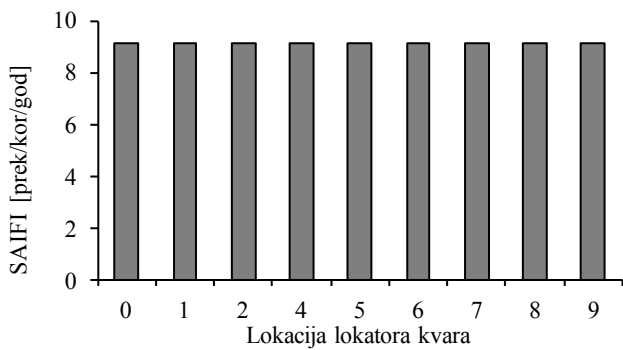
Prekid napajanja dovodi do smanjenja isporučene električne energije potrošačima i finansijskih gubitaka distributivnih preduzeća. Neisporučena električna energija je direktno vezana sa prosječnim vremenom trajanja prekida napajanja potrošača te se i ona mijenja zavisno od mjesta ugradnje lokatora kvara. Na slici 7 je prikazana promjena neisporučene električne energije pri promjeni mjesta ugradnje lokatora kvara. Ugradnjom lokatora kvara na optimalno mjesto, lokacija 3, ENS se smanjuje sa 412 MWh/god na 230 MWh/god ili za 44,17 %.

Ugradnjom većeg broja lokatora kvarova postiže se, naravno, bolji efekat u pogledu povećanja pouzdanosti napajanja. Slika 8 prikazuje smanjenje prosječnog vremena trajanja prekida napajanja jednog potrošača. Takođe, smanjenjem ovog vremena smanjuje se i CAIDI i ENS, koji su prikazani na slikama 9 i 10, respektivno. Sa slika 8-10 može se zaključiti da postoji optimalan broj lokatora kvarova koji se mogu ugraditi u neku mrežu da bi se povećala pouzdanost napajanja. Naime, ENS se smanjuje sa povećanjem broja lokatora kvarova, ali to smanjenje nije konstantno, povećanjem broja lokatora kvarova preko određene granice ENS se neznatno smanjuje.

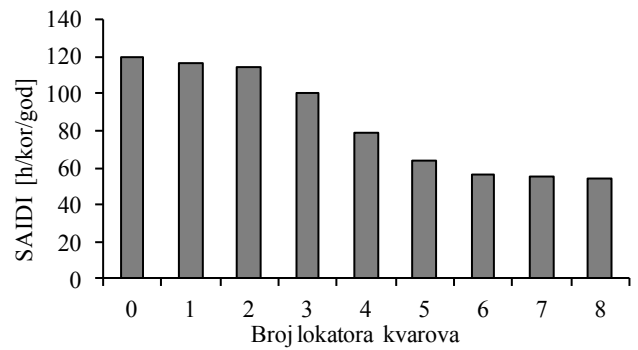
3.2. Proračun B

Proračun B analizira uticaj lokatora kvarova na pouzdanost napajanja potrošača kada se u mreži nalazi riklozer. U prethodnoj analizi je dokazano da je lokacija 3 optimalno mjesto za postavljanje lokatora kvara. Međutim, Elektrodistribucija je na to mjesto ugradila riklozer koji će donijeti još neke prednosti u odnosu na lokator kvara. Zbog postojanja riklozera, tj. još jednog prekidača sa odgovarajućom automatikom smanjuje se SAIFI za posmatranu mrežu, jer potrošači koji su priključeni između transformatorske stanice i riklozera, pri kvarovima koji se dogode iza riklozera, ne gube napajanje. Na slici 11 prikazan je SAIFI za mrežu koja sadrži riklozer i jedan lokator kvara postavljen na različita mjesta u mreži. Dakle, riklozer je smanjio SAIFI sa 13,2 na 9,14 prekida napajanja po potrošaču u toku godine.

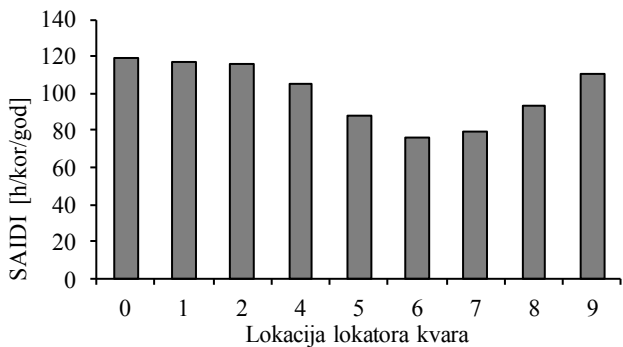
Ugradnjom lokatora kvarova, pored riklozera, postiže se smanjenje kumulativnog vremena trajanja prekida napajanja jednog potrošača u toku godine. Međutim, slika 12 pokazuje da neka mjesta nisu pogodna za postavljanje lokatora jer neznatno utiču na povećanje pouzdanosti.



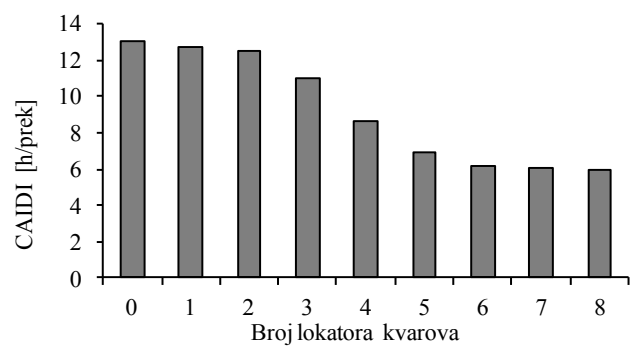
Sl. 11. SAIFI za proračun B sa jednim lokatorom kvara



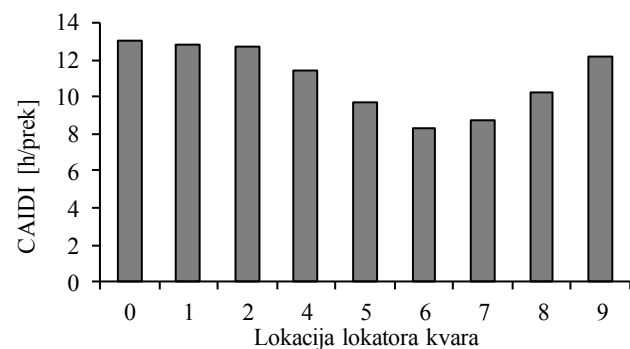
Sl. 15. SAIDI za proračun B sa više lokatora kvarova



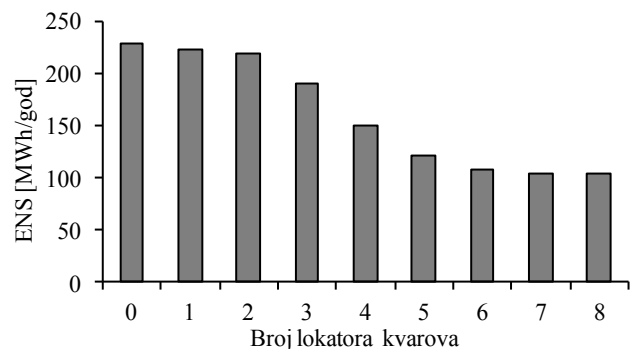
Sl. 12. SAIDI za proračun B sa jednim lokatorom kvara



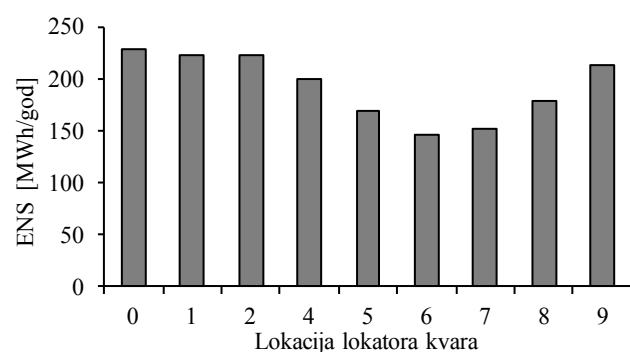
Sl. 16. CAIDI za proračun B sa više lokatora kvarova



Sl. 13. CAIDI za proračun B sa jednim lokatorom kvara



Sl. 17. ENS za proračun B sa više lokatora kvarova



Sl. 14. ENS za proračun B sa jednim lokatorom kvara

Dakle, optimalno mjesto za postavljanje lokatora kvara u ovom slučaju je lokacija 6 i tada se SAIDI smanjuje sa 120 h/god na 76 h/god ili za 36,7 %. Postavljanje lokatora kvara uticalo bi i na CAIDI, slika 13, koji bi se smanjio sa 13 h na 8,4 h ili 35,38 %. Smanjenje neisporučene električne energije ugradnjom lokatora kvarova prikazano je na slici 14. Za optimalno postavljen lokator kvara ostvaruje se smanjenje ENS od 83 MWh/god ili za 36,4 %.

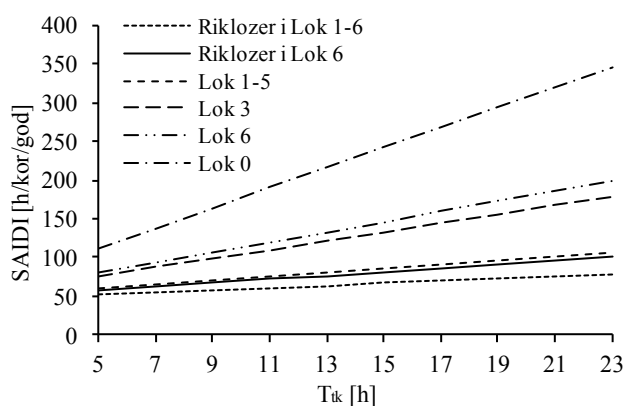
Postavljanjem više lokatora kvarova u mrežu, pored riklozera, postiže se bolja pouzdanost napajanja, ali treba

obratiti pažnju na mjesta i broj. Sa slike 15 i 16 vidi se da postavljanje lokatora kvarova na određene lokacije dovodi do većeg pada kumulativnog vremena trajanja prekida napajanja i prosječnog vremena trajanja jednog prekida, respektivno. Neisporučena električna energija se također, smanjuje sa povećanjem broja lokatora u mreži. Sa slike 17 se može vidjeti da postoji određena granica kada je neznatno smanjenje ENS, što opet dovodi do zaključka da postoji optimalan broj lokatora kvarova koji se mogu ugraditi u mrežu da bi se povećala pouzdanost napajanja.

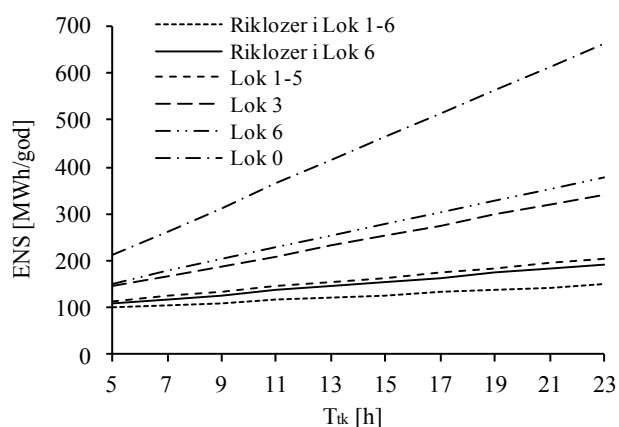
Na osnovu prethodne analize mogu se sumirati rezultati pouzdanosti u posmatranoj distributivnoj mreži. Prije ugradnje riklozera pouzdanost napajanja je iznosila 97,53 %. Ugradnjom riklozera pouzdanost je povećana na 98,637 % i ostvaren je prihod od 19200 KM/god na osnovu smanjenja ENS. Da je umjesto riklozera ugrađen lokator kvara pouzdanost bi se povećala na 98,615 % i ostvario prihod od 18734 KM/god. Smatra se da je vjerovatnoća pojave kvara ista tokom cijele godine, pa je za proračun prihoda korištena prosječna cijena zimske i ljetne tarife za domaćinstva sa jednotarifnim brojiлом [10]. Ugradnjom lokatora kvara, pored riklozera, pouzdanost se povećava na 99,13 % i ostvari se dodatni prihod od 8607 KM/god.

3.3. Osjetljivost parametara pouzdanosti na vrijeme traženja kvara

U ovom radu analiziran je uticaj lokatora kvara na pouzdanost napajanja potrošača. Jedini parametar na koji lokatori direktno utiču je vrijeme traženja kvara. Kako to vrijeme nije eksplicitno poznato, postavlja se pitanje šta se dešava sa rezultatima analize ako to vrijeme odstupa od usvojenog. Naravno, odstupanje vremena traženja kvara od usvojenog dovodi do greške u parametrima pouzdanosti. Međutim, sa slike 18 vidi se da je ta veza linearna i da se koeficijent pravca te funkcije smanjuje sa povećanjem broja lokatora kvarova. Dakle, vrijeme traženja kvara više utiče na tačnost pokazatelja pouzdanosti kada u mreži nema lokatora kvarova, nego kada oni postoje. U svakom slučaju, greška pri izboru ovog vremena itekako utiče na neisporučenu električnu energiju, slika 19, i finansijsku dobit od povećanja pouzdanosti napajanja potrošača. Ovo treba imati u vidu pri proračunu isplativosti ugradnje većeg broja lokatora kvarova u mrežu.



Sl. 18. SAIDI u funkciju prosječnog vremena nalaženja kvara za mrežu sa i bez riklozera i lokatora kvara



Sl. 19. ENS u funkciju prosječnog vremena nalaženja kvara za mrežu sa i bez riklozera i lokatora kvara

4. ZAKLJUČAK

U radu je opisana procedura za proračun vremena trajanja prekida za bilo koji potrošač u mreži koja sadrži lokatore kvarova. Demonstrirano je koliko se može povećati pouzdanost napajanja krajnjih potrošača ugradnjom lokatora kvarova. U ovom primjeru, pokazano je da se neisporučena električna energija može smanjiti i preko 40 %, tj. za nekoliko stotina MWh/god ugradnjom samo jednog lokatora kvara. Takođe, pokazano je da postoji optimalan broj

lokatora kvarova za određenu mrežu. U narednim radovima treba obratiti pažnju na algoritam za određivanje optimalnog broja i lokacija za postavljanje lokatora kvarova. Takođe, bilo bi dobro sprovesti detaljniju ekonomsku analizu isplativosti ugradnje riklozera i/ili lokatora kvarova u distributivnu mrežu.

5. ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju preduzeću *Elektrokrajina a.d. Banja Luka* na pruženoj pomoći pri izradi ovog rada. Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske u okviru projekta INGRID.

6. LITERATURA

- [1] R. Billinton, R. Allan, „Reliability Evaluation of Power Systems,” Plenum Press, New York, USA, 2006.
- [2] Ruth Lin, „The Smart Grid: A World of Emerging Technologies,” Wharton School, University of Pennsylvania, July 2011.
- [3] International Energy Agency, „Technology Roadmap, Smart Grids,” Smart Grids, 2011.
- [4] V.C. Gungör, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergüt, C. Buccella, C. Cecati and G. P. Hancke, „Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, November 2011.
- [5] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke, “Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid,” *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, October 2010.
- [6] Edison Electric Institute, „Underground vs. Overhead Distribution Wires: Issues to Consider,” May 2000.
- [7] J. Northcote-Green, R. Wilson, „Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems,” Vol. 28. CRC Press, 2006.
- [8] H.Falaghi, M.R.Haghifam, M.R.Osouali Tabrizi, „Fault Indicators Effects on Distribution Reliability Indices,” *Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on. IET*, 2005.
- [9] E. Vidyasagar, P.V.N. Prasad, A. Fatima, „Reliability Improvement of a Radial Feeder Using Multiple Fault Passage Indicators,” *Energy Procedia* 14 (2012): 223-228.
- [10] RERS [Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske], „Tarife,” <http://www.reers.ba/taxonomy/term/9>.

Abstract – Most people and companies who purchase electricity require to know how reliable power supply will be and demand a certain level of reliability. Most power outages are caused by faults in the distribution system. This paper analyzes the effects of using fault indicators in distribution network. Reliability assessment will be illustrated for typical 20 kV overhead distribution network.

DEMONSTRATION OF USING FAULT INDICATORS IN DISTRIBUTION NETWORK

Predrag Mršić, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković

PRORAČUN MAGNETNE INDUKCIJE U BLIZINI SREDNJE-NAPONSKIH NADZEMNIH VODOVA ZA POTREBE DETEKCIJE STRUJE KVARA

Dorđe Lekić, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, *Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci*

Sadržaj – U radu su istražene mogućnosti detekcije kratkih spojeva mjerenjem efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije u blizini srednjenaponskih distributivnih nadzemnih vodova. Predložen je potpun matematički model srednjenaponskog nadzemnog voda sa proizvoljnom geometrijom stubova, pogodan za proračun struja kratkih spojeva pojedinih faza i odgovarajućeg magnetnog polja. Na osnovu predloženog modela izvršen je proračun efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose stuba za različite kvarove na konkretnom distributivnom nadzemnom vodu nazivnog napona 20 kV na području opštine Banja Luka.

1. UVOD

Kvarovi u radijalnim distributivnim mrežama obično se isključuju prekidačima koji su ugrađeni u napojne transformatorske stanice, jer u takvim mrežama, sa izuzetkom reklozera, rijetko postoje drugi uređaji za prekidanje struje kvara [1]. Ukoliko kvar nije prolaznog karaktera i ne može se otkloniti primjenom tehnike automatskog ponovnog uključivanja (APU) ili u slučaju da mreža nije automatizovana, dolazi do prekida napajanja električnom energijom krajnjih potrošača. Trajanje prekida utiče na pokazatelje pouzdanosti sistema kao što su SAIDI (eng. *System Average Interruption Duration Index*) ili CAIDI (eng. *Customer Average Interruption Duration Index*) i u velikoj mjeri zavisi od vremena koje je potrebno da se kvar lokalizuje. Stoga se u savremene distributivne mreže ugrađuju tzv. lokatori ili indikatori kvara (eng. *FPI – Fault Passage Indicators*), čiji je zadatak da detektuju prolazak struje kvara kroz dionicu voda na kojoj su postavljeni [2]. Postavljanjem ovih uređaja na pogodne lokacije u radijalnoj distributivnoj mreži moguće je znatno ubrzati proces nalaženja mjesta kvara, koje se u tom slučaju nalazi između posljednjeg indikatora koji je detektovao prolazak struje kvara i prvog narednog koji nije detektovao prolazak struje kvara.

Struja kvara u srednjenaponskim distributivnim mrežama, u zavisnosti od tipa uzemljenja, može dostići vrijednosti i do 20 kA, tako da je direktno mjerenje ove struje nepraktično [1]. Iz navedenog razloga svi indikatori kvara indirektno mjere struju kvara posredstvom njenog magnetnog polja. Konvencionalni načini mjerenja podrazumijevaju upotrebu strujnih mjernih transformatora (SMT), u vidu obuhvatnih SMT-a za detekciju zemljospoja i/ili u vidu više SMT-a od kojih svaki obuhvata jedan fazni provodnik za detekciju međufaznih kvarova. Dok je postavljanje SMT-a pogodno za kablovske vodove, ono je izuzetno nepraktično za nadzemne vodove. Zbog toga se za detekciju kvara na srednjenaponskim distributivnim nadzemnim vodovima koriste indikatori koji mjere pokazatelje magnetnog polja u blizini faznih provodnika.

U praksi se sreću dvije varijante ovakvih indikatora: indikatori koji se postavljaju na same fazne provodnike i indikatori koji se postavljaju na stub dalekovoda na udaljenosti do 3 m ispod faznih provodnika [1]. U obje varijante lokalna indikacija prolaska struje kvara je u vidu svjetlosne signalizacije na samom indikatoru. Daljinska indikacija kvara podrazumijeva povezanost indikatora sa jedinicom udaljenih terminala (eng. *RTU – Remote Terminal Unit*) i sistemom za daljinsku komunikaciju koji su postavljeni na isti ili susjedni stub ili čak u isto kućište sa indikatorom [1].

Efektivna vrijednost vektora magnetne indukcije na mjestu postavljanja indikatora kvara će, zbog nesimetričnog rasporeda pojedinih faznih provodnika u odnosu na sam indikator, biti različita od nule čak i u slučaju normalnog, uravnoteženog režima rada. To pokazuju mnogobrojna istraživanja koja se uglavnom odnose na mjerenje i ispitivanje uticaja električnog i magnetnog polja u blizini nadzemnih vodova na zdravlje ljudi [3], [4]. IEEE (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) daje upute za mjerenje električnog i magnetnog polja u blizini nadzemnih vodova [5] dok ICNRP (eng. *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection*) propisuje graničnu vrijednost od 100 μ T na visini 1 m iznad zemlje, ispod dalekovoda u slučaju normalnog, uravnoteženog režima rada [6]. Sprovedena istraživanja, standardi i upute ukazuju na činjenicu da je vrijednost magnetne indukcije u blizini normalno opterećenog i uravnoteženog dalekovoda reda desetina mikrotlesli i da izuzetno brzo opada sa porastom rastojanja. Međutim, malobrojna istraživanja se odnose na proračun magnetnog polja u blizini nadzemnih vodova za slučaj različitih tipova kratkih spojeva [7]. Opravdano se postavlja pitanje mogućnosti detekcije razlika u vrijednosti magnetne indukcije za slučaj normalnog pogona i za slučaj kvara, a sa ciljem otkrivanja struje kvara pomoću senzora magnetnog polja postavljenog u blizini nadzemnog voda.

U ovom radu ispitana je mogućnost detekcije struje kvara mjerenjem efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije pomoću indikatora koji bi bio postavljen na stub ispod faznih provodnika srednjenaponskog nadzemnog voda. U poglavlju 2 predložen je potpun matematički model srednjenaponskog nadzemnog voda sa proizvoljnom geometrijom stubova, pogodan za proračun struja kratkih spojeva pojedinih faza i odgovarajućeg magnetnog polja. U poglavlju 3 dati su rezultati proračuna efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose stuba za različite kvarove na konkretnom distributivnom nadzemnom vodu nazivnog napona 20 kV na području opštine Banja Luka. U poglavlju 4 su navedeni zaključci i date su napomene koje se odnose na visinu postavljanja indikatora na stub, kao i na eventualne algoritme za detekciju kvara.

2. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model obuhvata izraze za proračun parametara nadzemnog voda, zatim faznih struja za različite tipove kratkih spojeva i, konačno, efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije koji potiče od tih struja. U ovom modelu biće zanemareni otočni parametri nadzemnog voda, s obzirom na to da oni ne utiču bitno na proračun struja kratkih spojeva. Uticaj ugiba faznih provodnika na vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda, kao i na efektivnu vrijednost magnetne indukcije u njegovoj neposrednoj blizini, će, takođe, biti zanemaren. Korekcija vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda se može izvršiti tako što se umjesto visine y_i vješanja i -tog provodnika na stub usvoji njegova srednja visina vješanja, data sljedećim izrazom [8]:

$$y_i^{sr} = y_i - \frac{2}{3} \cdot s, \quad (1)$$

u kome je s označen ugib provodnika. Alternativno, moguće je uzeti u obzir da se visina provodnika iznad zemlje, duž jednog raspona, mijenja po jednačini lančanice [8], [9]. Kako se visine stubova za srednjenaponske nadzemne vodove kreću od 10 m do 15 m, dok su rasponi relativno kratki i iznose oko 100 m, dobijaju se ugibi od svega par metara i njihov uticaj na vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda se može zanemariti [8]. U [9] je pokazano da ugib provodnika ima uticaj na magnetno polje samo u neposrednoj blizini faznih provodnika, dok se njegov uticaj na većim udaljenostima može zanemariti. Zato ćemo u svim proračunima smatrati da su fazni provodnici nadzemnog voda pravolinijski provodnici beskonačne dužine, postavljeni paralelno sa površinom zemlje. Sa udaljavanjem od faznih provodnika nadzemnog voda, sve veći uticaj na vrijednost magnetnog polja imaju indukovane struje u zemlji, kao geološkom provodniku, što je u proračunu uzeto u obzir uvođenjem fiktivnih povratnih provodnika, koji su postavljeni na određenim „kompleksnim“ dubinama ispod površine zemlje, prema teoriji Carson-a [10].

2.1. Model nadzemnog voda

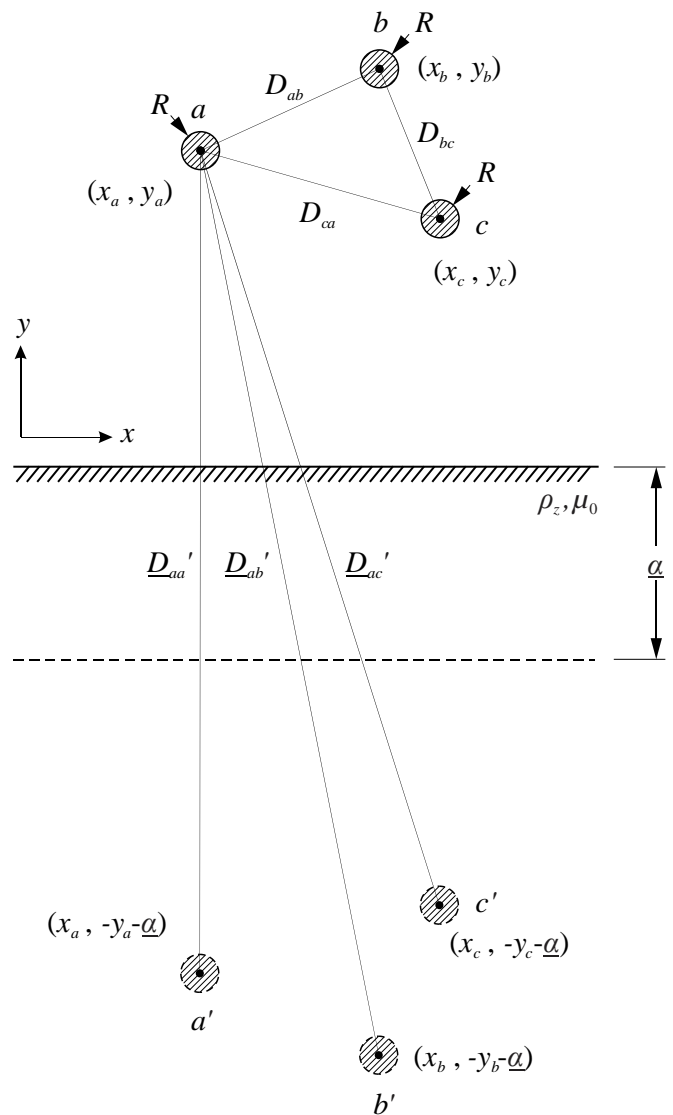
Model nadzemnog voda podrazumijeva izraze za proračun podužnih parametara nadzemnog voda za datu geometriju stuba, te formiranje matrice podužnih kompleksnih impedansi. Na Sl. 1 prikazan je raspored faznih provodnika i njihovih fiktivnih likova iznad i ispod površine zemlje, respektivno.

Međusobno rastojanje između provodnika i -te i j -te faze je, prema Sl. 1, dato sljedećim izrazom:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2)$$

gdje je $i, j = a, b, c$.

Fazni provodnici srednjenaponskih nadzemnih vodova su obično tako raspoređeni da međusobna rastojanja data izrazom (2) nisu jednaka za svaka dva fazna provodnika. Osim toga, za ovakve vodove se ne vrši transpozicija faznih provodnika, tako da će se u određenoj mjeri razlikovati i podužni parametri pojedinih faza, dok matrica podužnih kompleksnih impedansi neće biti ciklično simetrična [8].



Sl. 1. Raspored faznih provodnika nadzemnog voda i njihovih fiktivnih likova u odnosu na površinu zemlje

Kompleksno rastojanje provodnika faze i , odnosno j , prema fiktivnom liku provodnika faze j , odnosno i , dato je sljedećim izrazom [10]:

$$D_{ij}' = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j + \underline{\alpha})^2}, \quad (3)$$

gdje je $i, j = a, b, c$.

U izrazu (3) definisana je tzv. „kompleksna“ dubina prodiranja struje i magnetnog polja u zemlju, koja je označena na Sl. 1 i data sljedećim izrazom [9] – [11]:

$$\underline{\alpha} = \sqrt{2} \cdot \delta \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} = \delta \cdot (1 - j), \quad (4)$$

gdje je $\delta \approx 503 \cdot \sqrt{\rho_z / f}$.

Dubina prodiranja zavisi od specifične otpornosti zemljišta ρ_z , koja uzima vrijednosti od 10 Ωm do 1000 Ωm [9], te od frekvencije f . Uvrštavajući ove vrijednosti u izraz (4) zaključujemo da se fiktivni povratni provodnici nalaze više stotina metara ispod površine zemlje, što opet opravdava zanemarenje uticaja ugiba provodnika na vrijednosti podužnih parametara nadzemnog voda.

Na osnovu dimenzija označenih na Sl. 1 sopstvena podužna kompleksna impedansa petlje koju čine i -ti fazni provodnik i njegov fiktivni lik, izražena u Ω/km , data je sljedećim izrazom [11]:

$$\underline{z}_{ii} = r + r_z + j4\pi \cdot f \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{D_{ii}'}{R_e}\right), \quad (5)$$

gdje je D_{ii}' – kompleksno rastojanje i -tog faznog provodnika od njegovog fiktivnog lika, koje se dobija iz izraza (3), za $i = j$. U izrazu (5) r je podužna otpornost faznog provodnika u Ω/km , dok je r_z – podužna otpornost zemlje u Ω/km , koja prema Carson-u iznosi [10]:

$$r_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4}. \quad (6)$$

Sa R_e je označen ekvivalentni poluprečnik faznog provodnika koji zavisi od konstrukcije Al/Fe užeta, ali se u slučaju srednjenaponskih distributivnih vodova može aproksimirati sledećim izrazom [8]:

$$R_e = R \cdot e^{-\frac{1}{4}} \approx 0,7788 \cdot R, \quad (7)$$

koji se odnosi na pun okrugli provodnik, gdje je R – geometrijski (stvarni) poluprečnik užeta.

Međusobna podužna kompleksna impedansa petlji koju čine i -ti fazni provodnik i njegov fiktivni lik, te j -ti fazni provodnik i njegov fiktivni lik, izražena u Ω/km , data je sljedećim izrazom [11]:

$$\underline{z}_{ij} = r_z + j4\pi \cdot f \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{D_{ij}'}{D_{ij}}\right), \quad (8)$$

gdje su rastojanja D_{ij} i D_{ij}' data izrazima (2) i (3), respektivno. Zbog simetrije važi jednakost $\underline{z}_{ij} = \underline{z}_{ji}$.

Konačno, moguće je formirati matricu podužnih kompleksnih impedansi nadzemnog voda:

$$[\underline{z}] = \begin{bmatrix} \underline{z}_{aa} & \underline{z}_{ab} & \underline{z}_{ac} \\ \underline{z}_{ba} & \underline{z}_{bb} & \underline{z}_{bc} \\ \underline{z}_{ca} & \underline{z}_{cb} & \underline{z}_{cc} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2.2. Proračun struja kratkih spojeva

Srednjenaponske distributivne mreže se u većini slučajeva, u električnom smislu, nalaze na relativno velikom rastojanju u odnosu na elektrane, tj. sinhronne generatore u tim elektranama. Zbog toga struje kratkih spojeva u srednjenaponskim distributivnim mrežama nemaju izraženu subtranzijentnu i tranzijentnu prelaznu komponentu.

Zbog relativno malog odnosa X/R u srednjenaponskim distributivnim mrežama, aperiodična komponenta struje kratkog spoja relativno brzo iščezava. Stoga ćemo u ovom radu postupiti kao što je uobičajeno u proračunu struja kratkih spojeva za potrebe dimenzionisanja elektroenergetske opreme, te izbora vrste i podešenja relejne zaštite, tj. računaćemo struje ustaljenog kratkog spoja, kao i odgovarajuće magnetno polje koje potiče od ustaljenih struja kratkog spoja. Ovakav postupak je opravdan za srednjenaponske distributivne mreže u kojima nema distribuiranih izvora električne energije.

Za proračun nesimetričnih kratkih spojeva tradicionalno se koristi Fortescue-ova metoda simetričnih komponenti [12].

Preduslov za primjenu ove metode u proračunu struja nesimetričnih kratkih spojeva na nadzemnim vodovima je jednakost podužnih parametara pojedinih faznih provodnika. Ukoliko taj uslov nije ispunjen, matrica (9) nije ciklično simetrična, što za posledicu ima da komponentni sistemi nisu međusobno raspregnuti [8]. Stoga ćemo struje kratkih spojeva u ovom radu određivati prema trofaznoj ekvivalentnoj šemi prikazanoj na Sl. 2, pretpostavljajući da je vod priključen na mrežu beskonačne snage.

Na osnovu ekvivalentne šeme na Sl. 2 možemo napisati sljedeću matričnu jednačinu:

$$[\Delta U] = [E] - [U] = [Z] \cdot [I], \quad (10)$$

gdje je: $[\Delta U] = [\Delta U_a \ \Delta U_b \ \Delta U_c]^T$ – vektor padova napona na pojedinim fazama nadzemnog voda, $[E] = [E_a \ E_b \ E_c]^T$ – vektor faznih napona na početku nadzemnog voda, $[U] = [U_a \ U_b \ U_c]^T$ – vektor faznih napona na mjestu kvara, dok je $[I] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$ – vektor faznih struja.

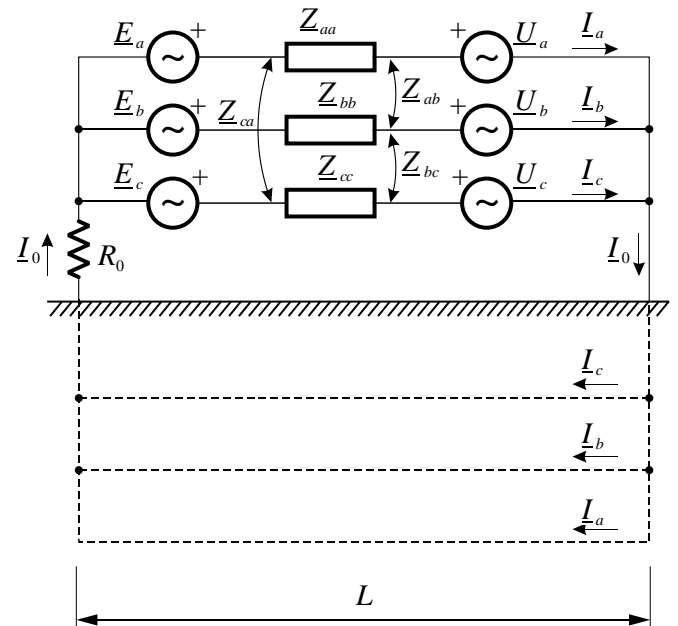
U matričnoj jednačini (10) uvedena je ekvivalentna matrica impedansi sistema predstavljenog na Sl. 2, koja je definisana na sljedeći način:

$$[Z] = [z] \cdot L + [J] \cdot R_0, \quad (11)$$

gdje je: L – udaljenost od početka nadzemnog voda do mjesta kvara u km, $[J]$ – matrica dimenzija 3×3 , čiji su svi elementi jedinice, dok je R_0 – otpornost radnog uzemljenja u napojnoj transformatorskoj stanici kojom se ograničava struja jednofaznog kratkog spoja u posmatranoj mreži. Fazne struje za različite tipove kratkih spojeva dobijaju se na osnovu matrične jednačine (10) i tzv. jednačina fizičke očiglednosti za odgovarajući tip kvara.

Fazne struje za slučaj trolpolnog kratkog spoja (3PKS) se direktno dobijaju iz matrične jednačine (10), uzimajući u obzir da je $\Delta U_i = E_i$ ($i = a, b, c$) i date su sljedećim matričnim izrazom:

$$[I] = [Z]^{-1} \cdot [\Delta U] = [Z]^{-1} \cdot [E]. \quad (12)$$



Sl. 2. Trofazno ekvivalentno kolo nadzemnog voda za proračun faznih struja kratkog spoja

Fazna struja i -te faze, za slučaj jednopolnog kratkog spoja (1PKS) i -te faze, dobija se transformacijom matrice jednačine (10), uzimajući u obzir to da je $\Delta U_i = \underline{E}_i$, $I_j = I_k = 0$ ($i, j, k = a, b, c \wedge i \neq j \neq k$) i data je sljedećim izrazom:

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{E}_i}{\underline{Z}_{ii}}. \quad (13)$$

Fazne struje i -te i j -te faze, za slučaj dvopolnog kratkog spoja (2PKS) i -te i j -te faze, dobijaju se transformacijom matrice jednačine (10), uzimajući u obzir to da je $\Delta U_i - \Delta U_j = \underline{E}_i - \underline{E}_j$, $I_i = -I_j$, $I_k = 0$ ($i, j, k = a, b, c \wedge i \neq j \neq k$) i date su sljedećim izrazima:

$$\underline{I}_i = -\underline{I}_j = \frac{\underline{E}_i - \underline{E}_j}{\underline{Z}_{ii} + \underline{Z}_{jj} - 2 \cdot \underline{Z}_{ij}}. \quad (14)$$

Fazne struje i -te i j -te faze, za slučaj dvopolnog kratkog spoja sa zemljom (2PKSZ) i -te i j -te faze, dobijaju se transformacijom matrice jednačine (10), uzimajući u obzir to da je $\Delta U_i = \underline{E}_i$, $\Delta U_j = \underline{E}_j$, $I_k = 0$ ($i, j, k = a, b, c \wedge i \neq j \neq k$) i date su sljedećim izrazima:

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{Z}_{jj} \cdot \underline{E}_i - \underline{Z}_{ij} \cdot \underline{E}_j}{\underline{Z}_{ii} \cdot \underline{Z}_{jj} - \underline{Z}_{ij}^2}, \quad (15)$$

$$\underline{I}_j = \frac{\underline{Z}_{ii} \cdot \underline{E}_j - \underline{Z}_{ij} \cdot \underline{E}_i}{\underline{Z}_{ii} \cdot \underline{Z}_{jj} - \underline{Z}_{ij}^2}. \quad (16)$$

2.3. Proračun magnetnog polja

Možemo smatrati da je magnetno polje u okolini nadzemnog voda kvazistacionarno, te da se može odrediti nezavisno od električnog polja [9]. Kako potiče od harmoničnih struja, za određivanje vektora magnetne indukcije možemo koristiti kompleksnu, tj. fazorsku notaciju. Osim toga, kako se zanemaruje uticaj ugiba faznih provodnika, vektor magnetne indukcije računamo pomoću *Biot-Savart*-ovog zakona primjenjenog na pravolinijski provodnik beskonačne dužine.

Vektor magnetne indukcije u okolini nadzemnog voda računamo uvažavajući prisustvo fiktivnih likova pojedinih faznih provodnika ispod površine zemlje. Zemlja se pri tome smatra nemagnetnim, provodnim materijalom magnetne permeabilnosti $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, tako da je opravdana primjena principa superpozicije.

Ako se i -ta faza nalazi na visini y_i i fazor struje u toj fazi iznosi \underline{I}_i , tad se, prema Sl. 1, njen fiktivni lik nalazi na kompleksnoj dubini $y_i + \underline{\alpha}$ i struja u njemu iznosi $-\underline{I}_i$. Zbog usvojenog koordinatnog sistema na Sl. 1 vektor magnetne indukcije će imati samo x i y komponentu, dok će z komponenta biti jednaka nuli. Vektor magnetne indukcije u tački sa koordinatama (x, y) usljed struje u i -toj fazi je dat izrazom [4]:

$$\underline{\mathbf{B}}_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \underline{I}_i \cdot \left(\frac{\underline{\mathbf{u}}_i}{R_i} - \frac{\underline{\mathbf{u}}_i'}{R_i'} \right). \quad (17)$$

Rastojanja posmatrane tačke od provodnika i -te faze i njegovog fiktivnog lika su data sljedećim izrazima:

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (18)$$

$$R_i' = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y + y_i + \underline{\alpha})^2}. \quad (19)$$

U izrazu (17) definisani su sljedeći vektori [4]:

$$\underline{\mathbf{u}}_i = -\frac{y - y_i}{R_i} \cdot \underline{\mathbf{u}}_x + \frac{x - x_i}{R_i} \cdot \underline{\mathbf{u}}_y, \quad (20)$$

$$\underline{\mathbf{u}}_i' = -\frac{y + y_i + \underline{\alpha}}{R_i'} \cdot \underline{\mathbf{u}}_x + \frac{x - x_i}{R_i'} \cdot \underline{\mathbf{u}}_y, \quad (21)$$

gdje su $\underline{\mathbf{u}}_x$ i $\underline{\mathbf{u}}_y$ jedinični vektori (ortovi) u xy koordinatnom sistemu.

Rezultantni vektor magnetne indukcije u tački sa koordinatama (x, y) dobija se superpozicijom vektora magnetne indukcije usljed struja u pojedinim faznim provodnicima i dat je sljedećim izrazom [4]:

$$\underline{\mathbf{B}} = \sum_i \underline{\mathbf{B}}_i = \underline{\mathbf{B}}_x \cdot \underline{\mathbf{u}}_x + \underline{\mathbf{B}}_y \cdot \underline{\mathbf{u}}_y, \quad (22)$$

pri čemu su njegove pojedine komponente:

$$\underline{B}_x = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_i \underline{I}_i \cdot \left(\frac{y - y_i}{R_i^2} - \frac{y + y_i + \underline{\alpha}}{R_i'^2} \right), \quad (23)$$

$$\underline{B}_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_i \underline{I}_i \cdot (x - x_i) \cdot \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_i'^2} \right), \quad (24)$$

dok mu je efektivna vrijednost:

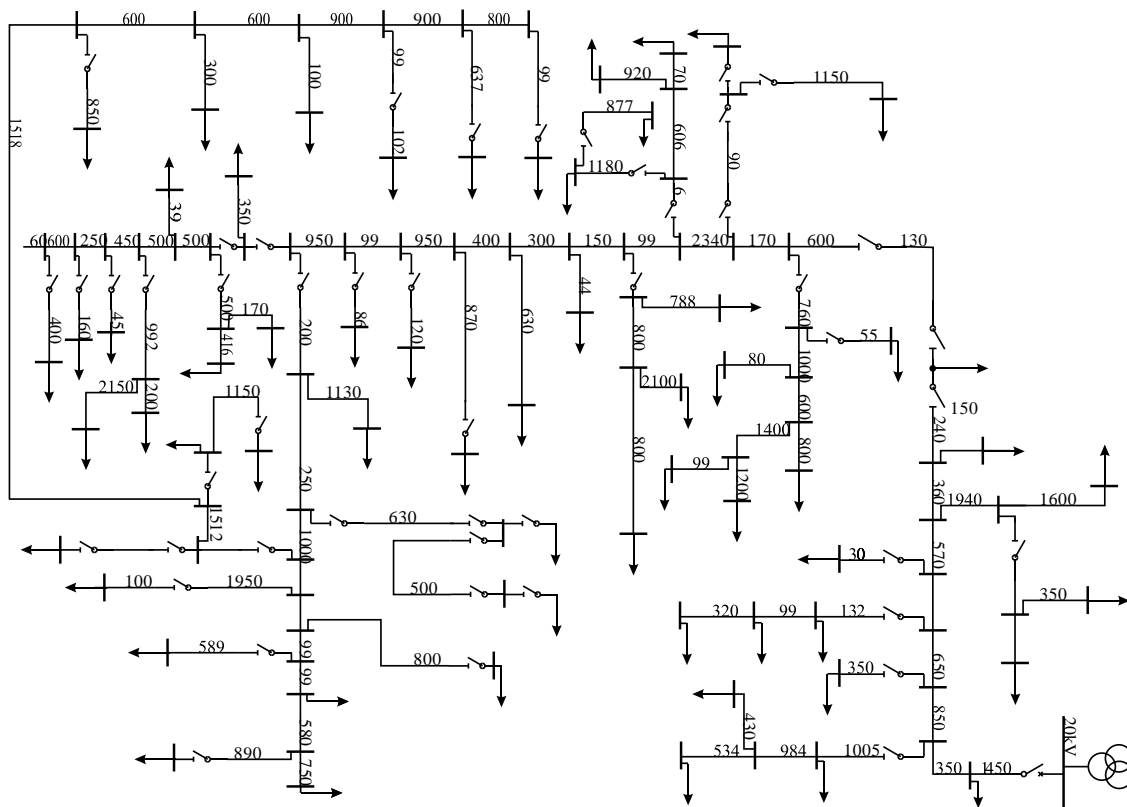
$$B = \sqrt{|\underline{B}_x|^2 + |\underline{B}_y|^2}. \quad (25)$$

3. REZULTATI PRORAČUNA

Na osnovu predloženog matematičkog modela napisan je program za proračun efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose stuba za tipičan srednjenaponski distributivni nadzemni vod i za različite tipove kratkih spojeva. Posmatrana je konkretna distributivna mreža 20 kV, 50 Hz sa područja opštine Banja Luka. Na Sl. 3 je prikazana jednopolna šema pomenute distributivne mreže, gdje je pored svakog voda naznačena i njeno dužina u m. Proračuni su vršeni za slučaj kada su struje kvara najmanje, tj. kada je udaljenost mjesta kvara od napojne transformatorske stanice najveća. Za razgranatu mrežu na Sl. 3 može se ustanoviti da je kritična udaljenost mjesta kvara $L \approx 20$ km.

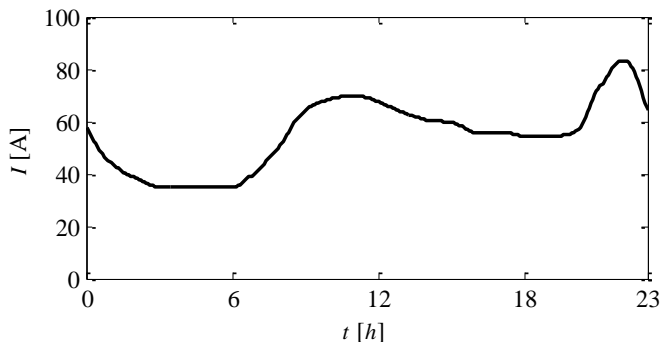
Efektivna vrijednost vektora magnetne indukcije usljed struje kvara u navedenom kritičnom slučaju je upoređena sa odgovarajućom indukcijom za slučaj vršnog opterećenja u normalnom režimu rada. Za proračun magnetne indukcije usljed radnih struja je usvojena vršna struja od 80 A, prema tipičnom dnevnom dijagramu opterećenja napojnog voda na Sl. 4.

U srednjenaponskim distributivnim mrežama na području opštine Banja Luka se najčešće koriste armirano-betonski stubovi visine 12 m koji su ukopani 2 m u zemlju, tako da visina provodnika iznad zemlje iznosi oko 10 m. Na armirano-betonski stub se postavljaju vršne konzole kod kojih su sva tri fazna provodnika u ravni, kao što je prikazano na Sl. 5. Za provodnike se najčešće koriste Al/Fe užad presjeka 25/4 mm² ili 35/6 mm², a za magistralni dio voda 50/8 mm². U proračunu je usvojeno uže Al/Fe 25/4 mm² sa sljedećim podacima: $r = 1,2027 \Omega/\text{km}$, $R = 3,375 \text{ m}\Omega$ [13]. Osim toga, usvojene su oznake i raspored faza prikazan na Sl. 5. Za specifičnu otpornost zemljišta je usvojena tipična vrijednost od $\rho_z = 100 \Omega\text{m}$.

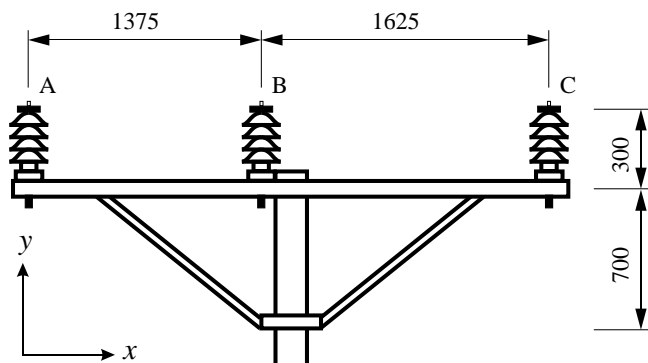


Sl. 3. Konkretna distributivna mreža nazivnog napona 20 kV na području opštine Banja Luka

Smatrajući da su fazori napona na početku napojnog voda $\underline{E}_a = 20/\sqrt{3}$ kV $/0^\circ$, $\underline{E}_b = 20/\sqrt{3}$ kV $/-120^\circ$ i $\underline{E}_c = 20/\sqrt{3}$ kV $/120^\circ$, te da je struja 1PKS ograničena na 300 A ($R_0 = 40 \Omega$), izvršen je proračun faznih struja za različite tipove kratkih spojeva za kritičnu udaljenost mjesta kvara od napojne transformatorske stanice. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 1.



Sl. 4. Tipičan dnevni dijagram opterećenja napojnog voda u posmatranoj mreži



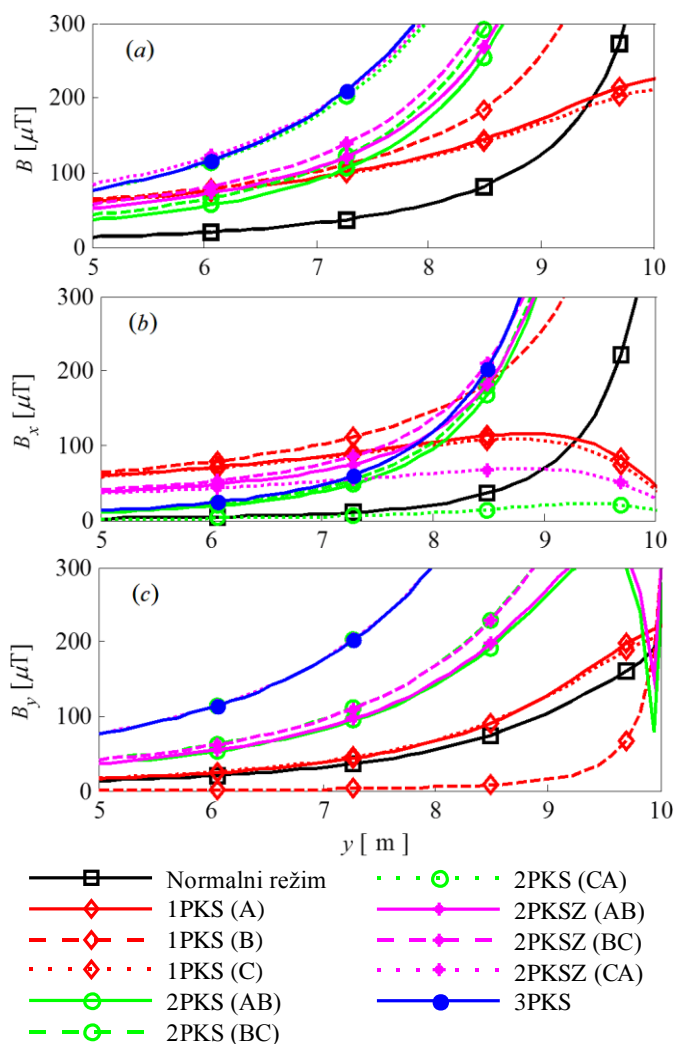
Sl. 5. Dimenzije (u mm) glave tipičnog armirano-betonskog stuba

Na Sl. 6 prikazana je efektivna vrijednost vektora magnetne indukcije, te efektivne vrijednosti njegovih komponenti B_x i B_y , duž ose stuba, za visine od 5 m do 10 m. Na Sl. 6 (a) vidimo da je za visine do 9 m magnetna indukcija usljed struje kratkog spoja, za sve kvarove, veća od magnetne indukcije usljed radnih struja.

Za visine iznad 9 m, magnetno polje pri 1PKS faze A ili C je manje od magnetnog polja usljed radnih struja. Izuzimajući normalan režim, za visine iznad 7 m najslabije je magnetno polje pri 1PKS bilo koje faze, dok je za visine ispod 7 m najslabije magnetno polje pri 2PKS i 2PKSZ između faza A i B ili B i C. Na Sl. 6 (b) vidimo da je do visine 9 m, osim u slučaju 2PKS faza C i A, komponenta B_x vektora magnetne indukcije usljed struje kratkog spoja veća od komponente B_x vektora magnetne indukcije usljed radnih struja. Na Sl. 6 (c) vidimo da je do visine 9 m, osim u slučaju 1PKS faze B, komponenta B_y vektora magnetne indukcije usljed struje kratkog spoja veća od komponente B_y vektora magnetne indukcije usljed uravnoteženih radnih struja.

Tabela 1 – Fazne struje kvara za kritičnu udaljenost mjesta kvara u posmatranoj distributivnoj mreži

Režim rada	\underline{I}_a [A]	\underline{I}_b [A]	\underline{I}_c [A]
Normalan	80 $/0^\circ$	80 $/-120^\circ$	80 $/120^\circ$
1PKS (A)	170 $/-14^\circ$	0	0
1PKS (B)	0	170 $/-134^\circ$	0
1PKS (C)	0	0	170 $/106^\circ$
2PKS (AB)	395 $/12^\circ$	395 $/-168^\circ$	0
2PKS (BC)	0	394 $/-109^\circ$	394 $/71^\circ$
2PKS (CA)	390 $/-50^\circ$	0	390 $/130^\circ$
2PKSZ (AB)	387 $/5^\circ$	394 $/-161^\circ$	0
2PKSZ (BC)	0	403 $/-116^\circ$	392 $/79^\circ$
2PKSZ (CA)	387 $/-43^\circ$	0	401 $/122^\circ$
3PKS	442 $/-19^\circ$	459 $/-138^\circ$	460 $/100^\circ$



Sl. 6. Raspodjela efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije (a) i njegovih komponenti B_x (b) i B_y (c) duž ose posmatranog stuba

4. ZAKLJUČAK

U radu su obrađene osnove matematičkog modelovanja sredjenaponskog nadzemnog voda. Izvedeni su izrazi za proračun faznih struja kratkih spojeva i odgovarajuće efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije u blizini nadzemnog voda. Na osnovu teorijske analize proračunate su fazne struje kratkog spoja za najgori scenario u tipičnoj distributivnoj mreži nazivnog napona 20 kV. Za izračunate struje kvara određena je raspodjela efektivne vrijednosti vektora magnetne indukcije duž ose armirano-betonskog stuba sa rasporedom faznih provodnika u ravni na visini 10 m iznad površine zemlje. Nakon sprovedenog proračuna zaključujemo da razumne visine za postavljanje indikatora kvara na razmatrani tip stuba leže u opsegu od oko 7 m do oko 9 m. Takođe, zaključujemo da je većinu kvarova moguće detektovati na osnovu porasta komponente B_x vektora magnetne indukcije.

5. ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju preduzeću *Elektrokrajina a.d. Banja Luka*, na pruženoj pomoći pri izradi ovog rada. Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske u okviru projekta INGRID.

6. LITERATURA

- [1] J.Northcote-Green, R.Wilson, Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems, New York: CRC Press, 2007.
- [2] E.Vidyasagar, P.V.N.Prasad, A.Fatima, "Reliability Improvement of a Radial Feeder Using Multiple Fault Passage Indicators," in *2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2011)*, 2011.
- [3] A.V.Mamishhev, B.D.Russell, "Measurement of Magnetic Fields in the Direct Proximity of Power Line Conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1211-1216, July 1995.
- [4] C.Garrido, A.F.Otero, J.Cidras, "Low-Frequency Magnetic Fields From Electrical Appliances and Power Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 4, pp. 1310-1319, 2003.
- [5] *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*, IEEE Std. 644, 1994.
- [6] ICNRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-552, April 1998.
- [7] P.Pao-la-or, A.Isaramongkolrak, T.Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems," *Engineering Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 1-9, 2010.
- [8] M.B.Đurić, Elementi EES-a, Beograd: ETF, 1998.
- [9] A.V.Mamishhev, R.D.Nevels, B.D.Russell, "Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1571-1576, 1996.
- [10] J.R.Carson, "Wave Propagation in overhead wires with ground," *Bell System Technical Journal*, no. 5, pp. 539-554., 1926.
- [11] F.Rachidi, S.Tkachenko, *Advances in Electrical Engineering and Electromagnetics*, Southampton, Boston: WIT Press, 2008.
- [12] C.L.Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," in *AIEE*, Atlantic City, 28 June 1918.
- [13] D.Kajzer, *Elektrotehnički priručnik*, Zagreb: Tehnička knjiga, 1971.

Abstract – In this paper, possibilities for detection of short circuits by measuring the effective value of magnetic B-field vector in the vicinity of overhead medium voltage transmission lines are investigated. A complete mathematical model of an overhead transmission line with arbitrary pole geometry, suitable for calculation of short circuit phase currents and corresponding magnetic fields, is proposed. Based on the proposed model, the effective value of magnetic B-field vector along the pole axis is calculated for various types of short circuits for a specific 20 kV transmission line in the area of Banja Luka.

CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS IN THE VICINITY OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES FOR THE PURPOSE OF FAULT DETECTION

Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić

SAVREMENE METODE ZA OGRANIČAVANJE STRUJA KRATKOG SPOJA U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA U SLUŽBI ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Branimir N. Petrović

RiTE Ugljevik

Ugljevik, RS - BiH

branimir.n.petrovic@gmail.com

Sadržaj - Porast nivoa struja kratkog spoja izazvan promjenom topologije mreže ili dodavanjem novih proizvodnih kapaciteta može dovesti do toga da prekidači i druga oprema u postrojenjima više ne može da služi svojoj namjeni. U skorije vrijeme su se pojavile nove tehnologije ograničavača struja kratkih spojeva čijom upotrebom se ne zahtjeva zamjena elemenata postrojenja. Većina savremenih ograničavača su zasnovani na upotrebi superprovodnih elemenata ili energetske elektronike. U ovom radu će biti pokazano na praktičnom primjeru kako dolazi do porasta nivoa struja kratkog spoja kada se u mrežu doda novi generator, te na kom mjestu u mreži se predlaže ugradnja ograničavača i koji efekti se time postižu. Na kraju rada, u zaključku, dat je kratak osvrt na ekonomske aspekte.

Ključne riječi - Kratak spoj; Superprovodnici; Ograničavač struja kratkog spoja; Power World Simulator

1. UVOD

Za kontinuiranu proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije neophodno je pravilno dimenzionirati i održavati sve elemente elektroenergetskog sistema. Jedan od ključnih zahtjeva je pravilno održavanje elektroenergetskih prekidača koji treba da budu sposobni da u svakom trenutku prekinu radne struje i struje kvara. Ukoliko prekidač nije u mogućnosti da prekine struju kvara zbog pogrešnog dimenzionisanja prilikom projektovanja ili promjene pogonskih uslova, postoji mogućnost nastanka teških havarija i dugotrajnog prekida u napajanju što rezultuje velikom novčanom štetom. Do povećavanja struja kratkog spoja u odnosu na vrijeme kada je prekidač odabran i instaliran najčešće dolazi zbog izmjene konfiguracije mreže ili zbog dodavanja novih proizvodnih kapaciteta u postojeću mrežu. Promjena topologije mreže ili povećavanje snage proizvodnje rezultuje smanjenjem impedansi mreže, odnosno porastom nivoa struja kratkih spojeva. Kada se ustanovi da je na nekom dijelu mreže struja kvara povećana u odnosu na prekidne moći postojećih prekidača i ostale opreme, potrebno je pokrenuti proceduru za zamjenu prekidača i ostale pripadajuće opreme, kao što su mjerni transformatori, sabirnice i slično. Ova procedura je skupa i vremenski zahtjevna zbog čekanja na isporuku i zamjene opreme. Kao alternativa, može se koristiti oprema kojom se struja kvara ograniči na vrijednost koju postojeća oprema može da podnese. Klasične metode za ograničavanje struja kratkih

spojeva podrazumijevaju ugradnju serijskih prigušnica, povećanje nulte impedanse izborom odgovarajućeg načina uzemljenja zvjezdišta, sekcionisanje mreže i ugradnju transformatora sa povećanom reaktansom rasipanja. Međutim, većina ovih metoda ima nedostatke poput propada napona ili povećanih gubitaka u normalnom radu, velike cijene ili uslova na konkretnom mjestu ugradnje. Novije tehnologije ograničenja struja kratkog spoja podrazumijevaju ugradnju ograničavača struja kratkog spoja (engl. *FCL* – *Fault Current Limiters*) koji se uglavnom zasnivaju na upotrebi superprovodnih materijala ili poluprovodničkih elemenata. Prednosti savremenih metoda u odnosu na klasične pristupe su: povećana bezbjednost sistema, stabilnost i efikasnost isporuke električne energije; redukovan ili eliminisan gubitak napajanja velikog broja potrošača, redukovani lokalni prekid i vrijeme oporavka nakon što se desi prekid; smanjeni troškovi održavanja; eliminacija sekcionisanih sabirnica i sekcijских prekidača; redukovanje naponskih propada; zaštita od jednostrukih i višestrukih kvarova. Osnovni nedostatak savremenih ograničavača struja kratkih spojeva je što su trenutno skupi pošto su zasnovani na tehnologijama koje nisu u potpunosti razvijene.

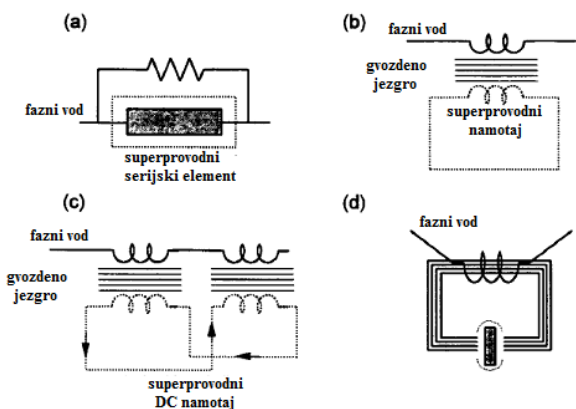
2. OGRANIČAVAČI STRUJA KRATKOG SPOJA

2.1. OSKS bazirani na superprovodnicima

U toku trajanja kvara, prekomjerne struje koje se pojavljuju - struje kratkog spoja, teku kroz elektroenergetski sistem uzrokujući djelovanje relejne zaštite i isključenje prekidača ili pregorijevanje osigurača. Ograničavači struja kratkog spoja ograničavaju te struje u sistemu. Trenutno postoji više različitih tehnologija izrade OSKS (ograničavača struja kratkog spoja, što je prevod engleskog termina FCL), a to su: visokotemperaturni superprovodni (engl. HTS), niskotemperaturni superprovodni (engl. LTS), zatim OSKS bazirani na energetske elektronici i mnogi drugi koji će biti predstavljeni u narednim poglavljima. Superprovodnost se definiše kao totalno odsustvo otpornosti. U osnovi postoje četiri načina za ograničavanje struje KS korištenjem superprovodnika, dok će još neki tipovi poput hibridnog superprovodnog ograničavača biti izloženi u nastavku, dok je njihov izgled prikazan na Sl.1. Osnovni su:

a) serijski rezistivni OSKS

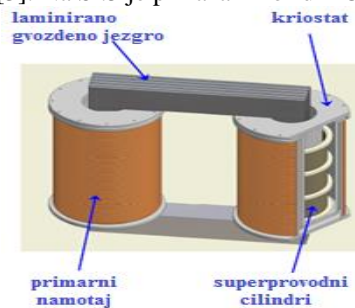
- b) oklopljeni induktivni OSKS
 - c) OSKS na bazi zasićenog induktiviteta
 - d) OSKS sa vazдушnim zazorom [1].
- a) Ovaj metod koristi serijski superprovodnik koji provodi radnu struju. Kad usljed kvara kritična gustina struje materijala bude prekoračena, on se vraća u normalno rezistivno stanje. Ovo se zove promjena iz superprovodnog u normalno stanje (S-N). Prednost ovih superprovodnih provodnika sa niskim gubicima za naizmjeničnu struju kao i novootkrivenih materijala koji pokazuju umjereno oštar prijelaz, omogućavaju da ova tehnika bude primjenjena.
- b) Kod oklopljenog induktivnog OSKS vod koji se štiti se spaja u seriju sa primarnim namotajem oko željeznog jezgra. U toku normalnog rada, superprovodni sekundarni namotaj balansira amper-navojke sa primarnog namotaja tako da fluks ne prolazi kroz željezo. Na početku struje kvara kada struja superprovodnika koja nastoji da balansira primarne amper-navojke prekorači kritičnu vrijednost struje, fluks počinje da se zatvara kroz željezo jer više nema ravnoteže što uzrokuje da induktivitet primarnog namotaja raste brzo i na taj način utiče na smanjenje struje kratkog spoja. U suštini je sličan kao pod a) osim fizičke postavke.
- c) Kod ovog metoda struja teče kroz nekoliko redno vezanih prigušnica koje su namotane na željezna jezgra (reaktor). Željezno jezgro ovog reaktora se drži u zasićenom stanju pomoću sekundarnog superprovodnog namotaja sa jednosmjernom strujom. U slučaju kvara struja kratkog spoja dovodi jezgro u nezasićeno stanje što dovodi do naglog porasta induktiviteta koji ograničava struju kratkog spoja. Dva takva uređaja su stavljena na red da bi se obezbjedilo djelovanje OSKS za oba polariteta napona i struje. Koristi se superprovodni namotaj za jednosmjernu struju umjesto klasičnog bakarnog da bi se smanjili gubici u praznom hodu.
- d) Ovaj slučaj je sličan kao pod b) samo što je sekundarni namotaj zamjenjen sa superprovodnom trakom ubačenom u vazdušni zazor u željeznom jezgru. U toku normalnog radnog stanja superprovodnik izbacuje polje iz vazdušnog zazora



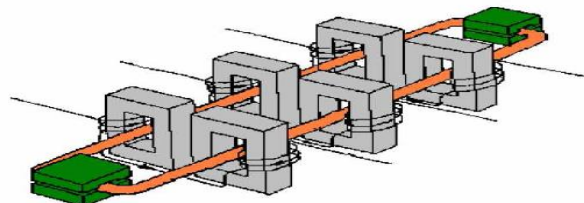
Slika 1. Tipovi OSKS bazirani na superprovodnicima

uzrokujući tako veliku magnetnu reluktansu (otpornost) i nizak primarni induktivitet. U toku kvara superprovodnik ne može više da izdrži struje koje su potrebne da se polje zadrži izvan vazdušnog zazora i magnetna reluktansa pada što dovodi do porasta primarnog induktiviteta i smanjenja struje u primarnom kolu tj. struje kratkog spoja [2].

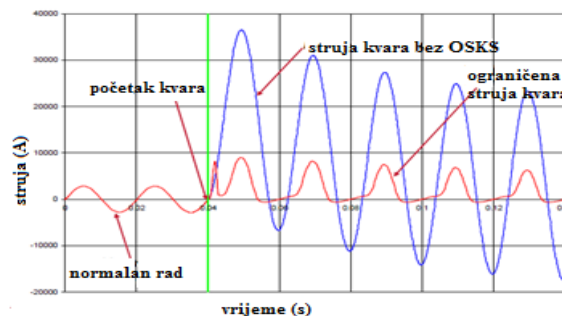
Na Sl. 2 i Sl. 3 je prikazan realan izgled nekih tipova OSKS. Na Sl. 4 se može vidjeti kako izgleda vremenski dijagram pri pojavi struje kvara. Uprkos odličnim karakteristikama SOSKS (skraćeno od Superprovodni Ograničavači Struja Kratkog Spoja) prilikom ograničavanja struja kvara, njihova primjena u mrežama je odložena zbog problema kao što su gubitak naizmjenične struje, troškovi, oporavak posle kvara i sistem sa kriostatom za hlađenje superprovodnika. U svrhu rješavanja ovih problema predloženi su hibridni SOSKS. Razvijeni hibridni SOSKS se sastoji od dijela sa superprovodnim elementom, brzdjelujućeg prekidačkog dijela i dijela za ograničenje struje kvara. U hibridnom SOSKS superprovodni element detektuje stanje kvara i struja kvara biva prekinuta od strane brzdjelujućeg prekidačkog dijela. Struja kvara je limitirana pomoću elementa koji je u paraleli s superprovodnim elementom. Stoga prethodno pomenuti problemi su riješeni sa malim opterećivanjem superprovodnog elementa. Pored toga hibridni SOSKS može da radi i kao limiter struje KS u prvoj polovini periode, a može i da radi i tako da ne limitira struju kvara u prvoj polovini periode. Druga varijanta omogućava struji kvara da teče u toku prve poluperiode nakon nastanka kvara, a zatim počinje da limitira struju kvara. Ovo omogućava koordinaciju sa konvencionalnim relejima i realizaciju optimalne karakteristike ograničavanja struje kvara [3]. Na Sl.5 je prikazan hibridni OSKS.



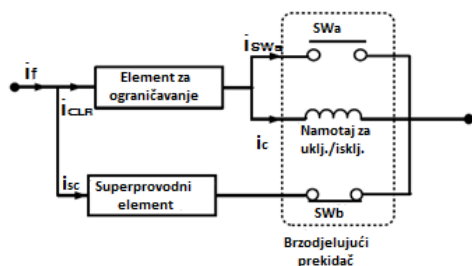
Slika 2. Realni izgled oklopljenog induktivnog tipa



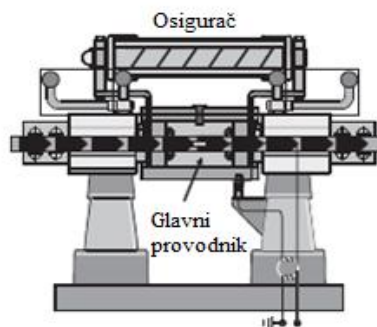
Slika 3. Realni prikaz trofaznog OSKS na bazi zasićenog induktiviteta



Sl. 4. Prikaz ograničavanja struje kratkog spoja pomoću OSKS



Slika 5. Hibridni OSKS



Slika 6. Pirotehnički ograničavač struja kratkog spoja [6]

Idealni OSKS predstavljaju nultu impedansu za sistem u stanju bez kvara, ali u slučaju pojave kvara reaguju dovoljno brzo povećanjem impedanse da bi ograničili struju kvara. Superprovodni OSKS su testirani duži niz godina nudeći karakteristike veoma blizu idealnom OSKS. Nažalost, većina superprovodnih materijala se pokazalo kao izuzetno krhka, teška za proizvodnju i nepraktična za upotrebu. Poslednjih nekoliko godina Rols Rojs i njegovi partneri su razvili ključnu tehnologiju potrebnu za proizvodnju praktičnih SOSKS koji imaju značajne prednosti na velikom broju polja. Uspješno ograničavanje struja kvara je demonstrirano upotrebom elementa od MgB_2 koji pokazuje veliku termičku i mehaničku čvrstoću uprkos uzastopnom izlaganju struji kvara. Dizajn je osmišljen tako da omogući selekciju između struja u normalnom pogonu i struja kvara [4].

2.2. Pirotehnički tip OSKS

Pirotehnički ili I_s tip ograničavača je za razliku od svih do sada pomenutih jedini stalno dostupan na tržištu. Svi prethodni su još uvijek u fazi razvoja i ispitivanja. Pirotehnički OSKS ili I_s – ograničavač kako se drugačije zove je uređaj koji se sastoji od dva paralelna provodnika i prikazan je na slici 6. [6]. Ovi ograničavači se primjenjuju za mreže nominalnog napona do 40,5 [kV] dok im je maksimalna srednja efektivna vrijednost struje koju mogu prekinuti 210 [kA]. Glavni provodnik služi za provođenje struje u normalnom pogonu. Paralelno sa njim se nalazi osigurač velike prekidne moći koji služi za ograničavanje i prekidanje struje kvara. Ograničavanje struje kratkog spoja se vrši već u toku prve poluperiode nakon nastanka kvara. Prekidanje struje kvara se vrši pri prvom prolasku struje kroz nulu. I_s – ograničavač je snabdjeven sa malom količinom pirotehničkog sredstva odnosno eksplozivnog materijala koje eksplodira pri pojavi struje kratkog spoja i na taj način prekida glavni provodnik preusmjeravajući na taj način struju kvara kroz osigurač. Osigurač struju kvara prvo limitira, a zatim je prekida. Ovaj OSKS je snabdjeven elektronskim uređajem koji nije prikazan na slici 6. i koji služi za detektovanje struje kvara i aktiviranje pirotehničkog sredstva. Vrijeme od trenutka reagovanja do trenutka prekidanja struje kvara je 5-10 [ms]. Nakon reagovanja ograničavača potrebno je u cilju ponovnog funkcionisanja odnosno obezbjeđenja napajanja potrošača zamijeniti glavni provodnik, eksplozivno punjenje i osigurač. To je ujedno i glavna mana ovakvog uređaja, što se ne može „samoresetovati“ već je potrebno neko vrijeme za dolazak na teren i zamjenu dijelova [6].

3. PRIMJER OGRANIČAVANJA STRUJA KRATKOG SPOJA U POSTROJENJIMA RITE UGLJEVIK

Na Sl. 7 je prikazana šema napajanja koja je poslužila kao osnov za simulacije. Na šemi se može vidjeti da je prikazan i Blok 2 koji trenutno ne postoji, ali u slučaju njegove izgradnje doći će do promjena u mreži. Kako je suština simulacije da se pokaže šta će se dešavati kada se promjeni topologija mreže, odnosno u ovom slučaju je to situacija kada se Blok 2 uključi u mrežu, može se vidjeti iz tabela 1 i 2 kako se mijenja struja kratkog spoja na sabirnicama 2. Sabirnice 2 su 400 kV sabirnice. Ovdje se kod svih generatora mijenjaju impedanse za subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni period struje kratkog spoja, pa se posle na osnovu tih vrijednosti, kao i vrijednosti vremenskih konstanti koje će kasnije biti prikazane vrši procjena vremenskog oblika struje kratkog spoja [7]. Za simulacije nam je poslužio programski paket Power World Simulator. Treba napomenuti da se ovdje razmatra samo slučaj trolnog kratkog spoja jer oni najčešće izazivaju najveće struje kratkog spoja. Sljedeći slučaj koji je od značaja za dokazivanje porasta nivoa struja kratkog spoja je slučaj kada rade Blok 1 i Blok 2, što će u nastavku izazvati porast struja na istim posmatranim sabirnicama. Tada ćemo imati situaciju kao u tabeli II. Očigledno je struja kratkog spoja porasla u odnosu na slučaj 1. U Power World simulatoru je moguće dobiti matricu admitansi čvorova (sabirnica) koju kada invertujemo dobijamo matricu impedansi čvorova. Ona će nam biti potrebna zbog kasnijeg računanja približnog vremenskog oblika struje kratkog spoja. Te vrijednosti su date u tabeli 3.

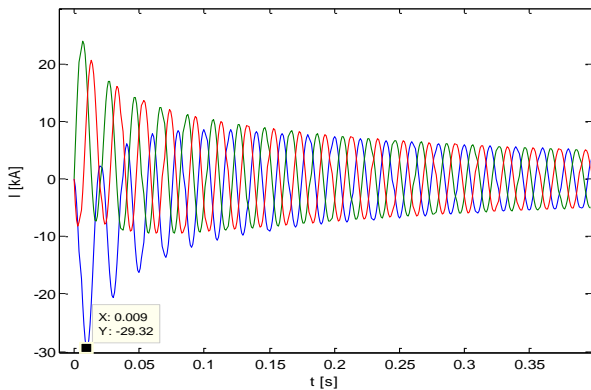
Tabela 1: Prikaz vrijednosti struja kratkog spoja na sabirnicama 400 kV za slučaj rada dva generatora

Komponenta struje kvara i period struje kvara	I_L (A)	I_D (A)	I_{uk} (A)
Subtranzijentni period	3178,87	14328,35	17507,22
Tranzijentni period	2776,03	9816,53	12592,56
Ustaljeni period	977,24	2460,62	3437,86

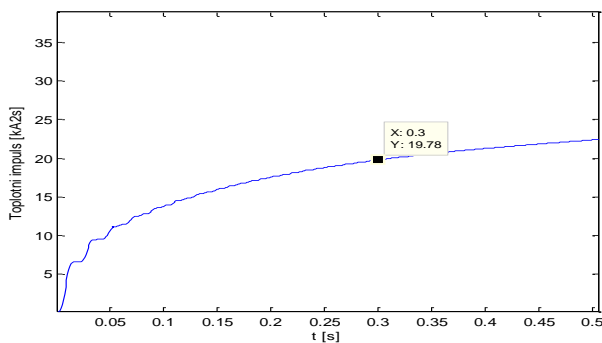
opterećene što bi moglo dovesti do njihove zamjene. Kako sve ovo ne bi moralo da se radi, moguće je ugradnjom ograničavača struja kratkog spoja na određeno mjesto u mreži izbjeći zamjenu pomenutih elemenata.

Tabela 3: Poređenje rezultata za slučajeve 1 i 2

Uporedna analiza za kvar na sabirnicama 400 kV		
	Slučaj 1 (Blok 1)	Slučaj 2 (Blokovi 1 i 2)
I_{udmax} [kA]	20,58	29,32
A [kA ² s]	7,15	19,78
F_{max} [N/m]	706,1	1432
I''_D [kA]	11,26	14,33
I'_D [kA]	7,11	9,82
I_D [kA]	1,44	2,46



Slika 8. Talasni oblik struje trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 400 kV



Slika 9. Toplotni impuls

4. PRIJEDLOG RJEŠENJA PROBLEMA-SLUČAJ 3

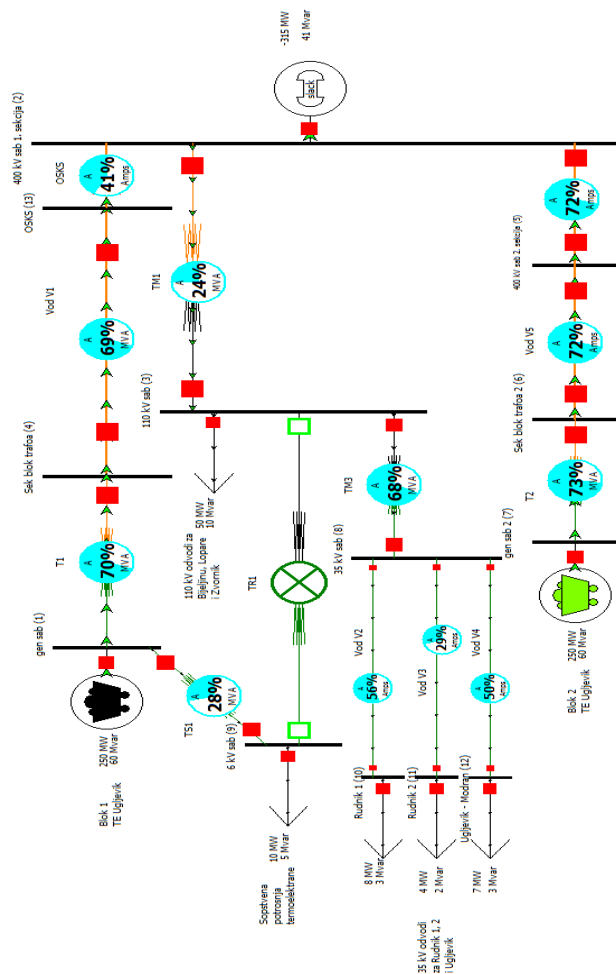
Pošto se ograničavači struja kratkog spoja postavljaju serijski sa vodovima, na Sl. 10 je predloženo mjesto za ugradnju OSKS (između sabirnica 13 i 2). Ograničavač je modelovan sa vodom impedanse $800+j800$ [Ω] što odgovara OSKS baziranom na energetskej elektronici koji ima R_d i L_d za ograničavanje struje kratkog spoja.

Treba izabrati OSKS sa podnosivom strujom od 31,5 kA i nazivnog napona 400 kV te radne struje $550 A \pm 10\%$ zbog mogućnosti preopterećenja. U tabeli 4 su prikazani rezultati u slučaju ugrađenog OSKS.

U tabeli 5 je prikazano poređenje rezultata u kojoj se vidi efikasnost ugrađenog OSKS.

Tabela 4: Prikaz vrijednosti struja kratkog spoja na sabirnicama 400 kV za slučaj rada dva generatora i OSKS

Komponenta struje kvara i period struje kvara	I_L (A)	I_D (A)	I_{uk} (A)
Subtranzijentni period	3178,87	5621,02	8799,72
Tranzijentni period	2776,03	4580,29	7356,32
Ustaljeni period	977,24	1492,59	2469,83



Sl. 10. Izgled modela mreže sa ugrađenim OSKS

Tabela 5: Poređenje rezultata za slučajeve 1, 2 i 3

Uporedna analiza za slučajeve 1, 2 i 3			
	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3 (uz OSKS)
I_{udmax} [kA]	20,58	29,32	13,11
A [kA ² s]	7,15	19,78	6,89
F_{max} [N/m]	706,1	1432	286,3
I'' [kA]	11,26	14,33	5,62
I' [kA]	7,11	9,82	4,58
I [kA]	1,44	2,46	1,49

5. ENERGETSKA EFIKASNOST OSKS

- Energetska efikasnost OSKS se ogleda u sljedećem:
- ugradnjom OSKS se sprječavaju havarije u postrojenjima usljed kojih bi pokretanje većih pogona koji su povezani sa tim postrojenjem koštalo puno što takođe doprinosi energetskej efikasnosti;
 - niz prednosti koje doprinose ukupnoj energetskej efikasnosti EES-a kao što su: povećana bezbjednost sistema,

stabilnost i efikasnost sistema kod isporuke električne energije; redukovan ili eliminisan gubitak napajanja velikog broja potrošača, redukovani lokalni prekidi i vrijeme oporavka nakon što se desi prekid; smanjeni troškovi održavanja tako što će se zaštititi oprema za prenos i distribuciju električne energije od konstantnih električnih udara kojima je izložena i koja degradira opremu i uzrokuje velike troškove održavanja; redukovanje naponskih propada uzrokovanih postojanjem visokoimpedantnih elemenata sistema; zaštita od jednostrukih i višestrukkih kvarova.

6. ZAKLJUČAK

Kao što se može vidjeti, upotreba OSKS ima elementa energetske efikasnosti. Pored prednosti koje su navedene u prethodnim poglavljima u odnosu na konvencionalne metode ograničavanja struja kratkog spoja ostalo je još da se dokaže ekonomska isplativost. Prema podacima iz tenderskih dokumenata Elektroprenosa BIH, cijena pripreme, projektovanja i izgradnje kompletnog dalekovodnog polja 400 kV u postojećoj trafostanici sa pripadajućim dijelom sabirnica sa dva sistema sabirnica iznosi 2.000.000 KM sa uračunatim PDV. Jedan ograničavač struja kratkog spoja prema podacima kompanija ABB (tip „*Is-Limiter*“) i AREVA (T&D) (tip „*CliP*“) koji inače nisu bazirani na superprovodnim elementima i deset puta su jeftiniji od onih sa superprovodnicima, košta oko 1.500.000 KM pri čemu ima karakteristike navedene u poglavlju 4. Ovdje treba uračunati i duže vrijeme zastoja potrebno za zamjenu elemenata postrojenja koje je veće od vremena ugradnje ograničavača, a ta razlika u vremenu pomnožena sa cijenom neisporučene električne energije daje još veću razliku u cijeni, što takođe ide na stranu uštede energije, što zbog razlike u vremenu zastoja, što zbog mogućih penala usled neisporučene električne energije.

Na ovaj način dokazana je ekonomska opravdanost ugradnje ograničavača struja kratkog spoja koji će vjerovatno u bliskoj budućnosti postati uobičajena pojava u elektroenergetskim postrojenjima.

7. ZAHVALNICA

Posebnu zahvalnost dugujem profesoru Čedomiru Zeljkoviću sa Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci koji mi je mentor na izradi završnog rada drugog ciklusa sa naslovom “Savremene metode za ograničavanje struja kratkog spoja u elektroenergetskim mrežama”.

8. LITERATURA

- [1] Andrew J. Power, “An overview of transmission fault current limiters”, IEE, Savoy Place, London, UK, pp1-5, 1995.
- [2] F. Mumford; A. Usorkin, “Inductive and resistive HTS Fault Current Limiters”, *AREVA T&D+Bruker HTS, Areva Research Centre, Braunschweig*, pp 12-35, May 13.2009.
- [3] Jin-Seok Kim; Sung-Hun Lim; Jae-Chul Kim, „Comparative Analysis on Current Limiting Characteristics of Hybrid Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) with First Half Cycle Limiting and Non Limiting Operations”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Volume 7, No. 5, pp 659-663, 2012.
- [4] Paul Hopewell; Mark Husband; Alexander Smith, “A practical superconducting fault current limiter”, *CIREC, 20th International Conference on Electricity Distribution*, pp1-4, Prague 8-11 June 2009.
- [5] Manuel Weiland; Christoph Hahn; Gerhard Herold, “Control Strategies for a Power Electronic Based Fault Current Limiter (FCL) in No-Fault Operation”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 2012)*, Santiago de Compostela (Spain), pp 1-5, 28th to 30th March, 2012.
- [6] Nasser Tleis, “Power Systems Modeling and Fault Analysis”, Elsevier, Burlington - SAD, 532-533, 2008.
- [7] Milenko Đurić, „Visokonaponska postrojenja”, Beopres, Beograd, pp161-206, 2009.

Abstract - The increase of fault current level, caused by network topology changes or new power source addition, can cause that certain circuit breakers and other equipment in facilities cannot longer properly be used. Meanwhile, the new fault current limiter (FCL) technologies have appeared on the market. Their application may postpone the investments in new switchgear equipment. The most of FCLs are based on superconductors or electronic elements. In this paper it is shown on a practical example how fault current level raises when new generators are added to a network, at which place is suggested to implant FCL and which effects are achieved. Energy efficiency of FCLs is also important and it is given at the end of this paper. Along with the technical calculation, a short economic analysis is given.

MODERN METHODS FOR FAULT CURRENT LIMITING IN POWER GRIDS IN ENERGY EFFICIENCY SERVICE

Branimir N. Petrović

PREDVIĐANJE MESEČNE POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE NA NIVOU PRIGRADSKE TRAFOSTANICE

Jelena Milojković, ICNT, Niš, Srbija, jelena.milojkovic@icnt.rs,
Vančo Litovski, Elektronski fakultet u Nišu, Niš, Srbija, vanco.litovski@elfak.ni.ac.rs
Miljana Milić, Elektronski fakultet u Nišu, Niš, Srbija, miljana.milic@elfak.ni.ac.rs

Sadržaj – U ovom radu je predstavljeno predviđanje mesečne potrošnje električne energije na nivou trafostanice, zasnovano na kratkim vremenskim nizovima. Kao prvo, ovde će biti prikazano, da pri kratkoročnom predviđanju, iako nam je na raspolaganju veliki broj podataka, samo neki od njih mogu biti od interesa. To dovodi do predviđanja na osnovu ograničene količine podataka. Mi ovde predlažemo korišćenje veštačkih neuronskih mreža kao moguće sistematsko rešenje problema, kao suprotnost u odnosu na heurističke modele koji su u upotrebi. Predlažemo dve arhitekture VNM koje su nezavisno razvijene a čija se predviđanja uporedo koriste i usrednjavaju. Takođe, ovde je predstavljen i novi način izbora broja neurona u skrivenom sloju. Predviđanja su zasnovana na realnim podacima. Postignuta greška je manja od dva procenta što smatramo izuzetnim rezultatom.

Ključne reči: Predviđanje, električna energija, veštačke neuronske mreže

1. UVOD

U svom nadahnutom radu [1] profesor Mendel tvrdi: „Predviđanje kratkih vremenskih nizova predstavlja aktuelan problem. Slučajevi gde je dužina uzorka N suviše mala za dobijanje statistički pouzdanih varijanti, veoma su česti. Ova forma karakteristična je za mnoge važeće probleme kod predviđanja u marketingu, politikologiji, investicionom planiranju, i drugim oblastima.“ On dalje navodi: „Statistička analiza ukazuje da predviđanje osnovnog perioda treba da sadrži nekoliko stotina jedinica da bi se pažljivo uzele u obzir sve komponente. Za periode od nekoliko desetina jedinica, zadovoljavajuća predviđanja mogu se izvesti samo za vremenske nizove koji se mogu predstaviti kao zbir trendovskih, sezonskih i slučajnih komponenti. Sem toga, ovi modeli moraju imati veoma ograničen broj parametara. Nizovi koji se sastoje od zbira komponente trenda i slučajne komponente, ponekad se mogu predvideti i za manji osnovni period. Konačno, za osnovni period predviđanja manji od neke izračunate vrednosti N_{min} , više ili manje zadovoljavajuće predviđanje na osnovu posmatranja sasvim je nemoguće, i potrebni su dodatni podaci.“

Među oblastima koje nisu pomenute u [1], baveći se zaista malim skupom podataka ili „osnovnim periodom predviđanja“, ovde ćemo razmatrati mesečno kratkoročno predviđanje potrošnje električne energije na prigradskom nivou ili na nivou niskonaponske trafostanice. U stvari, količina raspoloživih podataka u ovom slučaju dovoljno je velika da se primeni bilo koji drugi način predviđanja [2,3,4], ali uzimajući u obzir dijagram opterećenja, odnosno vrednosti krive mesečne potrošnje, možemo lako prepoznati da prethodne vrednosti potrošnje električne energije nisu od

velike pomoći kada se radi o predviđanju. To važi čak i za podatke iz prethodnog meseca, a i za podatke iz istog meseca u prethodnoj godini. Shodno tome, predlažemo da se problem predviđanja vrednosti potrošnje u narednom mesecu predstavi kao determinističko predviđanje bazirano na vrlo kratkim vremenskim nizovima. Međutim da bi se na odgovarajući način potpomoglo predviđanje, uvodimo prošle vrednosti npr. potrošnju za isti mesec ali u prethodnoj godini. Ovo je u skladu sa postojećim iskustvom prema kome svaki mesec u godini ima svoj sopstveni profil opšte potrošnje [2].

Imajući sve to u vidu, započeli smo projekat razvijanja metode zasnovane na veštačkoj neuronskoj mreži (VNM) koja će biti pogodna za sistematsku primenu u predviđanju stacionarnih vremenskih nizova sa redukovanim skupom podataka. Naši prvi rezultati bili su primenjeni u predviđanju ekoloških i tehnoloških podataka i objavljeni su u [5, 6, 7]. Analiza o tome zašto se neuronske mreže primenjuju za predviđanje može se naći u [5]. Glavna ideja koja je realizovana bila je sledeća: ako neko želi da stvori neuronsku mrežu koja se može koristiti za predviđanje treba da omogući ovu osobinu tokom obuke za VNM. Pored toga, VNM koja se koristi mora da ima takvu strukturu da može da se prilagodi procesu obuke za predviđanje.

Nakon ovih razmatranja razvijene su nove arhitekture mreža za predviđanja. Naime, predviđanje je aktivnost koja se uvek odnosi na neizvesnost. Potrebno je da imamo najmanje dva rešenja da bi jedno podržalo drugo. Strukture koje su razvijene nazvane su Time Controlled Recurrent (TCR) (rekurentna mreža sa vremenskom kontrolom) i Feed Forward Accommodated for Prediction (FFAP) (nerekurentna mreža prilagođena za predviđanje). Obe su uspešno realizovane za predviđanje u savremenim kretanjima u mikroelektronici [7], kao i u drugim oblastima, uključujući predviđanje potrošnje na godišnjem nivou [8].

Cilj ovog rada je da ove nove metode postavi u širi kontekst implementacije VNM za kratkoročno predviđanje potrošnje električne energije na mesečnom nivou. Naime, kriva mesečne potrošnje na prigradskom nivou (trafostanica) zavisi od nekoliko faktora od kojih je najvažniji godišnje doba. Shodno tome, mreža treba da bude u stanju da približi dve krive istovremeno. Da bi se ovo zadovoljilo, nadgradili smo naše originalne TCR i FFAP VNM strukture kako bi se prilagodili za primenu u oblasti kratkoročnih predviđanja potrošnje električne energije na nivou dva sata. Dobijeni rezultati objavljeni su u [9] i [10], za ETCR i EFFAP, respektivno. Ove ideje će sada biti realizovane za mesečna predviđanja. Pored toga, ovde predlažemo metod usrednjavanja koji će koristiti oba predviđanja kako bi ublažio grešku u predviđanju i tako učinio konačan rezultat pouzdanim, koliko god je to moguće. Na kraju, predlažemo

metod za pronalaženje odgovarajućeg broja neurona u skrivenom sloju za obe mreže.

Struktura ovog rada je sledeća: nakon opštih definicija i navođenja problema, daćemo dati kratak osvrt u vezi sa primenom VNM u predviđanju. Potom ćemo opisati dva rešenja za moguće primene VNM usmerene na isto zadato predviđanje. Na kraju ćemo predstaviti ukratko razmatranje rezultata i ono što treba uzeti u obzir vezano za rad u budućnosti.

2. FORMULACIJA PROBLEMA I REŠENJA

Vremenski niz je skup uzoraka koji su uzeti u ravnomernim vremenskim razmacima. Vremenski niz koji može tačno da se predvidi nazivamo determinističkim. Vremenski niz čije se buduće vrednosti mogu samo delimično da odrede na osnovu prethodnih pri čemu se tačna vrednost ne može znati, nazivaju se stohastičkim. Mi ćemo ovde da razmatramo samo determinističke nizove.

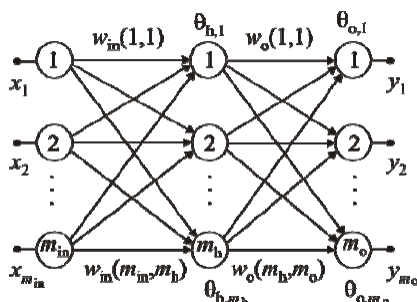
Razmotrimo skalarni vremenski niz obeležen sa $y_i, i=1,2, \dots, m$. On predstavlja skup uzoraka nepoznate funkcije $\hat{y} = \hat{f}(t)$ koji su uzeti u jednakim vremenskim intervalima Δt tako da je $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, gde je t vreme, a i brojač uzoraka. Predviđanje jedan korak unapred znači naći funkciju koja obavlja preslikavanje

$$y_{m+1} = f(t_{m+1}) = \hat{y}_{m+1} + \varepsilon, \quad (1)$$

gde je \hat{y}_{m+1} željeni odziv, a ε je prihvatljiva maksimalna greška.

Predviđanje vremenskog niza je sinonim za modeliranje osnovnog fizičkog ili društvenog procesa odgovornog za njegovo stvaranje. To čini razlog težine ovog zadatka. Bilo je mnogo pokušaja da se pronađe rešenje za ovaj problem. Među klasičnim determinističkim metodama možemo pomenuti k—najbližeg suseda [11], u kojoj se traži niz podataka za situacije slične onoj trenutnoj svaki put kada je potrebno da se napravi prognoza. Ovaj metod zahteva periodičnost da bi se koristio a to, kao što je već rečeno, ovde nije mnogo od pomoći.

U proteklih nekoliko decenija VNM su se pojavile kao tehnologija koja mnogo obećava u pogledu identifikovanja i modelovanja podataka koje nije lako uočiti tradicionalnim metodama.



Sl. 1. Potpuno povezana nerekurventna VNM sa jednim skrivenim slojem i više izlaznih priključaka

Sveobuhvatan pregled korišćenja VNM u predviđanju može se naći u [12]. Među mnogim uspešnim implementacijama možemo pomenuti [13]. Međutim, zajednička karakteristika postojećih primena je da one

zahtevaju relativno dug vremenski niz da bi bile delotvorne. Tipično, on ne bi trebalo da bude kraći od 50 jedinica podataka [12]. U slučaju koji razmatramo to znači najmanje pet godina unazad. Ovo je zbog činjenice da svi oni zahtevaju periodičnost korišćenih podataka. U našem slučaju, tretirani su veoma kratki vremenski nizovi [13]. Ovde je vremenskim nizovima dodata dopunska „neuzorkovana informacija“ kako bi se dobila statistička procena iz determinističkih podataka.

Zbog toga smo krenuli u potragu za topološkim strukturama VNM koje obećavaju predviđanje na osnovu kratkih vremenskih nizova. U daljem tekstu ćemo najpre, da uvedemo nerekurventnu VNM koja će kasnije da bude korišćena kao osnovna struktura za razvoj drugih koje ćemo koristiti za predviđanje.

Mreža je prikazana na Sl. 1. Ima samo jedan skriveni sloj što je dovoljno za ovu vrstu primena [14]. Indeksi: „in“, „h“, i „o“, na ovoj slici, označavaju ulazni, skriveni i izlazni sloj, respektivno. Za skup težina, $w(k, l)$, koje povezuju ulazni i skriveni sloj važi: $k=1,2, \dots, m_{in}, l=1,2, \dots, m_h$, a za one koje povezuju skriveni i izlazni sloj važi: $k=1,2, \dots, m_h, l=1,2, \dots, m_o$. Pragovi su obeleženi sa $\theta_{x,mr}, r=1,2, \dots, m_h$ ili m_o , pri čemu x stoji umesto „h“ ili „o“, zavisno od sloja. Neuroni u ulaznom sloju jednostavno distribuiraju signale, a oni u skrivenom sloju imaju sigmoidnu (logističku) aktivacionu funkciju. Najzad, neuroni u izlaznom sloju aktiviraju se linearnom funkcijom. Koristili smo algoritam obuke koji predstavlja modifikovanu verziju metode najbržeg spusta [15]. Broj neurona u skrivenom sloju, m_h , biće od ključnog značaja. Da bi ga odredili biće primenjena procedura data u [16], koja je u ovom radu dodatno razrađena.

Pri predviđanju vremenskih nizova, u našem slučaju, dat je takav skup uzoraka (približno svakih petnaest minuta) da je samo jedan ulazni signal vremenski diskretizovan [17]. Da bi dobili srednju mesečnu potrošnju mi smo izvršili usrednjavanje vrednosti za svaki mesec. Saglasno (1) predviđamo jednu vrednost za dati trenutak, što znači da imamo jedan izlaz, takođe. Vrednost izlaznog signala je broj, odnosno srednja snaga za period od jednog meseca. Da bi problem učinili matematički lakše obradivim obavili smo jednu jednostavnu transformaciju ulaznih i izlaznih podataka. Vreme je redukovano sa t_0 , tako da je:

$$t = t^* - t_0. \quad (2)$$

Treba imati u vidu da se t^* odnosi na vremensku promenljivu (u mesecima), tako da je vrednost nula dodeljena prvom uzorku (t_0). Vrednosti izvornih uzoraka smo redukovali prema relaciji

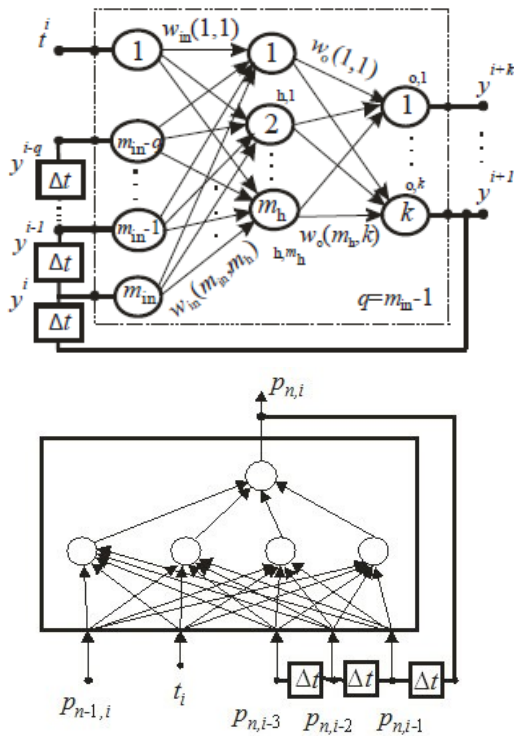
$$y = y^* - M \quad (3)$$

gde y^* stoji umesto trenutne vrednosti tražene funkcije, a M je pogodno izabrana konstanta (ovde $M=596,8595$ i predstavlja srednju mesečnu potrošnju električne energije u toku jedne godine).

Kada bi se implementirala arhitektura prikazana na Sl. 1. (sa jednim ulazom i jednim izlazom), VNM bi bila obučavana da reprodukuje niz: $(t_i, f(t_i)), i=1,2, \dots$

Polazeći sa osnovnom strukturom prikazanom na Sl. 1 u [6] su istraživana moguća rešenja pa su predložene dve nove arhitekture kao najpogodnije za rešavanje problema predviđanja na osnovu kratkog osnovnog vremenskog

intervala. Ovde će, međutim, imajući u vidu dostupnost podataka koji se odnose na prethodnu godinu, ove arhitekture biti adekvatno prilagođene.



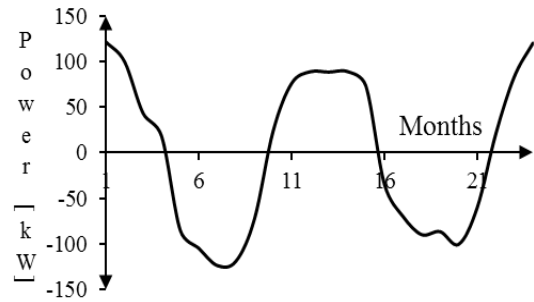
Sl. 2. a) Rekurentna VNM kontrolisana vremenom i b) ETCR. Proširena rekurentna VNM kontrolisana vremenom

Prva, *time controlled recurrent* (TCR), bila je inspirisana od tzv. “*time delayed recurrent*” VNM. To je rekurentna arhitektura sa vremenom kao ulaznom promenljivom koje kontroliše vrednost koju predviđamo. Naša namera bila je da imamo koristi od obe: koristimo osobinu generalizacije koju poseduju VNM i uspešnost rekurentne arhitekture. Njena struktura je prikazana na Sl. 2a. Sada proširujemo tu arhitekturu tako da omogućavamo vrednostima potrošnje električne energije, u datom trenutku dnevno, ali istog meseca prethodne godine, da kontrolišu izlaz.

Ovde ćemo dodati pojam „proširen“. Dobijena arhitektura prikazana je na Sl. 2b. Od sada pa nadalje nazivaćemo je Extended Time Controlled Recurrent (ETCR) arhitektura (proširena rekurentna arhitektura vremenski kontrolisana). Ovde u stvari, mreža uči skup podataka u kome je izlazna vrednost koja predstavlja prosečnu potrošnju električne energije za dati mesec u datoj godini, kontrolisana trenutnim vremenom i svojim sopstvenim prethodnim instancama:

$$P_{n,i} = f(t_i, P_{n,i-1}, P_{n,i-2}, P_{n,i-3}, P_{n-1,i}) \quad i = 1, 2, 3 \dots (4)$$

Ovde n stoji za za broj datog meseca (u godini). Na taj način su vrednosti indeksirane sa n iz tekuće godine, dok je vrednost indeksirana sa $n-1$ iz prethodne godine. i se odnosi na i -ti uzorak u izabranoj godini. Stvarna vrednost $p_{n,i}$ je nepoznata i treba da se predvidi. Inkrementirajući i , u stvari, pomeramo prozor predviđanja za jedan korak unapred. Ove količine predstavljene su na Sl. 3. Ona predstavlja krivu opterećenja za dve godine. Treba obratiti pažnju da se x-osa svodi na prvi dostupni mesec dok je y-osa redukovana u odnosu na prosečnu mesečnu vrednost potrošnje.



Sl. 3. Usrednjena vrednost snage (redukovana sa 596,8595) u odnosu na vreme (mesece)

Druga struktura VNM nazvana je “*feed forward accommodated for prediction*” (FFAP) i prikazana na Sl. 4a. Ovde smo se vodili idejom da VNM treba da nauči više puta istu funkciju (na svakom od izlaza) ali sa vremenskim pomerajem. Na taj način, pretpostavili smo, prethodni odzivi mreže će imati veći uticaj na preslikavanje $f(t)$.

U ovoj arhitekturi VNM na ulazu imamo jednu promenljivu, u našem slučaju to je vremenska promenljiva t_i . Izlaz3, na kome se dobija tražena vrednost potrošnje, se u ovom slučaju forsira da aproksimira y_{i+1} . U slučajevima više koračnog predviđanja, Izlaz2 može biti viđen kao vector. Izlaz2 predstavlja trenutnu vrednost odnosno y_i , dok bi Izlaz1 trebalo da uči vrednost iz prošlosti, to jest y_{i-1} . Takođe, ako se želi da se na preslikavanje utiče sa više vrednosti iz prošlih trenutaka, Izlaz1 se može računati kao vector.

Kao jedan primer na kome se može videti funkcionalnost mreže je sledeći:

$$\{y_{i+1}, y_i, y_{i-1}, y_{i-2}\} = f(t_i), \quad i=3, 4, \dots (5)$$

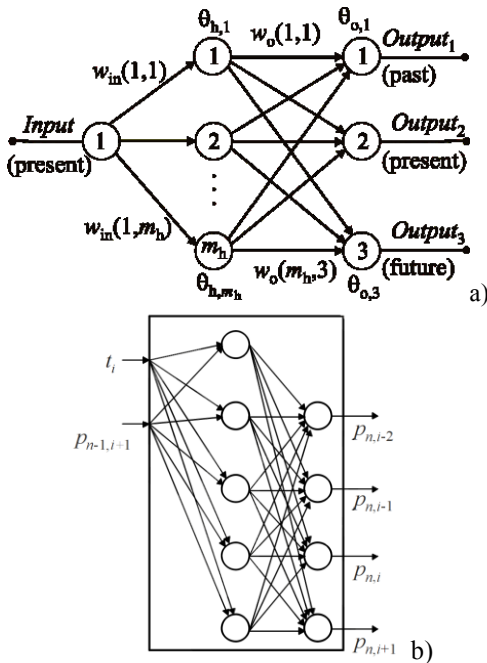
gde $Izlaz = \{y_{i+1}, y_i, y_{i-1}, y_{i-2}\}$, u stvari predstavlja: jednu buduću ($i+1$), jednu sadašnju (i), i dve prethodne ($i-1, i-2$) vrednosti koje mreža treba da nauči (Izlaz1 se vidi kao vector).

Naša iskustva tokom rada sa ovim dvema strukturama VNM su pokazala da FFAP daje bolje rezultate od TCR mreže. Ipak, primenom obe strukture dobijamo rezultate koje upoređujemo, pri čemu odabiramo predviđanje koje ima najviše smisla. Na taj način izbegavamo rešenje koje predstavlja lokalni minimum prilikom optimizacije procesa učenja veštačke neuronske mreže.

U našem slučaju predviđanja potrošnje struje na sat, proširili smo FFAP arhitekturu na indentičan način kao što smo proširili TCR. U tom slučaju, za aproksimaciju funkcije važi sledeće:

$$\{p_{n,i+1}, p_{n,i}, p_{n,i-1}, p_{n,i-2}\} = f(t_i, p_{n-1,i}) \quad i=1, 2, 3 \dots (6)$$

Sada nova VNM uči buduću (nepoznatu) vrednost $p_{n,i+1}$, na osnovu stvarnog vremena t_i , sadašnje potrošnje $p_{n,i}$, vrednostima ranije potrošnje za datu godinu ($p_{n,i-k}, k=1, 2, 3$), i vrednostima ranije potrošnje za isti mesec ali prethodne godine ($p_{n-1,i}$). Nova struktura VNM nazvana je *extended feed forward accommodated for prediction* (EFFAP). Ona je prikazana na Sl. 4b.



Slika 4. a) Nerekurentna VNM prilagođena za predviđanje (FFAP), i b) Proširena nerekurentna VNM prilagođena za predviđanje (EFFAP) saglasno (6)

U narednoj proceduri opisaćemo implementaciju ETCR i EFFAP mreže. Ona se sastoji od sledećih koraka:

KORAK 1. Za dati mesec (i -ti mesec) napravljena je tabela za obuku za obe strukture VNM. Ove konstrukcije prikazane su na Tabeli I i Tabeli II, za ETCR i EFFAP mrežu, respektivno, za $i=18$.

KORAK 2. Obe mreže se u više navrata obučavaju sa istim podacima za obuku ali sa povećanom složenosti, odnosno sa povećanim brojem skrivenih neurona. Počinjemo sa $m_h=3$ i završavamo sa $m_h=10$. Izabrano je da broj neurona bude „mali“ jer problem koji se razmatra nije težak. Ne treba zaboraviti da će ETCR VNM, poput one prikazane na Sl. 2. koja ima 10 skrivenih neurona, imati 70 slobodnih parametara što je znatno iznad potrebe da se približi kriva prikazana na Sl. 3.

KORAK 3. Kako bi našli odgovarajući ETCR i EFFAP broj neurona, upoređujemo predviđene vrednosti. Naime, smatramo da je predviđanje poput koraka u tami, i da bi se dobilo autentično predviđanje, mislimo da su potrebna najmanje dva rešenja koja podržavaju jedno drugo (dobro poznato kao „drugo mišljenje“ u medicini). Na taj način biramo dva između osam ETCR i osam EFFAP rešenja (po jedno od svake vrste) koja su najbližija.

KORAK 4. Pošto su upravo izabrana ETCR i EFFAP rešenja od iste važnosti, kao krajnji rezultat, usvajamo njihovu prosečnu vrednost.

KORAK 5. Zatim prelazimo na sledeći mesec.

3. PRIMER PRIMENE

Dijagram prikazan na Sl. 3. sačinjen je od UNITE takmičarskih podataka [17]. Pošto postoje podaci samo za dve godine, kreirali smo 24 instance kao što je prikazano na Sl. 3. Međutim, imajući na umu da naš metod zahteva vrednost potrošnje za isti mesec u prethodnoj godini, treba rezervisati prvih 12 instanci. Pored toga, da bi započeli predviđanje potrebne su nam neke vrednosti iz prethodnih meseci. Iz ovih razloga započeli smo predviđanje sa četvrtim delom podataka, to jest od 19-tog meseca.

Tabela 1 i Tabela 2 su primeri seta za obuku za prvo predviđanje. Ostali deo seta za obuku dobija se „klizanjem“ niz tabelu potrošnje kao funkcija datog meseca.

Od rezultata **KORAKA 3.** koji su opisani u prethodnom pasusu, napravljena je Tabela 3. Dok se njen sadržaj može sam po sebi objasniti, ovde ćemo ponovo naglasiti da su između predviđanja za dati mesec, tražena dva najbližija. Tako, na primer, za dvadeset drugi mesec predviđanja ETCR VNM sa četiri skrivena neurona, i EFFAP VNM sa sedam skrivenih neurona, bila su dva najbližija. Ova dva su bila odabrana i izračunat je prosek.

Tabela 1: Podaci za jedno učenje za ETCR

t_n	Ulazi				Izlazi
	$p_{n-1,i}$	$p_{n-2,i}$	$p_{n-3,i}$	$p_{n,i-1}$	$p_{n,i}$
13	88.9537	76.16484	23.58744	121.6963	88.54376
14	88.54376	88.9537	76.16484	99.9508	89.14276
15	89.14276	88.54376	88.9537	43.22303	73.22104
16	73.22104	89.14276	88.54376	18.00998	-34.8074
17	-34.8074	73.22104	89.14276	-85.0241	-69.965
18	-69.965	-34.8074	73.22104	-104.965	-89.8928
19	-89.8928	-69.965	-34.8074	-123.849	? = $p_{n,19}$

Tabela 2: Podaci za jedno učenje za EFFAP

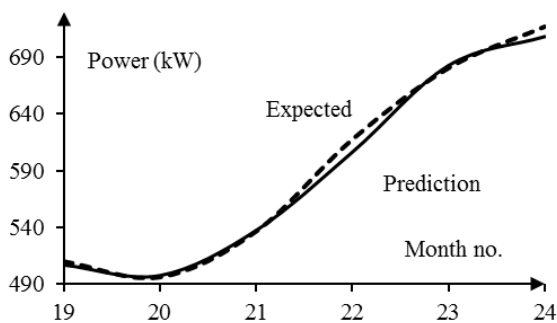
t_i	Izlazi				
	$p_{n-1,i}$	$p_{n,i-2}$	$p_{n,i-1}$	$p_{n,i}$	$p_{n,i+1}$
12	121.6963	23.58744	76.16484	88.9537	88.54376
13	99.9508	76.16484	88.9537	88.54376	89.14276
14	43.22303	88.9537	88.54376	89.14276	73.22104
15	18.00998	88.54376	89.14276	73.22104	-34.8074
16	-85.0241	89.14276	73.22104	-34.8074	-69.965
17	-104.965	73.22104	-34.8074	-69.965	-89.8928
18	-123.849	?	?	?	? = $p_{n,19}$

Tabela 3: Najbližija ETCR i EFFAP rešenja sa transformisanim ulaznim podacima

t_n	ETCR		EFFAP		Srednja vr. (p)	Očekivana vrednost
	m_h	p	m_h	p		
19	3	-95.5011	4	-83.9625	-89.7318	-86.6497
20	9	-94.309	3	-103.751	-99.03	-100.462
21	7	-85.2832	7	-33.3583	-59.3208	-60.1296
22	4	2.09448	7	17.3844	9.73944	20.94362
23	4	87.2713	7	84.9242	86.097	83.82734
24	4	100.231	3	122.701	111.466	120.2991

Tabela 4: Najbližija ETCR i EFFAP rešenja sa originalnim ulaznim podacima

t_n	ETCR		EFFAP		Srednja vr. (p)	Očekivana vrednost
	m_h	p	m_h	p		
19	3	501,358	4	512,897	507,128	510,2098
20	9	502,551	3	493,109	497,830	496,3975
21	7	511,576	7	563,501	537,539	536,7299
22	4	598,954	7	614,244	606,600	617,8031
23	4	684,131	7	681,784	682,957	680,6868
24	4	697,091	3	719,561	708,326	717,1586

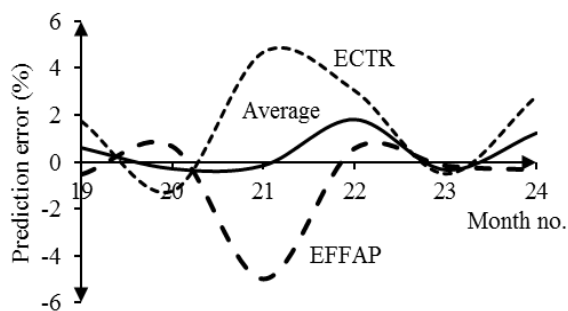


Sl. 5. Vizuelizacija poslednje dve kolone u Tabeli IV

Da bi se dovršilo predviđanje, trebalo je obnoviti vrednosti koje je proizvela redukcija (3). Ovo je praktično značilo da su sve stavke iz Tabele 3 trebalo da budu inkrementirane za 596,8595. Na taj način je kreirana Tabela 4. Slika 5. prikazuje poslednje dve kolone Tabele 4. Naime, očekivane i predviđene vrednosti prikazane su zajedno.

Tabela 5: Greška predviđanja

t_n	Error (%) ECTR	Error (%) EFFAP	Error (%) Average
19	1,735	-0,5267	0,604
20	-1,240	0,6625	-0,289
21	4,687	-4,988	-0,151
22	3,051	0,576	1,813
23	-0,506	-0,161	-0,334
24	2,798	-0,335	1,232



Sl. 6. Greška predviđanja (u %) za ECTR, EFFAP i srednja vrednost (Grafičko objašnjenje Tabele V)

Na kraju, da bismo dobili još bolji uvid u rezultate, izračunali smo grešku predviđanja i prikazana je u Tabeli V. Kao što se može videti greška prosečne vrednosti u odnosu na onu očekivanu, manja je od 2% u svih šest slučajeva. Grafički prikaz Tabele 5 dat je na slici 6.

Zanimljivo je napomenuti da su greške predviđanja ECTR i EFFAP VNM mnogo veće (manje od 6%). To znači da najgore predviđanje nikada neće preći ovu vrednost. U našem slučaju, izračunavanje proseka je dovelo do izuzetno dobrog rezultata.

6. ZAKLJUČAK

Predstavljeno je predviđanje prosečne potrošnje električne energije jedne prigradske trafostanice, na mesečnom nivou, na osnovu kratkih vremenskih nizova. Najpre smo pokazali

da kod kratkoročnog predviđanja potrošnje električne energije, čak i kada je na raspolaganju velika količina podataka, samo oni podaci koji su najnoviji mogu biti od značaja. Ovo daje povoda za predviđanje na osnovu ograničene količine podataka. Ovde smo predložili implementaciju nekih arhitektura veštačkih neuronskih mreža kao potencijalnog sistemskog rešenja tog problema, za razliku od heurističkih koje su u upotrebi. Da bi se dodatno podigla zavisnost predviđenih podataka, predložili smo izračunavanje proseka dva nezavisna predviđanja. Sproveden je poseban pristup u biranju broja skrivenih neurona. Prikazali smo primer u vezi sa mesečnim predviđanjem potrošnje električne energije na prigradskom nivou. Predviđanje je izvršeno na realnim podacima uzetim iz literature. Dobili smo greške predviđanja koje su manje od dva posto.

ZAHVALNOST

Ova su istraživanja delimično finansirana od strane Ministarstva Prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije po ugovoru br. TR32004

LITERATURA

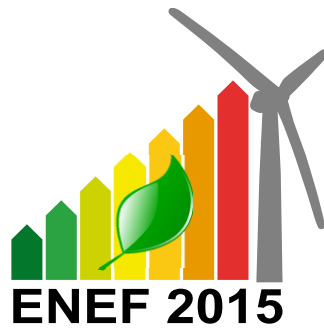
- [1] A. S., Mandel', "Method of Analogs in Prediction of Short Time Series: An Expert-statistical Approach", Automation and Remote Control, Vol. 65, No. 4, April 2004, pp. 634-641.
- [2] P., Murto, "Neural Network Models for Short -Term Load Fore-casting", M S Thesis, Helsinki University of Technology, 1998.
- [3] F., Cavallaro, "Electric load analysis using an artificial neural network", Int. J. of Energy Research, Vo l. 29, 2005, pp. 377-392.
- [4] H., Hahn, S., Meyer-Nieberg, and S., Pickl, "Electric load fore-casting methods: Tools for decision making", European J. of Operational Research, Elsevier, Vol. 199, 2009, pp. 902-907.
- [5] J. Milojković, V. B. Litovski, "New methods of prediction implemented for sustainable development", Proc. of the 51th Conf. ETRAN, Herceg Novi, Monte Negro, June 2007, Paper no. EL1.8 (in Serbian).
- [6] J. Milojković, V. B. Litovski, "Comparison of some ANN based forecasting methods implemented on short time series", Proc. of the 9th Symp. NEUREL-2008, Belgrade, ISBN 978-1- 4244-2903-5, Sept. 2008, pp. 175-178.
- [7] J. Milojković, V. B. Litovski, "Short term forecasting in Electronics", Int. J. of Electronics, Vol. 98, No. 2, 2011, pp. 161-172.
- [8] J. Milojković, V. B. Litovski, O., Nieto-Taladriz, and S., Bojanić, "Forecasting Based on Short Time Series Using ANNs and Grey Theory – Some Basic Comparisons", In Proc. of the 11th Int. Work-Conf. on Artificial Neural Networks, IWANN 2011, June 2011, Torremolinos-Málaga (Spain). J. Cabestany, I. Rojas, and G. Joya (Eds.): Part I, LNCS 6691, pp. 183-190, 2011, © Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [9] J. Milojković, V. B. Litovski, „Dynamic Short-Term Fore-casting Of Electricity Load Using Feed-Forward

- ANNs", Int. J. of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communication, Vol. 17, No. 1, March 2009, pp. 38-48.
- [10] J. Milojković, V. B. Litovski, "Short-term Forecasting of Electricity Load Using Recurrent ANNs", "Electronics", ISSN: 1450-5843, Vol. 14, No. 1, June 2010, pp. 45-49.
- [11] E.A., Plummer, "Time series forecasting with feed-forward neural networks: guidelines and limitations", M.S. Thesis, University of Wyoming, Laramie, USA, July 2000.
- [12] B.G., Zhang, "Forecasting with artificial neural networks: The state of the art", Int. J. of Forecasting, Vol. 14, No. 1, March 1998, pp. 35-62
- [13] K., Brännäs, and J., Hellström, "Forecasting based on Very Small Samples and Additional Non-Sample Information", Umeå Economic Studies 472, Umeå University, Sweden, 1998
- [14] T., Masters, "Practical Neural Network Recipes in C++", Academic Press, San Diego, 1993.
- [15] Z., Zografski, "A novel machine learning algorithm and its use in modeling and simulation of dynamical systems", in Proc. of 5th Annual European Computer Conf., COMPEURO '91, Hamburg, Germany, 1991, pp. 860-864.
- [16] E.B., Baum, and D., Haussler, "What size net gives valid generalization", Neural Computing, 1989, Vol. 1, pp. 151-160.
- [17] World-wide competition within the EUNITE network, 2001, <http://neuron.tuke.sk/competition>.

***Abstract**— One month ahead prediction of suburban average electricity load, based on short time series, is presented. It will be shown here first that for the subject of short term prediction of electricity load, even though a large amount of data may be available, only the most recent of it may be of importance. That gives rise to prediction based on limited amount of data. We here propose implementation of some instances of architectures of artificial neural networks as potential systematic solution of that problem as opposed to heuristics that are in use. To further rise the dependability of the predicted data averaging of two independent predictions is proposed. A specific approach to the choice of the number of hidden neurons will be implemented. Example will be given related to monthly forecasting of the electricity load at suburban level. Prediction is carried out on real data taken from the literature. Prediction errors lower than two percent were obtained.*

ONE MONTH AHEAD PREDICTION OF SUBURBAN AVERAGE ELECTRICITY LOAD

Jelena Milojković, Vančo Litovski, Miljana Milić



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015
25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesija B2

Sesija B2

Edin Dolićanin, Bojan Kovačić, Božidar Stanić

**PROJEKAT ENERESE U SVETLU SVEOBUHVAATNOG PRISTUPA VISOKOŠKOLSKOJ
NASTAVI IZ OBLASTI ENERGETSKE EFIKASNOSTI79**

Tatjana Pešić-Brđanin, Branko Dokić

ENERGETSKI EFIKASNA UNUTRAŠNJA POLUPROVODNIČKA RASVETA83

Danijela Kardaš, Petar Gvero, Nijaz Delalić, Siniša Rodić

SISTEMSKO UPRAVLJANJE ENERGIJOM U BOSNI I HERCEGOVINI87

PROJEKAT ENERESE U SVETLU SVEOBUHVAATNOG PRISTUPA VISOKOŠKOLSKOJ NASTAVI IZ OBLASTI ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Edin Dolićanin, Bojan Kovačić, Božidar Stanić, Državni univerzitet u Novom Pazaru

Sadržaj – Univerziteti, zapravo tehnički fakulteti, u Srbiji imaju dugu tradiciju i veoma dobro znanje za obrazovanje mladih talentovanih ljudi u različitim disciplinama tehnike. Energetski sektor je uvek bio jedan od prioriteta, ali u vezi sa najnovijim trendovima iz energetske efikasnosti (EE) i obnovljivih izvora energije (OIE), posebno onih definisanih kao u zemljama EU, do sada nije bilo šire implementacije. Na univerzitetima u regionu zapadnog Balkana (WB) još uvek nema u dovoljnoj meri sistematskog i sveobuhvatnog pristupa visokom obrazovanju u oblasti EE i OIE. Upravo zbog toga i imajući u vidu značaj pitanja održive energije, TEMPUS regionalni projekat ENERESE, u saradnji šest univerziteta sa područja WB i četiri iz EU, razvio je za akreditaciju i realizaciju dvogodišnji master studijski program.

1. UVOD

Otvaranjem studijskog programa "Energetska efikasnost u zgradarstvu" 2011. godine, u okviru Departmana za multidisciplinarnu nauku, Državni univerzitet u Novom Pazaru (DUNP) započeo je sa realizacijom obrazovanja stručnjaka u oblasti energetske efikasnosti koja je od izuzetne važnosti za region Raške oblasti (Sandžaka) i Republiku Srbiju u celini [1]. Kao što je poznato, zgrade su odgovorne za potrošnju oko 40% finalne energije u Srbiji, a slično je u zemljama Evropske unije. Poboljšanje energetske performansi zgrada je isplativ način borbe protiv klimatskih promena (spada u mere mitigacije) i doprinosi povećanju energetske sigurnosti i stvaranju novih mogućnosti za zapošljavanje, posebno u oblasti građevinarstva. Uvršćivanjem ovog studijskog programa u redovan nastavni program, DUNP je započeo sa sistemskim planiranjem i realizacijom razvojnih programa novih nastavnih modula o energetske efikasnosti i obnovljivim izvorima energije (OIE). Saglasno sa time, usled izražene potrebe za unapređenjem uslova i mera za racionalno korišćenje energije i energenata u Novopazarskom regionu, sredinom 2012. godine formiran je Regionalni centar za energetske efikasnost (RCEENP), kao organizaciona jedinica Državnog univerziteta u Novom Pazaru, koja predstavlja sastavni deo mreže sličnih regionalnih centara u Srbiji.

Da bi se podigla svest svakog pojedinca u društvu, potrebno je zajedničkim naporima, argumentovano i kompetentno uticati na promenu stavova i odnosa prema energiji i energentima, kao i na ponašanje naše omladine, lokalne samouprave, privrednog i javnog sektora prema energiji. Mladi obrazovani ljudi u Srbiji su najvažnija ciljna grupa, koji će, ako im se pruži šansa i podrška, imati priliku da postanu društveno odgovorni građani i uvere se u dugoročne efekte primena mera energetske efikasnosti i šireg korišćenja OIE.

2. VISOKO OBRAZOVANJE U FUNKCIJI ODRŽIVOG RAZVOJA

Danas nema skoro nijedne ekonomski razvijenije zemlje sveta koja nema posebnu politiku ili strategiju podsticanja ekonomije zasnovane na znanju. Pošto je više puta spomenula značaj ekonomije zasnovane na znanju, Evropska unija (EU) je 2000. godine u Lisabonskoj strategiji istakla da EU "do 2010. godine treba da postane najkonkurentnija i najdinamičnija svetska ekonomija zasnovana na znanju, sposobna za održiv ekonomski rast s više radnih mesta i s bolje plaćenim radnim mestima". Promena ekonomske strukture od dominacije primarnog sektora, koji čine uglavnom poljoprivreda i ekstraktivna industrija, preko sekundarnog sektora (dominacija prerađivačke industrije), ka terciarnom sektoru u kome dominiraju usluge, dovodi do rasta proizvodnje, zaposlenosti i životnog standarda. Uporedo s povećanjem broja ekonomskih subjekata, posebno zahvaljujući širenju trećeg sektora i uticaju informacija i znanja, povećava se opšta konkurencija i konkurentnost u privredi i društvu. Kao jedno od nerazvijenih područja u Republici Srbiji, upravo region Raške oblasti je poznat po dinamičnom razvoju terciarnog sektora i, sledstveno tome, njegova ekonomija ima veliku potrebu za stručnim visokoobrazovanim kadrovima. To bi trebalo da doprinese i značajnom smanjenju sadašnje visoke stope nezaposlenosti u ovom regionu, koja posebno pogađa mladu populaciju.

Društvo znanja i ekonomija zasnovana na znanju, međutim, ne podrazumevaju rigidno, faktografsko, školsko, odnosno udžbeničko znanje, već skup veština, sposobnosti i zainteresovanosti (kompetencije) kojima se stvaraju inovacije, rešavaju problemi, saraduje s drugima i deluje u cilju opšte dobrobiti. Da bi se iskoristile prednosti koncepta ekonomije znanja na nacionalnom nivou, prema iskustvima najnaprednijih ekonomija sveta u tom pogledu, jedan od najbitnijih faktora jeste moderno obrazovanje i neprekidno usavršavanje. U regionalnom smislu, potrebna je posebna politika podsticaja održivog razvoja regiona, čiju okosnicu moraju činiti, pre svega, popravljavanje infrastrukture, obrazovanja, komunikacija i informisanja. Bitno je sprovesti: realizaciju posebnih projekata za osposobljavanje radne snage i njeno prilagođavanje potrebama tržišta rada, naročito okruga i opština s najvećom nezaposlenošću, poput Raške oblasti, da bi se produktivno zapošljavala i zadržavala mlada i kvalifikovana radna snaga; podsticaje koji se tiču obrazovanja i kulture nerazvijenih regiona i opština Republike Srbije; podsticaje daljoj izgradnji decentralizovanog sistema podrške ekonomskom razvoju u celini, kao i integralnom ruralnom razvoju, posebno u marginalnim i nerazvijenim oblastima.

Obrazovanje za održivi razvoj mora da osigura integraciju znanja iz svih relevantnih sektora (životna sredina, ekonomija, društvo), s posebnim akcentom na primeni tih

znanja da bi se obezbedio kvalitetniji život za sve građane. Ono mora da ojača bazična i primenjena znanja kao pretpostavku prilagođavanja tržištu rada, da integriše znanja i način iznalaženja najboljih tehnika i metoda u svim sferama ljudskog života i da obezbedi uslove neophodne za primenu koncepta interdisciplinarnog obrazovanja za održivi razvoj i veće učešće civilnog sektora. To znači da ono mora da osigura učešće i međusobnu saradnju svih interesnih grupa (škole, privrede, donosilaca odluka, civilnog društva itd.) i intenzivno jačanje međunarodne saradnje s relevantnim naučnoobrazovnim institucijama, što je opredeljenje i načelo Državnog univerziteta u Novom Pazaru od njegovog osnivanja.

Izdvojićemo jedan od ključnih nacionalnih prioriteta Republike Srbije čije će ispunjenje u najvećoj meri omogućiti ostvarenje vizije održivog razvoja do 2017. [2]:

1) Razvoj i obrazovanje ljudi, povećanje zapošljavanja i socijalna uključenost, stvaranje većeg broja radnih mesta, privlačenje stručnjaka, unapređivanje kvaliteta i prilagodljivosti radne snage, veća ulaganja u ljudske resurse, za šta je potrebno ostvariti:

- sprečavanje odliva stručnjaka tako što će se stvoriti bolji radni uslovi;
- unapređenje prilagodljivosti radnika i postizanje veće fleksibilnosti tržišta rada;
- ulaganje u znanje i veštine ljudi putem kvalitetnog, efikasnog i praktično primenljivog obrazovanja i neprestano usavršavanje članova svih društvenih grupa na principima jednakih mogućnosti;

Energetska efikasnost jeste stepen racionalnog korišćenja energije i ona predstavlja jedan od prioriteta zacrtan i u Strategiji razvoja energetike Srbije do 2015. godine [3], kao i u novoj Strategiji razvoja energetike Srbije do 2025. g. Racionalno korišćenje energije ne predstavlja samo odgovornost države, već i svakog pojedinca, pa je neophodna šira društvena akcija, kao i podizanje svesti svih društvenih ciljnih grupa o ovim problemima. Nesporno je da u energetske efikasnosti i obnovljivim izvorima energije leži veliki privredni potencijal i da realizacija programa i projekata u ovoj oblasti, uz primenu savremenih tehnologija, ima ne samo energetske, već i pozitivne ekološke, ekonomske i socijalne efekte. U Nacionalnoj strategiji održivog razvoja urađena je SWOT analiza, gde je kao jedna od šansi za razvoj našeg društva definisano unapređenje energetske efikasnosti i racionalno korišćenje sirovina.

Novi standardi implicitno nameću i potrebu za novinama u oblasti obrazovanja mladih uvođenjem novih nastavnih sadržaja i modula iz oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije. Direktna potreba za tzv. "zelenim poslovima" se javlja u izgradnji i rekonstrukciji na principima energetske efikasnosti, izgradnji energetski efikasnih energetskih postrojenja, kao i logistici i odgovarajućem održavanju istih. Takođe, indirektno potrebe se javljaju u sektoru usluga i turizma. "Zelena radna mesta" imaju prostora i u poljoprivredi, industriji reciklaže, istraživanju i razvoju... Sve napred navedene oblasti preslikavaju se na lokalni, odnosno regionalni, nivo, u ovom slučaju region Raške oblasti.

3. PROJEKAT ENERESE

Državni univerzitet u Novom Pazaru koordinira i, zajedno sa akademskim partnerima iz Srbije (Mašinski fakulteti u Beogradu i Nišu), Crne Gore (Građevinski fakultet u Podgorici), Bosne i Hercegovine (Građevinski fakultet u Sarajevu i Mašinski fakultet u Banja Luci), Grčke (Univerzitet u Solunu), Slovačke (Univerzitet u Žilini), Slovenije (Univerzitet u Ljubljani) i Nemačke (Univerzitet u Frajbergu), sprovodi projekat ENERESE u okviru TEMPUS programa, koji je imao glavni cilj uspostavljanje novog programa master studija sa dva modula, iz oblasti energetske efikasnosti, obnovljivih izvora energije i zaštite životne sredine. Projektom je predviđeno da novi kurikulum dvogodišnjih master studija tehničkih fakulteta (pre svega mašinskih i građevinskih) počne da se realizuje u akademskoj školskoj 2013/2014. godini.

3.1 Smisao projekta

Poznato je da je u zemljama Zapadnog Balkana efikasnost korišćenja energije znatno manja nego u zemljama EU [4] (na primer, prosečna potrošnja finalne energije za grejanje u stambenim zgradama je preko 170 kWh / m² godišnje, dok je u zemljama EU je oko 130 kWh/m² godišnje). U zemljama Zapadnog Balkana skoro 20% BDP-a je potrošeno na energiju, u poređenju sa oko 5% BDP-a u zemljama Evropske Unije. Jedan od najboljih načina da građani i vlada smanje povećanje troškova za energiju je preduzimanje mera energetske efikasnosti i unapređenje svesti javnosti o prednostima energetske efikasnosti, kao i ciljano usmerenje svih ključnih aktera energetskog sektora o prednostima korišćenja energetski efikasnih tehnologija i metodologija. Potreba za predloženi studijski program postala je očigledna tokom mnogih kontakata između nastavnog osoblja na univerzitetima Zapadnog Balkana koji su uključeni u ovaj projekat. Tu potrebu su potvrdili i neakademski partneri na projektu – privredne i inženjerske komore i relevantne državne institucije. Tokom reorganizacije univerziteta Zapadnog Balkana, u skladu sa Bolonjskom deklaracijom ostvareni su mnogi kontakti sa univerzitetima u EU. Kroz međusobnu saradnju jasno je potvrđeno da predloženi studijski program na projektu ENERESE nedostaje u zemljama Zapadnog Balkana. Takođe, uočeno je da je korišćenje obnovljivih izvora energije sporadično i pored velikih tehničkih potencijala. U skoro svim zemljama Zapadnog Balkana dominira proizvodnja električne energije u tzv. klasičnim termoelektranama na niskokalorični ugalj koje uzrokuju velike ekološke probleme. Ne postoji dovoljno obučeni visoko obrazovani kadar za zadovoljavanje neposrednih i posebno budućih potreba u energetske sektoru. Predložene dve godine (120 ESPB) master studijskog programa ENERESE zadovoljiće realne potrebe za specijalistima u oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije. U projektovanju obrazovnog programa potreban je integrisan i multidisciplinarni pristup. To znači, na primer, da bi specijalisti poput mašinskih, građevinskih i elektro inženjera i arhitekata trebalo da rade zajedno u interdisciplinarnim timovima od samog početka procesa projektovanja jedne zgrade. Za sada proces projektovanja je, najčešće, tradicionalno fragmentarno podeljen, a inženjeri potrebni u ovom procesu su uključeni u kasnoj fazi procesa. Ovo dovodi u većini slučajeva do

neefikasnih rešenja i većih troškova. Integrisani pristup projektovanju poboljšava i ekološke performanse zgrade. Masteri kursevi su počeli u drugoj godini projekta (sinhronizovano sa početkom školske godine). Sledeće ciljne grupe su determinisane ovim projektom:

- a) Primarna ciljna grupa je građevinski sektor (menadžeri i ugovarači projekata izgradnje nekretnina, projektanti i izvođači radova). Njihova specifična korist od ovog projekta je da će obrazovne institucije pružiti visoko obučene i obrazovane stručnjake, sposobne da razmišljaju na integrisan način i rade u multidisciplinarnim timovima.
- b) Ne-obrazovne institucije, ne samo one koje su uključene u projekat iz Zapadnog Balkana. Ove institucije i odgovarajuća ministarstva mogu poboljšati svoju kvalifikacionu strukturu i bolje delovati kao veza između građevinskog sektora i naučnih i obrazovnih institucija.
- c) Obrazovne institucije u zemljama Zapadnog Balkana, koje nisu uključene u ovaj projekat, a što će biti postignuto kroz diseminaciju projekta.
- d) Za studente koji rade u različitim disciplinama, situacija će biti poboljšana na različite načine. Opšti cilj projekta je bolja interakcija između univerziteta i preduzeća u cilju blagovremene pripreme master diplomaca za tržište rada. Ovaj projekat će doprineti povećanju kanala komunikacije između univerziteta i preduzeća, preko kojih će se obavljati transfer znanja u oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije sa univerziteta na preduzeća. Studenti će dobiti visok kvalitet studijskog programa sa izbalansiranim teorijskim i praktičnim temama. Oni će steći profesionalno iskustvo, razvijati veštine, istražiti polje karijere, doprineti misiji i ciljevima strukovnih organizacija i napraviti moguću povratnu informaciju privredama WB.

3.2 Sažetak projekta

Tokom trajanja projekta napravljena je arhitektura novih nastavnih planova i programa na WB partnerskim univerzitetima. Realizovane su sledeće aktivnosti:

- Definisana je strategija za novi master program
- Razvijen je novi nastavni plan i program
- Izrada ishoda kursa
- Poboljšanje metodologija za novi master program. Tokom celog perioda projekta nastavno osoblje sa WB univerziteta prošlo je do/prekvalifikaciju u partnerskim univerzitetima EU, gde je pohađalo kurseve, predavanja i naučne seminare/konferencije o specifičnim temama uključene u master nastavne planove i programe. Održani seminari eksperata iz EU u državama WB upotpunili su šemu obuke nastavnog osoblja. Novi udžbenici, skripte i materijali su razvijeni i objavljeni, a laboratorije i biblioteke obnovljene.
- Na početku školske godine 2013/14. (druga godina projekta) počelo je sprovođenje novog master programa. Kalkulacija ESPB je zasnovana na standardima EU i iskustvima partnerskih zemalja na projektu.
- Kontrola kvaliteta i praćenje rezultata bilo je obezbeđeno od strane tima za upravljanje projektom. Interna procena vršena je od strane kancelarija za osiguranje kvaliteta (DUNP), senata univerziteta i ministarstava zaduženih za prosvetu, a eksterne provere od strane kvalifikovanog stručnog eksperta i partnera u EU
- Proces predavljanja projekta i njegovih rezultata vršio se tokom celog trajanja projekta, uz izradu odgovarajućih

materijala (brošure, lifleti, posteri, web-sajt)

- Održivost rezultata projekta će se postići putem sistematske validacije od strane fakulteta i univerziteta i akreditacija od strane ministarstava zaduženih za prosvetu
- Upravljanje projektom obezbeđeno je od strane koordinatora (DUNP) i Tima za upravljanje projektom (PMT), uz pomoć administrativnog osoblja za praćenje projektnih aktivnosti i troškova projekta

3.3 Predstavljanje (diseminacija) i održivost projekta i korišćenje rezultata

Strategija predavljanja projekta podeljena je na interni i eksterni deo.

a) Interno predavljanje projekta:

Predavljanje unutar partnerskih institucija Zapadnog Balkana je važno pitanje i nastavno osoblje sa univerziteta i stručnjaci drugih institucija uključenih u akcije mobilnosti na univerzitetima u EU imaju mogućnost da predstavljaju novo znanje i iskustvo stečeno u inostranstvu svojim kolegama na organizovanim sastancima i radionicama. U cilju informisanja potencijalnih studenata o sadržaju projekta i novih programa, biće organizovan jedan Informativni dan na kraju svake školske godine i relevantna brošura će biti objavljena i distribuirana (prva verzija je već štampana i deljena).

b) Eksterno predavljanje projekta:

Članovi projektnog konzorcijuma će razviti konkretne akcije usmerene ka budućim studentima i drugim univerzitetima i relevantnim zainteresovanim stranama. Informacije o projektu koje se odnose na novi nastavni program objavljene su na web-sajtu projekta (na srpskom i engleskom jeziku), sa ciljem obezbeđenja nacionalne i internacionalne komunikacije. Akademske institucije sa prostora WB zajedno će obavestiti lokalne medije (novine, televizija, radio) o potrebama za komuniciranje u vezi sa rezultatima projekta. Informacije će biti dostupne kroz proizvodnju specifičnih štampanih materijala (brošura), nastavnih planova i programa i razvijenih i objavljenih udžbenika i drugog nastavnog materijala.

Za distribuciju rezultata projekta sledeće ciljne grupe će biti pozvane na nekoliko seminara: predstavnici univerziteta i drugih obrazovnih institucija u zemljama zapadnog Balkana, predstavnici tržišta rada, agencija, istraživačkih instituta, zavoda za ispitivanje materijala, projektovanje i izgradnju, institucija za zaštitu životne sredine, kao i potencijalni studenti, predstavnici partnera iz EU itd.

Eksploatacija rezultata projekta i održivost projekta u periodu nakon njegovog okončanja su veoma važna pitanja i tiču se svih članova projektnog konzorcijuma. Jedan od fokusa projekta bio je razvijanje aktivnosti koje će osigurati pouzdanu platformu tokom i nakon perioda realizacije projekta. Na akademskom i institucionalnom nivou projekat je već podržan od strane svih državnih univerziteta iz partnerskih zemalja Zapadnog Balkana, što daje ne samo institucionalnu, već i podršku zaposlenih, i pospešuje garanciju da će projekat biti održan i posle svog formalnog trajanja. Finansijska održivost projekta biće obezbeđena

uglavnom putem dugogodišnje saradnje sa ministarstvima obrazovanja u partnerskim zemljama WB, gde master studijski program mora da bude akreditovan i kao takav priznat i finansiran za naredni period od pet godina. Takođe, određena preduzeća u partnerskim zemljama WB imaju značajan interes za obučenom i kvalifikovanom visokoobrazovanom radnom snagom u oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije. Postoji niz praktičnih koraka koji će biti preduzeti kako bi se uticalo na odabrane ciljne grupe u cilju postizanja održivosti projekta, kao što je, na primer, održavanje radionica i sastanaka sa aktivnim učesćem preduzetnika, ministarstava i drugih državnih organa i različitih profesionalnih organizacija. Takođe, biće preduzete određene mere za razvijanje odgovarajućih mehanizama za merenje i održavanje zadovoljstva studenata kroz vođenje operativne on-line platforme za on-line objavljivanje nastavnih materijala.

6. ZAKLJUČAK

Unapređenje energetske efikasnosti je kontinuirani proces, koji zahteva organizovan, sistemski i sistematski pristup relevantnih državnih i obrazovnih institucija i društvenih organizacija, lokalnih samouprava, kompanija i pojedinaca [4]. Energetska efikasnost nije samo jedna od mnogih sektorskih politika, već je to socio-ekonomski projekat i koncept sa veoma pozitivnim ciljem - jačanja konkurentnosti srpske privrede i, samim tim, poboljšanja životnog standarda građana u Srbiji. Državna podrška u tom smislu mora biti institucionalna i konzistentna u dužem vremenskom periodu, praćena poreskim i finansijskim podsticajima, regulatornim zahtevima, ali i investicijama u obrazovanje i istraživanje. Sledeći tu potrebu, a u skladu sa savremenom evropskom praksom, Državni univerzitet u Novom Pazaru razvija i uvodi nove nastavne programe iz oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije, na taj način doprinoseći održivom razvoju regiona i društva u celini. Projekat ENERESE je, zahvaljujući doprinosu svih partnera na projektu, primer za dalje aktivnosti u domenu razvoja visokog obrazovanja iz oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije.

7. LITERATURA:

- [1] V. Nikolić Stanojević, B. Kovačić, E. Dolićanin: Nastavni program iz oblasti energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije na Državnom univerzitetu u Novom Pazaru u svetlu savremenih zahteva visokog obrazovanja, XX skup "Trendovi razvoja: razvojni potencijal visokog obrazovanja", Kopaonik, 2014.
- [2] Nacionalna strategija održivog razvoja, Vlada Republike Srbije, 2008.
- [3] Strategija razvoja energetike Srbije do 2015. godine, Vlada i Skupština Republike Srbije, 2005.
- [4] B. Kovačić: Preduslovi i načini unapređivanja energetske efikasnosti u Srbiji, II Regionalna konferencija "Industrijska energetika i zaštita životne sredine IEEP 2010", zbornik radova, Zlatibor, 2010.

Abstract – Universities, actually technical faculties, in Serbia have a long tradition and very good knowledge for education of young talented people in different disciplines of technics. Energy sector was always one of the priority, but regarding the newest trends from energy efficiency and renewable energy domain, in particularly defined as it is in EU countries, it wasn't wider implemented so far. At the universities in Western Balkan (WB) region there are still not systematic and comprehensive approach toward EE and RES high education system. Just because of that and bearing in mind the importance of sustainable energy issue, TEMPUS regional project ENERESE, in cooperation of six WB and four EU universities has prepared for the accreditation and realization two years master study programme.

“ENERESE” PROJECT IN THE LIGHT OF A COMPREHENSIVE APPROACH TO HIGHER EDUCATION IN THE FIELD OF ENERGY EFFICIENCY

Edin Dolićanin, Bojan Kovačić, Božidar Stanić

ENERGETSKI EFIKASNA UNUTRAŠNJA POLUPROVODNIČKA RASVETA

Tatjana Pešić-Brđanin, Branko Dokić, *Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet*

Sadržaj – Energetska efikasna poluprovodnička rasveta (LED i OLED) značajno je unapređena otkako su proizvodi bazirani na svetlećim diodama prvi put dospeli na tržište. Trenutno dostupne lampe i svetiljke mogu da imaju efikasnost koja je i više od tri puta veća u odnosu na najkvalitetnije LED proizvode pre 10 godina. U ovom radu dat je pregled tehnologija koje se koriste za dobijanje poluprovodničkih izvora svetlosti. Efikasno korišćenje ovih izvora svetlosti za rasvetu zavisi od uspešnog projektovanja sistema, što podrazumeva razumevanje uticaja električnih i fotometrijskih temperaturno zavisnih karakteristika na performanse uređaja. U radu su razmatrani i indikatori koji definišu sveukupnu efikasnost LED uređaja za rasvetu, a dato je i poređenje sa konvencionalnim tehnologijama.

1. UVOD

Princip rada svetlećih dioda (eng. *Light-emitting diode* - LED) zasniva se na pojavi elektroluminescencije, što podrazumeva emisiju svetlosti pod uticajem električnog polja. Ova pojava je otkrivena još davne 1907. godine (Henry Joseph Round) prilikom proticanja električne struje kroz kristal silicijum karbida [1]. Međutim, prva praktična svetleća dioda (LED) nastala je tek 1962. godine (Nick Holonyak) [2]. LED su dugo bile dostupne u zelenoj, crvenoj i boji čilibara, što je doprinelo njihovoj popularnosti u primenama za identifikacije signala i displeje. Kasnije je napravljena dioda koja je davala svetlost u plavoj boji (1994. godina, Nakamura) [3]. Ovo otkriće je omogućilo novi pristup u svetu rasvete, jer je, zahvaljujući njemu, dobijena dioda na galijum nitridu (GaN) koja je davala belu svetlost. U osnovi, belu svetlost je moguće dobiti na dva načina: mešanjem boja crvene, zelene i plave diode ili dodavanjem sloja fosfora u plavu diodu, čime se modifikuje emisioni spektar. Bele LED su transformisale tehnologiju osvetljenja, uključujući unutrašnju i spoljašnju rasvetu i saobraćajnu i železničku signalizaciju. Karakteristike svetlećih dioda, kao što su svetlosna efikasnost, robusnost, dug životni vek, visok indeks reprodukcije boje, i visoka pouzdanost, čine ih odličnim kandidatima koji zamenjuju tradicionalne izvore svetlosti [4].

Nedavno je i organska LED tehnologija (OLED tehnologija) postala interesantna za osvetljenje. Izučavanja elektroluminescencije u organskim poluprovodnicima su počela sredinom 20. veka, rezultirala su i predlogom određenih komponenata koje, zbog prekomerne debljine i velikog radnog napona, nisu komercijalno bile zanimljive. Prva organska dioda (OLED) napravljena je 1987. godine u Eastman Kodak Company [5]. Ova OLED je imala različite slojeve za transport elektrona, šupljina i emisiju svetlosti. Dobijena je vakuumskim naporavanjem malih molekula organskog materijala zajedno sa metalnom katodom na provodnu podlogu. Svetlosna efikasnost komponente se smatrala zadovoljavajućom za komercijalne primene, ali ono što je značajnije od toga jeste početak intenzivnog istraživanja u oblasti organske elektroluminescencije [5].

Uvođenjem novih tehnoloških koncepata organskih dioda, poboljšana je svetlosna efikasnost i njihov životni vek. Međutim, postoje još uvek velike poteškoće u razvoju OLED tehnologije, te se posebni naponi ulažu u istraživanja vezana za povećanje svetlosne efikasnosti, produženju životnog veka i povećanje svetleće površi organskih svetlećih dioda [6]. OLED su tanke, lake, imaju veliku površ i mogu biti fleksibilne i savitljive. U isključenom stanju, njihova površina može biti reflektujuća, difuziona ili transparentna. Raznovrsnost OLED formata čini ih veoma primenljivim u dekorativnoj i rasveti unutrašnjeg prostora. Zbog organske prirode ovih dioda, moguće je dobijanje ravnomerne svetlosne emisije po velikim površinama, ugodne za ljudsko oko [7].

U ovom radu biće dati osnovni principi poluprovodničkih tehnologija koje se koriste za rasvetu. Takođe, razmatraće se svetlosna efikasnost LED paketa, kao gradivnog elementa LED lampi i svetiljki, i efekti koji utiču na svetlosnu efikasnost celog LED sistema za rasvetu.

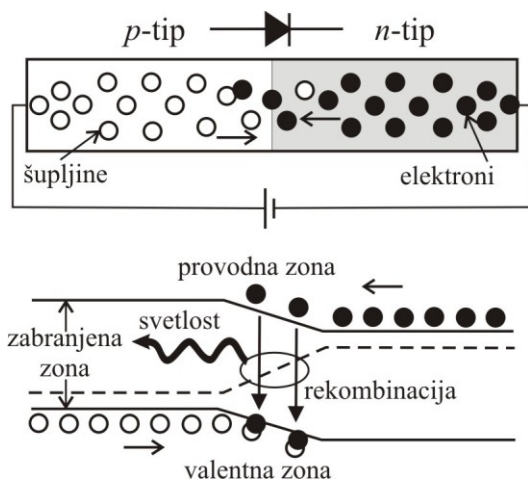
2. OSNOVNI PRINCIPI LED I OLED TEHNOLOGIJA

OLED tehnologija je već uveliko zastupljena za dobijanje displeja, i to je trenutno tržište na kojem je ova tehnologija dominantna. Karakteristike OLED tehnologije, kao što su ušteda energije, reprodukcija boje, veliki kontrast, širok vidni ugao i brzina odziva, veoma su poželjne za displeje prenosnih uređaja, monitore i televizore [8]. S druge strane, LED tehnologija je već započela smenu klasičnih izvora svetlosti za osvetljenje i unutrašnjeg i spoljašnjeg prostora. U ovom području, OLED tehnologija zahteva još dodatnih usavršavanja tehnoloških procesa kako bi postala konkurentna na tržištu i mišljenje je naučne zajednice [7,9] da će se to desiti u bliskoj budućnosti.

2.1. Princip rada LEDa

Svetleća dioda, LED, je u osnovi napravljena od poluprovodničkih materijala. Dopiranje u n oblasti obezbeđuje veliku koncentraciju negativnih nosilaca naelektrisanja (elektrona), dok dopiranje u p oblasti omogućava veliku koncentraciju pozitivnih nosilaca naelektrisanja (šupljina), kao što je prikazano na slici 1. Kada se na pn spoj primeni direktni napon, kroz diodu će proteći struja. U području u kojem dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina, kao prapratni efekat može se pojaviti foton određene talasne dužine. Postoje dva osnovna mehanizma rekombinacije u poluprovodnicima, sa zračenjem (emisijom svetlosti) i bez zračenja. Za vreme rekombinacije bez zračenja, energija elektrona se transformiše u energiju vibracije atomske rešetke, odnosno u fonone. Glavni uticaj neradijacijske rekombinacije jeste povećanje temperature spoja (T_j), što je kritični parametar LEDa usled uticaja koji taj parametar ima na životni vek, svetlosni fluks, efikasnost i električne karakteristike diode. Kod rekombinacije sa zračenjem, emituje se foton koji ima energiju jednaku širini energetskog procepa materijala, odnosno emituje se zračenje

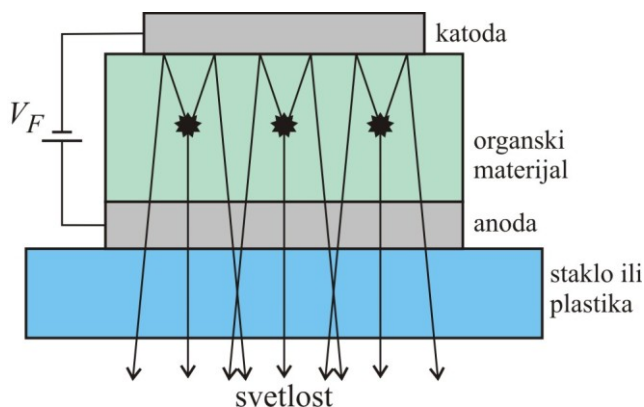
koje je rezultat raspada pobuđenog stanja (ekscitona). Rekombinacija sa emisijom fotona je uglavnom karakteristika neorganskih poluprovodnika sa direktnim zonskim prelazom, kao što su galijum arsenid (GaAs), galijum fosfid (GaP) i silicijum karbid (SiC). Boja emitovanog svetla zavisi od vrste poluprovodnika, od vrste i količine primesa u poluprovodniku, i može biti od infracrvenog, preko vidljivog do ultraljubičastog dela spektra.



Sl. 1. Princip rada LEDa

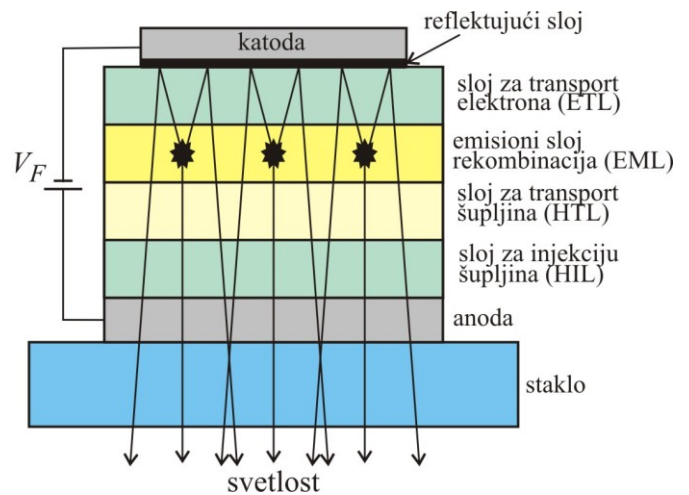
2.2. Princip rada OLEDa

Najjednostavnija OLED struktura sastoji se od jednog sloja organskog materijala, smeštenog između metalnog kontakta (najčešće od aluminijuma ili srebra) koji čini katodu, i transparentne elektrode (uobičajeno od indijum tin oksida - ITO) koja čini anodu. Ovakva struktura se nalazi na podlozi od stakla ili plastike, kao što je prikazano na slici 2.



Sl. 2. Najjednostavnija OLED struktura

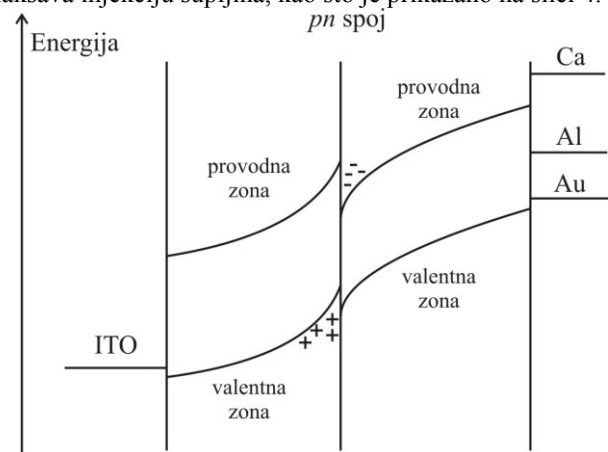
Kod direktne polarizacije diode, elektroni i šupljine se injektuju iz katode i anode, redom, u organski sloj. Šupljine se, u „skokovima“, kreću u smeru električnog polja kroz energetske najviše zauzete orbite molekula, a elektroni se kreću u suprotnom smeru na energetske najniže nezauzete orbite molekula. U zavisnosti od pokretljivosti elektrona i šupljina, elektron i šupljina će se sresti u određenoj tački organskog sloja i, relaksacijom energetske stanja, proizvesti svetlost. Primer višeslojne OLED strukture je prikazan na slici 3.



Sl. 3. Višeslojna OLED struktura

Poboljšanje efikasnosti OLEDa može se postići promenom debljine sloja, podešavanjem koncentracije primesa i višeslojnim strukturama koje se sastoje od slojeva različitih materijala sa različitim funkcionalnostima.

U OLED strukture spadaju i strukture kod kojih je jedan ili više slojeva provodni polimer. Kao anoda najčešće se koristi ITO jer ima veliki izlazni rad što omogućava ubacivanje šupljina u valentnu zonu organskog materijala. Najčešće se kao provodni polimer koristi PEDOT (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) ili PSS (Poly(*p*-phenylene vinylene)) kod kojih je valentna zona iznad izlaznog rada ITO, a ispod valentne zone nekog drugog polimera što olakšava injeksiju šupljina, kao što je prikazano na slici 4.



Sl. 4. Dijagram energetske zone kod dva poluprovodnika koji formiraju pn spoj

Kao katoda može se koristiti kalcijum, barijum ili magnezijum, jer imaju mali izlazni rad, što će olakšati injeksiju elektrona. Ovi metali su reaktivni pa su često zaštićeni aluminijumom. Kod provodnih polimera, mala je energija jonizacije, pa je injeksija šupljina jednostavna, dok je mnogo teže ostvariti injeksiju elektrona. Osim injeksije elektrona i šupljina, kod OLEDa je veoma važan i njihov transport kroz sloj poluprovodnika. Kao negativni efekat može se javiti rekombinacija elektrona i šupljina u blizini elektrode preko koje se ubacuju naelektrisanja, što će

smanjiti delotvornost uređaja ili će doći do prestanka svetlosne emisije. Ova pojava može biti posledica nejednakih brzina kretanja elektrona i šupljina i na nju se može uticati odabirom katodnog materijala [7].

2.3. Poređenje LED i OLED izvora svetlosti

Postoje određene razlike između LED i OLED tehnologije; jedna od tih razlika odnosi se na sam dizajn komponente. LED se proizvode narastanjem slojeva neorganskog materijala na podlogu od safira ili silicijuma. OLED se proizvode ubacivanjem slojeva organskih materijala na bazi ugljenika između elektroda, a na podlogu koja je od stakla ili plastike. OLED imaju veću površinu, to su površinski izvori svetlosti. U zavisnosti od karakteristika organskog materijala, mogu biti veoma tanki i fleksibilni. S druge strane, LED su tačkasti izvori svetlosti. Svetlost koju LED daje je koncentrisana i stoga su često neophodna sočiva i drugi optički dodaci kako bi se dobila odgovarajuća distribucija svetlosti. Nasuprot tome, OLED ima difuziono svetlo, bez prekomernog odsjaja, čime se osigurava meko osvetljenje [7,8]. Obe tehnologije su projektovane za različite primene. Prema mišljenju naučne zajednice [7,9], OLED tehnologija će zameniti velike izvore svetlosti za unutrašnje osvetljenje, kao i za dekorativne i ambijentalne primene. Rasveta na bazi LED tehnologije je uglavnom projektovana za poslovno i spoljašnje, odnosno ulično osvetljenje.

3. ENERGETSKA EFIKASNOST LED PAKETA

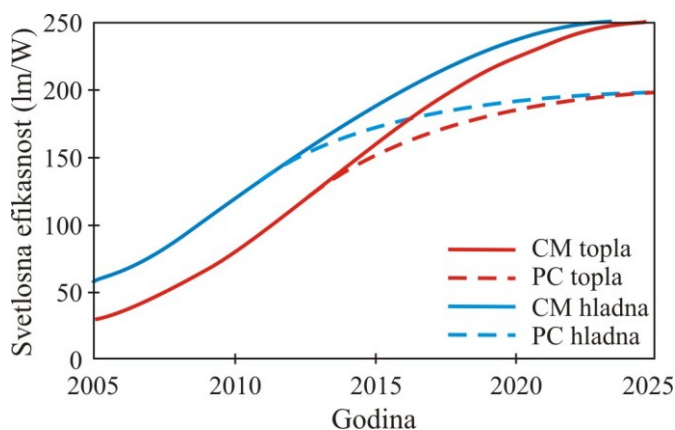
Energetska efikasnost LED proizvoda se uobičajeno definiše kroz svetlosnu efikasnost (ili samo efikasnost), što podrazumeva emitovani fluks po utrošenoj snazi (izražava se u lm/W). Uz ovako pojednostavljenu definiciju efikasnosti kod LED proizvoda, važno je napomenuti da postoje neke činjenice koje se ne smeju zanemariti. LED paket (individualni LED čvor koji je gradivni blok svih LED proizvoda) ima svetlosnu efikasnost koja se razlikuje od efikasnosti LED proizvoda, kao što su lampe ili svetiljke, usled termičkih i optičkih, kao i gubitaka zbog drajvera [9].

Kad je reč o samom LED paketu, postoji više promenljivih koje utiču na efikasnost, ali se tri faktora mogu izdvojiti kao značajna i za proizvođače i za potrošače: način dobijanja bele svetlosti, kvalitet boje i struja pobude.

Postoje dva načina dobijanja bele svetlosti pomoću LEDa, mešanje boja (*eng.* Color mixing - CM) i dodavanje sloja fosfora u plavu LED (*eng.* Phosphor conversion - PC). Trenutno su PC LED tehnologije energetski efikasnija opcija, koja može dati LED paket sa svetlosnom efikasnošću iznad 130 lm/W (teorijski projektovana maksimalna efikasnost LED paketa je 266 lm/W). Međutim, usled dodatnih procesa koji prate konverziju fosfora, smatra se da PC LED paketi moraju imati manju efikasnost od CM LED paketa (slika 5). Trenutno manja efikasnost CM LED paketa je usled male efikasnosti zelene i diode boje ćilibara. Inovativni postupci mešanja boja ili hibridni sistemi (više od jedne spektralne diode sa emisijom fosfora) bi vrlo uskoro trebalo i komercijalno da daju LED pakete sa povećanom efikasnošću.

Drugi važan parametar efikasnosti je kvalitet boje. Na primer, postizanje određene temperature boje zahteva promenu spektralnog sadržaja izvora svetlosti. Promenom spektralnog sadržaja menja se svetlosna efikasnost radijacije. Shodno tome, LED paketi koji imaju različite vrednosti za

usaglašenu temperaturu boje (*eng.* Correlated color temperature - CCT) i indeks reprodukcije boje (*eng.* Color rendering index - CRI) imaju i različite efikasnosti. Na primer, veći CRI zahteva restriktivnost spektralnog sadržaja i širu distribuciju spektralne snage, te stoga unutar jedne familije proizvoda paketi sa većim CRI imaju smanjenu efikasnost. Teoretski, niža CCT ne bi trebalo da loše utiče na efikasnost, ali usled ostalih faktora efikasnosti, trenutno dostupni LED paketi sa hladnom belom bojom (6500 K) imaju skoro 20% veću efikasnost u odnosu na LED pakete sa toplom belom bojom (3000 K). Trendovi ukazuju da će se ova razlika vremenom smanjivati.



Sl. 5. Trenutno stanje i projektovano povećanje efikasnosti LED paketa dobijenog mešanjem boja (CM) i dodavanjem sloja fosfora u plavu LED (PC), u slučaju tople bele (CCT 2580 K do 3710 K i CRI od 80 do 90) i hladne bele (CCT 4746 K do 7040 K i CRI od 70 do 80) [9]

Treći važan parametar efikasnosti je pobudna struja. Tipične vrednosti ove struje su 350 mA, 700 mA i 1000 mA, ali se mogu koristiti i veće vrednosti struje. Veće pobudne struje LEDa omogućavaju veći izlazni svetlosni fluks, ali i srazmerno smanjenje efikasnosti. Uzrok ovog smanjenja efikasnosti se intenzivno istražuje i očekuje se da će u sledećih deset godina ovaj problem biti u potpunosti prevaziđen.

4. ENERGETSKA EFIKASNOST LAMPI I SVETILJKI

Termički efekti, gubici drajvera i optički gubici smanjuju efikasnost LED lampi i svetiljki u odnosu na efikasnost ugrađenih LED paketa. Zajedno posmatrano, ovi gubici mogu smanjiti efikasnost i za više od 30%. Prema podacima iz 2013. godine, svetlosna efikasnost komercijalno dostupnih integrisanih lampi i svetiljki se nalazi u opsegu od 10 lm/W do skoro 120 lm/W. Najveći broj proizvoda ima efikasnost između 40 i 80 lm/W, što je značajno manje u poređenju sa efikasnošću LED paketa.

4.1. Termički gubici

Glavni faktor pri određivanju svetlosnog izlaznog fluksa LEDa je temperatura pn spoja (T_j). Sa povećanjem temperature spoja, proces generacije svetlosti postaje manje efikasan i smanjuje se izlazni svetlosni fluks. LED lampe i svetiljke stoga zahtevaju sistem za upravljanje temperaturom.

Međutim, čak i u izuzetno dobro projektovanim sistemima, temperatura spoja može porasti značajno iznad laboratorijskih uslova, što može smanjiti ukupnu efikasnost i do 15% [9].

4.2. Optički gubici

Bez obzira na vrstu izvora svetlosti, korišćenje sočiva, reflektora ili drugih optičkih sistema za oblikovanje osvetljaja smanjuje ukupni fluks emitovanog svetla. Ovo je jedan od važnih faktora razlike efikasnosti LED paketa i LED sistema (lampi ili svetiljki). S obzirom na veliku raznolikost upotrebljenih optičkih sistema za LED sisteme, trenutno dostupne na tržištu, teško je proceniti koliko iznosi smanjenje efikasnosti usled optičkih gubitaka [9].

4.3. Gubici usled drajvera

Fluorescentne i natrijumove svetiljke sa visokim pritiskom (HID) ne mogu funkcionisati bez prigušnice, sistema koji obezbeđuje početni napon i ograničava električnu struju. Slično, LED lampe i svetiljke imaju drajver, sistem koji sadrži napajanje i kola za upravljanje. Najveći broj drajvera konvertuje mrežni napon u malu DC vrednost napona napajanja i mogu sadržati dodatna pomoćna električna kola za podešavanje izlaznog fluksa i/ili korekciju boje. Trenutno dostupni drajveri imaju efikasnost oko 85%.

U poređenju sa drugim izvorima svetlosti, efikasnost LED rasvete je uporediva sa efikasnošću kompaktnih HID sijalica (metal halidnih i natrijumovih sa visokim pritiskom) i mnogo je veća u poređenju sa drugim izvorima svetlosti (metal halogene, halogene, fluorokompaktne, fluorescentne sijalice i sijalice sa žarnom niti). Trenutno dostignuta efikasnost LED i HID svetiljki je oko 130 lm/W, ali su LED svetiljke jedine kod kojih se očekuje značajno poboljšanje efikasnosti u bliskoj budućnosti.

5. ZAKLJUČAK

Od prvih primena LED tehnologija u osvetljenju, efikasnost LED sistema je značajno poboljšana. Očekivanja su da će se ovaj trend nastaviti zahvaljujući novim materijalima, poboljšanim proizvodnim procesima i novim dizajnom samih svetiljki i lampi. Trenutno dostignuta efikasnost LED paketa je veća od ostalih izvora svetlosti, dok mnoge integrisane LED lampe i svetiljke imaju efikasnost koja je uporediva sa HID svetiljkama. OLED paneli za unutrašnju rasvetu su takođe energetski efikasni (između kompaktnih fluorescentnih sijalica i LED). Neki proizvođači već imaju u ponudi panele s ugrađenim OLED izvorom svetlosti, no one su još uvek vrlo skupe i u ranoj fazi razvoja.

Prednost poluprovodničkih tehnologija u osvetljenju ogleda se u mogućnosti promene LED i OLED proizvoda koja je mnogo veća u odnosu na proizvode dobijene klasičnim tehnologijama u osvetljenju. LED proizvodi se značajno menjaju u vrlo kratkom vremenskom periodu u poslednjih par godina.

Efikasnost ne bi trebalo da bude jedini kriterijum pri poređenju dostupnih svetiljki na tržištu. Ostale karakteristike, kao što su kvalitet boje, svetlosni intenzitet distribucije, i podesivost izlaznog svetlosnog fluksa, idu u prilog odabiru poluprovodničkih izvora svetlosti. U prednosti poluprovodničke tehnologije može se svrstati još i značajno duži vek trajanja ovih proizvoda.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske u okviru projekta INGRID.

7. LITERATURA

- [1] H. J. Roland, „A note on carborundum,“ *Electr. World*, vol. 19, p. 309, Feb. 1907.
- [2] N. Holonyak and S. F. Bevacqua, “Light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions,” *Appl. Phys. Letters*, vol. 1, no. 4, pp. 82-83, Dec. 1962.
- [3] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, „Candela class high-brightness InGaN/AlGaIn double heterostructure blue light-emitting diodes,“ *Appl. Phys. Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, Mar. 1994.
- [4] S. Peralta and H. Ruda, „Applications for advanced solid-state lamps,“ *IEEE Ind. Applicat. Mag.*, vol. 4, no. 4, pp. 31-42, July-Aug. 1998.
- [5] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, „Organic electroluminescent diodes,“ *Appl. Phys. Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 913-915, Sep. 1987.
- [6] R. Meerheim, B. Lussem, and K. Leo, „Efficiency and stability of p-i-n type organic light emitting diodes for display and lightening applications,“ *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 9, pp. 1606-1626, Sept. 2009.
- [7] Vitor C. Bender, Tiago B. Marchesan and J. Marcos Alonso, “Solid-State Lighting – A concise Review of the State of the Art on LED and OLED Modeling,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 6-16, June 2015.
- [8] D. Mian and Z. Lin, “Chameleon: A color-adaptiveweb browser for mobile OLED displays,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 724-738, May 2012.
- [9] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency of LED*, March 2013.

Abstract – Energy efficient solid-state lighting (LED and OLED) has significantly improved since the products based on LEDs first came on the market. Currently available lamps and luminaires can have efficiency which is more than three times higher than the highest quality LED products 10 years ago. This paper provides an overview of technologies used for obtaining the solid-state light sources. Effective use of these light sources for general lighting depends on the successful design of the system, including understanding of the impact of temperature-dependent electrical and photometric characteristics on the performance of the device. The paper discusses the indicators that define the overall efficiency of LED devices for lighting, and gives the comparison with conventional technologies.

ENERGY EFFICIENT INTERIOR SOLID-STATE LIGHTING

Tatjana Pešić-Brdanin, Branko Dokić

SISTEMSKO UPRAVLJANJE ENERGIJOM U BOSNI I HERCEGOVINI

Danijela Karđaš, Petar Gvero, *Mašinski fakultet Banja Luka*

Nijaz Delalić, *Mašinski fakultet Sarajevo*

Siniša Rodić, *Razvojni program Ujedinjenih nacija u BiH*

Sadržaj – Bosna i Hercegovina se karakteriše kao zemlja sa veoma visokom neefikasnošću kako u stambenom, javnom ali i industrijskom sektoru. Država troši oko 20% svog BDP-a na energiju, što je tri puta više nego u zemljama Evropske unije i SAD-a. Sa druge strane, BiH je potpisnica različitih međunarodnih konvencija u oblasti energetike gdje se obavezala na usklađivanje svojih zakonodavnih okvira sa svjetskim trendovima. U skladu sa pruženim obavezama, BiH je dužna da izvještava Energetsku zajednicu o potrošnji energije i energetskim uštedama. Trenutno u BiH ne postoji sistemsko upravljanje energijom. U rezidencijalnom i javnom sektoru, informacija o potrošnji energije i vode se obično obezbjeđuje samo na mjesečnoj osnovi. Ovaj rad prikazuje implementaciju informacionog sistema za upravljanje energijom – EMIS kao alata u sistemu energetskog menadžmenta na nivou BiH. Ova web aplikacija povezuje procese prikupljanja podataka u zgradama i njihovu potrošnju energije i vode, posmatra indikatore potrošnje i izvještava o uštedama u potrošnji energije i vode. U radu je prikazana analiza potrošnje energije i vode kroz EMIS na primjeru Mašinskog fakulteta u Sarajevu.

Ključne riječi: energetski menadžment, energetska efikasnost, potrošnja energije

1. UVOD

Energetska efikasnost i unapređenje efikasnosti energetske potrošnje predstavlja osnovu za energetska planiranja, energetska politiku i održivi razvoj na nivou jedne države. Osnovna tri cilja energetske politike su: sigurnost snabdijevanja, konkurentnost i zaštita životne sredine. Situacija sa održivom energijom u Bosni i Hercegovini nije na zadovoljavajućem nivou. Sa postepenim oporavkom privrede, povećanjem broja automobila na cestama, kao i sve većim brojem domaćinstava i poslovnih objekata kojima treba električna, toplotna i rashladna energija, raste finalna potrošnja energije kao i štetan uticaj na životnu sredinu. Cijene energije i energenata će zbog globalnih i lokalnih razloga u narednom periodu i dalje rasti, što će direktno uticati na porast troškova života i poslovanja. Zbog svega navedenog, prioritet treba dati održivoj potrošnji energije kroz racionalno planiranje same potrošnje, te kroz implementaciju mjera energetske efikasnosti u sve segmente energetskog sistema zemlje.

2. ZAKONODAVNI OKVIR BIH U ENERGETSKOM SEKTORU

Ustavom Bosne i Hercegovine definisano je da su za ustanovljavanje i sprovođenje politike u oblasti energetske efikasnosti nadležni entiteti. Takođe, određeno je da su institucije Bosne i Hercegovine nadležne i odgovorne za zaključivanje i sprovođenje međunarodnih obaveza koje je

Bosna i Hercegovina preuzela. Bosna i Hercegovina je članica sljedećih međunarodnih sporazuma koji neposredno regulišu poslove iz domena energetske efikasnosti i promjena klime:

- Ugovor o energetskej povelji,
- Ugovor o Energetskoj zajednici
- Okvirna konvencija Ujedinjenih Nacija o promjeni klime
- Kjoto Protokol na Okvirnu konvenciju Ujedinjenih Nacija o promjeni klime.

Na svom putu ka EU BiH je dužna da u svoju zakonsku regulativu u oblasti energetike transponuje Direktive EU od kojih su najvažnije: Direktiva o efikasnostima korištenja krajnje energije i energetskih usluga (2006/32), Direktiva o energetskim karakteristikama zgrada (2010/31) i Direktiva o označavanju proizvoda koji troše energiju i standardne informacije o proizvodu, te direktiva o energetskej efikasnosti (2012/27/EU).

U BiH na nivou države još uvijek ne postoji strategija razvoja energetskog sektora. Sredinom 2012. je završen Nacionalni akcioni plan za povećanje energetske efikasnosti NEEAP, ali još nije usvojen.

2.1. Pravni okvir u oblasti energetske efikasnosti u Republici Srpskoj

Politika energetske efikasnosti u Republici Srpskoj utvrđuje se Strategijom razvoja energetike Republike Srpske do 2030. godine koja je usvojena od strane Narodne skupštine RS 14.03.2012. godine. Strategijom je po prvi put na jedan sveobuhvatan način osmišljen razvoj energetskog sektora zasnovan na principima održivog razvoja uz podsticanje i uvođenje mjera energetske efikasnosti. Strategija je radena uvažavajući globalna svjetska kretanja u energetici i legislativu Evropske Unije. U cilju provođenja politike energetske efikasnosti Vlada RS je 18.12.2013. godine donijela Odluku o usvajanju Akcionog plana energetske efikasnosti Republike Srpske do 2018. godine. Oblast energetske efikasnosti u Republici Srpskoj je regulisana sledećim zakonskim aktima:

- Zakon o energetskej efikasnosti
- Zakon o uređenju prostora i građenju
- Zakon o obnovljivim izvorima energije i efikasnoj kogeneraciji
- Zakon o Fondu za zaštitu životne sredine RS

2.2. Pravni okvir u oblasti energetske efikasnosti u Federaciji Bosne i Hercegovine

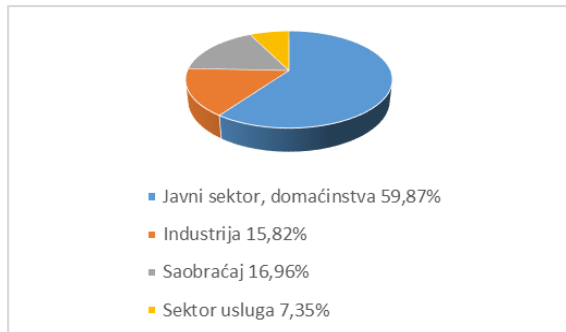
Federacije Bosne i Hercegovine razvoj energetskog sektora utemeljuje na dokumentu "Strateški plan i program razvoja energetskog sektora Federacije BiH" koji je urađen

na osnovu Zaključka Parlamenta Federacije BiH, Predstavničkog doma od 25.07.2007. i Doma naroda od 08.11.2007. Federacija Bosne i Hercegovine nema uobličen sistem pravnog uređenja sektora energetike kao što je to slučaj sa Republikom Srpskom. Naime, u FBiH ne postoji zakon o energetici koji bi bio opšti zakon u ovoj oblasti. Temeljni akt u FBiH u ovoj oblasti je Zakoni o električnoj energiji FBiH. [1] Oblast energetske efikasnosti u FBiH je regulisana sledećim zakonskim aktima:

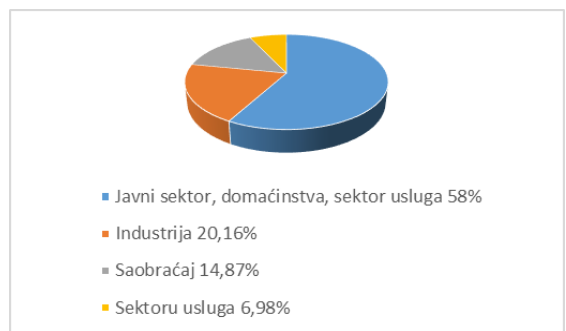
- Zakon o energetskej efikasnosti (Nacrt, maj 2012)
- Zakon o prostornom uređenju i korištenju zemljišta na nivou FBiH
- Zakon o korištenju obnovljivih izvora i efikasne kogeneracije

3. ANALIZA POTROŠNJE ENERGIJE U BIH

Prema izvještaju pod nazivom „Redovni pregled strategija energetske efikasnosti u BiH“ koji je pripremljen kroz Ugovor energetske zajednice, bruto iznos ukupne potrošnje primarne energije po jedinici BDP-a je 2.5 puta veći od prosjeka 27 zemalja EU a više od skoro svake zemlje Jugoistočne Evrope. Suprotno tome, BiH posjeduje značajne prirodne potencijale za održivi razvoj u oblasti energetike a koji se temelji na iskorištavanjem obnovljivih izvora energije i primjeni mjera energetske efikasnosti u privatnom i javnom sektoru. U nastavku prikaz potrošnje finalne energije po energentima i sektorima u RS i FBiH.



Sl.1. Struktura potrošnje energije po sektorima u RS za 2010.godinu [2]



Sl.2. Struktura potrošnje energije po sektorima u FBiH za 2010.godinu [2]

Kao što se može primjetiti iz prikazanih dijagrama najveća potrošnja energije je u javnom sektoru i sektoru domaćinstava a samim tim i najveći potencijal ušteda primjenom mjera energetske efikasnosti.

4. SISTEMSKO UPRAVLJANJE ENERGIJOM U JAVNOM SEKTORU BIH

Sistematsko upravljanje energijom je skup znanja i veština zasnovan na organizacionoj strukturi koja povezuje ljude sa dodeljenim odgovornostima, procedurama monitoringa efikasnosti i kontinualnim merenjem i poboljšanjem energetske efikasnosti. Ovaj skup znanja mora da bude podržan odgovarajućom IT infrastrukturom za skupljanje, procesuiranje i širenje znanja o potrošnji energije, ciljevima i informacijama o energetskej efikasnosti. Energetska efikasnost je niz isplaniranih procesa i provedenih mjera čiji je cilj korištenje minimalno moguće energije, tako da nivo udobnosti i stopa proizvodnje ostanu očuvani ili čak unaprijeđeni. U uskoj vezi pojmom energetske efikasnosti i upavljanja energijom jeste i pojam energetskeg menadžmenta. Energetski menadžment, u najopštijem smislu predstavlja upravljanje parametrima energetskeg tokova unutar neke organizacije, sistema ili nivoa vlasti, počev od procesa proizvodnje i nabavke energenata ili energije, preko procesa transformacije, sve do finalnog korištenja energije. Ako se ovako definisano upravljanje energetskeg tokovima vrši organizovano, struktuisano, sistematično i trajno, onda se može reći da postoji uspostavljen sistem energetskeg menadžmenta. Održivo upravljanje energijom, podrazumijeva da se sve ove konsekvence razmatraju na lokalnom nivou, imajući u vidu i globalne aspekte. Za implementaciju energetskeg menadžmenta važan alat predstavlja i uvođenje informacionog sistema koji ga prati. Ključni aspekti vezani za provodljivost mjera energetskeg menadžmenta su:

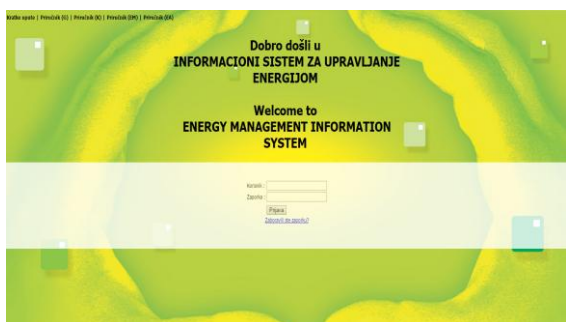
- politička volja da se uključi u globalne trendove vezane za borbu protiv klimatskih promjena i energetske efikasnost
- organizacioni i ljudski kapaciteti neophodni da bi se mjere u održivim energetskeg akcionim planovima implementirale.

Projekat Zeleni ekonomski razvoj Razvojnog programa Ujedinjenih nacija u BiH, ima upravo za cilj institucionalizaciju aktivnosti upavljanja energijom unutar zgrada javnog sektora gdje ključnu ulogu ima EMIS – Informacioni sistem za upravljanje energijom. Projekat je otpočeo 01.07.2013.godine a završetak je predviđen za 31.12.2018.godine. Aktivnosti projekta su u skladu sa smjericama EU, prema ugovoru Energetske zajednice i obavezama BiH da izvještava o trenutnoj potrošnji energije i energetskeg uštedama, a u skladu sa Akcionim planovima energetske efikasnosti. Osnovni ciljevi projekta Zeleni ekonomski razvoj su:

- smanjiti potrošnju javnih sredstava na potrošnju energije vode (povećanjem energetske efikasnosti i korištenjem obnovljivih izvora energije)
- omogućiti povoljan ambijent za ulaganje u infrastrukturne mjere energetske efikasnosti uz istovremeno stvaranje „zelenih radnih mjesta“.

3.1. Informacioni sistem za upravljanje energijom – EMIS (Energy Management Information System)

EMIS (Energy Management Information System) je web aplikacija razvijena u Hrvatskoj za pomoć u ispunjavanju programa upravljanja energijom u javnim zgradama. EMIS je uspješno implementiran u preko 9000 javnih objekata u Hrvatskoj u kojima se prati potrošnja energije i vode. Radi se o veoma kompleksnoj softverskoj web aplikaciji putem koje se na temelju opštih podataka o neposrednoj potrošnji energije i vode za zgradu, prati i analizira potrošnja energije i vode u zgradama javnog sektora (škole, bolnice, vrtići, upravne zgrade, itd.).



Sl.3. Pristupna stranica EMIS aplikaciji

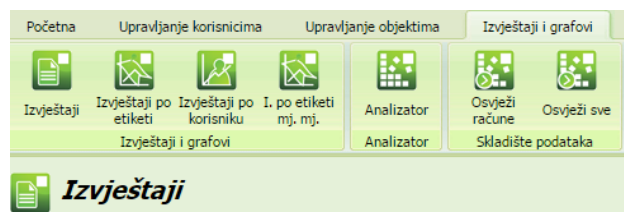
Podaci uneseni u EMIS koriste se za niz proračuna, analiza i kontrola koji omogućavaju razumijevanje kako i na što trošimo energiju i vodu u pojedinoj zgradi, uspoređivanje pojedinih zgrada sa sebi sličnim zgradama, kao i identificiranje neželjene, prekomjerne i neracionalne potrošnje. Svaki korisnik EMIS-a dobija svoj nalog za pristup EMIS-u preko interneta. Sistem je projektovan na takav način da može da podrži neograničeni broj uloga, pri čemu su ovih pet unaprijed definisane: sistem administrator (SA), energetska administrator (EA), energetska menadžer (EM), korisnik (K) i gost (G). Softverski alat služi za unos u centralnu bazu podataka javnih zgrada, kao i za analitičku interpretaciju unijetih podataka (grafikoni, statistika, energetska indikatori, identifikacija projekata i sl.). Pored monitoringa potrošnje, u bazu se unose i ostali relevantni podaci o zgradama (građevinske karakteristike objekta, tehnički sistemi u objektu, način korištenja zgrade, servisi u zgradi itd.). U tabeli 1. dat je kratak pregled statističkih podataka u EMIS-u za Bosnu i Hercegovinu. Slike 4. i 5. daju prikaz različitih funkcija u EMIS-u.

Tabela 1. Statistički podaci u EMIS-u za BiH

Broj objekata	2141
Broj unesenih računa	89 156
Broj mjernih mjesta	4412
Broj automatskih mjernih mjesta	39
Broj korisnika	884
Broj energetskih menadžera	40

Stavke računa	Količina	Jedinična cijena	(Raspon)	Porez	(Raspon)
Mjerno mjesto	1 mjesec	20		KM/mjesec	17 0 - 25
Obračunata energija MT	948 kWh	0,0752		KM/kWh	17 0 - 25
Obračunata energija VT	754 kWh	0,1503		KM/kWh	17 0 - 25
Obračunata snaga (anoglaširana)	6 kW	16,41		KM/kW	17 0 - 25
Prekomjerna reaktivna energija	831 kVArh	0,0322		KM/kVArh	17 0 - 25
Naknada za obnovljive izvore - gubici	1702 kWh	0,001		KM/kWh	17 0 - 25

Sl.4. Primjer unosa računa za el.energiju u EMIS-u

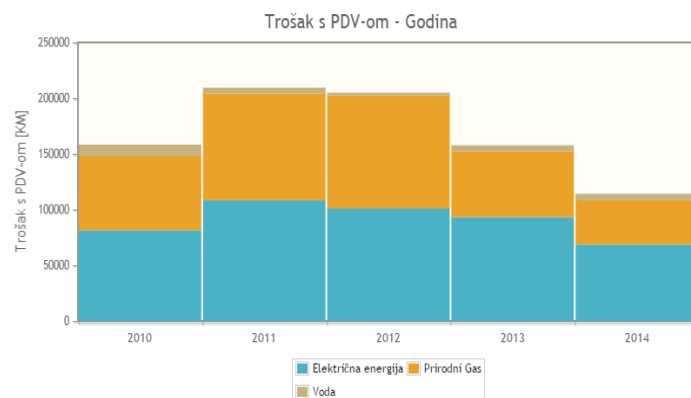


Sl.5. Mogućnost analiza i izvještavanja iz EMIS-a

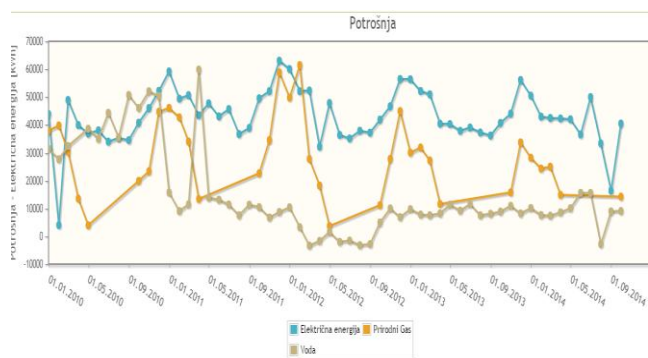
U EMIS-u je ugrađena opcija direktnog prebacivanja podataka iz njegove baze u EXCEL fajl. Ovim je mogućnost analize i filtriranja podataka znatno proširena. Takođe EMIS ima mogućnost pripreme različitih vrsta izvještaja u PDF ili EXCEL formatu kao i online skladištenje podataka (fotografije objekata, energetska certifikati, energetska pregledi). Članom 14. Zakona o energetska efikasnosti RS i kroz nacrt Zakona o energetska efikasnosti FBiH, prema članu 9. i 19., organi javne uprave, javne ustanove, organizacije i javna preduzeća će biti dužna po njihovom usvajanu da upravljaju energijom u zgradama, uspostave i vode informacioni sistem potrošnje energije u objektima, analiziraju i izvještavaju o potrošnji energije na godišnjem nivou. EMIS sistem upravo to i omogućuje.

3.2. Analiza potrošnje javnih objekata kroz EMIS

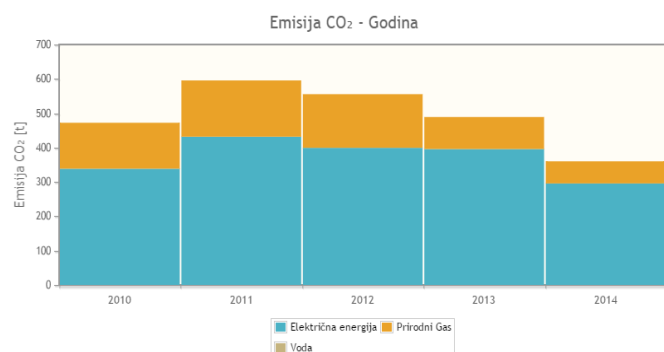
Kao primjer analize potrošnje kroz EMIS uzet je objekat Mašinskog fakulteta u Sarajevu. Podaci o potrošnji su unijeti za period 2010.-2014.godina i u nastavku je dat jedan dio od mnogobrojnih mogućnosti analiza koje omogućava EMIS.



Sl.6. Ukupni troškovi sa PDV-om po godinama

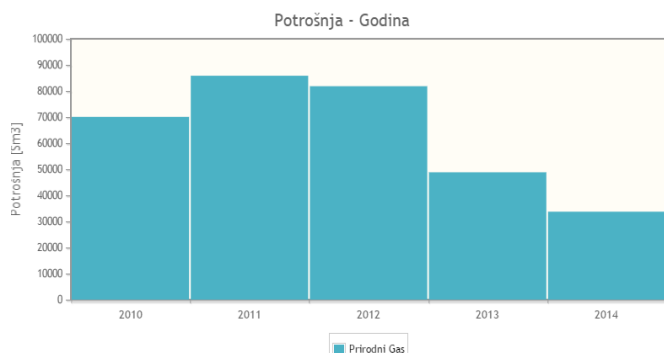


SI.6. Ukupna potrošnja potrošnji po godinama



SI.7. Emisije CO₂ po godinama u zavisnosti od energenta

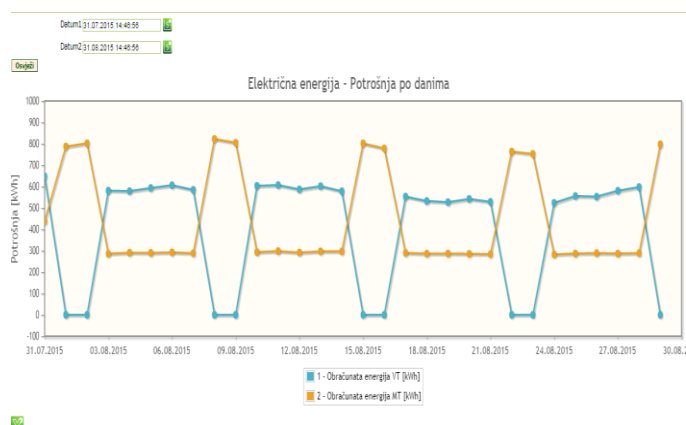
Na ovom objektu su primijenjene mjere energetske efikasnosti 2012 godine. Urađeno je utopljanje objekta, zamjena stolarije i obnovljena je fasada objekta kao i nadogradnja sistema grijanja. Ovim mjerama energetske efikasnosti su postignute uštede u energentu za grijanje i do 40%. Na slici 8. prikazan je dijagram potrošnje prirodnog gasa za period 2010–2014.godina gdje se jasno vide ostvarene uštede.



SI.8. Prikaz potrošnje prirodnog gasa po godinama

Ono što je interesantno navesti, ovaj objekat ima sistem automatskog unosa podataka u EMIS pri čemu se ostvaruje „pametno mjerenje“ potrošnje u objektu. Sistemi koji postoje u objektu su spojeni na automatska očitavanja pri čemu se očitane vrijednosti putem internet veze direktno šalju u EMIS. Na slici 9. primjer grafika na osnovu automatskog

očitanja za potrošnju električne energije pri čemu su jasno vidljivi prelazi iz niske u visoku tarifu i obratno.



SI.9. Grafik automatskih očitavanja za električnu energiju

Na ovom primjeru je prikazan dio analize podataka koji omogućava EMIS na nivou korisnika. U zavisnosti dodijeljenih uloga u sistemu moguće je analizirati i različite podatke. Nivo korisnika ima pristup samo svom objektu ili objektima, dok viši nivoi uloga imaju pregled cijele baze podataka. Tako da je moguće vršiti analizu potrošnje energenata na nivou opštine, entiteta, kantona, ali i cijele Bosne i Hercegovine kada baza podataka bude u potpunosti kompletirana.

5. ZAKLJUČAK

Očekuje se da po završetku GED projekta 5000 javnih objekata u BiH bude uneseno u EMIS bazu podataka. Primjeri iz prakse pokazuju da ukoliko u objektima ima sistemskog upravljanja energijom to povećava svijest zaposlenih i vodi i do 5% ušteda u potrošnji energije i vode bez dodatnih investicija u mjere energetske efikasnosti. Uticaj ovog projekta je veoma veliki i odličan je primjer kako se mogu ostvariti začajne uštede sistemskim monitoringom. Kao što je već navedeno, BiH ima preuzete obaveze prema Energetskoj zajednici praćenja i izvještavanja potrošnje energije na nivou države a EMIS je baza podataka koja upravo to i omogućuje. Sistemsko upravljanje energijom i informacioni sistem koji ga prati predstavlja osnov za uspostavljanje održivog energetskom sistema kako na nivou države tako i na nivou pojedinačnih objekata.

6. LITERATURA

- [1] Đorđe S. CRP, „Politika energetske efikasnosti na lokalnom nivou u BiH“,
- [2] First Nacional Energy Efficiency Action Plan 2010 – 2018 (NEEAP) 2011, final draft
- [3] Jovan R.Petrović i grupa autora, „Primena ISGE/ISEMIC modela na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu“ 43th International congress of heating, air conditioning and refrigeration, Belgrade, December 2012.

- [4] *Informacijski sustav za gospodarenje energijom – priručnik za korisnika*, Ekonerg, Zagreb 2011.
- [5] www.isge.ba

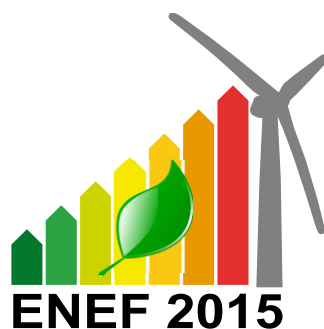
Abstract - Bosnia and Herzegovina is characterized as a country with a very high inefficiency in residential, public and industrial sector. The country spends about 20% of its GDP on energy, which is three times more than in the European Union and the United States. On the other hand, BiH is a signatory to various international conventions in the field of energy which has pledged to align its legislative frameworks with global trends. In accordance with the polled obligations, BiH is obliged to report to the Energy Community on energy consumption and energy savings. Currently in BiH there is no systematic management of energy. In the residential and public sectors, information on the consumption of energy and water are usually provided only on a monthly basis. This paper presents the implementation of an information system

for energy management - EMIS as a tool in the system of energy management at the level of BiH. This web application connects processes of data collection in buildings and their energy and water consumption, watching indicators of consumption and savings reports in the energy and water consumption. This paper presents an analysis of energy and water consumption through EMIS the example of Mechanical Engineering in Sarajevo.

Key words: energy management, energy consumption, energy efficiency

ENERGY MANAGEMENT SYSTEM IN BOSNIA AND HERZEGOVINA

Danijela Kardaš, Petar Gvero, Nijaz Delalić, Siniša Rodić



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015

25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesija C1

Sesija C1

Zdravko N. Milovanović, Svetlana R. Dumonjić-Milovanović

**ALGORITAM POSTUPKA OPTIMIZACIJE IZBORA LOKACIJE NOVIH
TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA (TEP) I ENERGETSKA EFIKASNOST95**

Zdravko N. Milovanović, Momir Samardžić

**ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI RADA TE UGLJEVIK
ZA PERIOD 2004-2014. GODINA105**

Radenko Marjanović, Petar Matić

**POBOLJŠANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI U PUMPNOM POSTROJENJU ODABIROM
ODGOVARAJUĆEG ELEKTROMOTORNOG POGONA SA FREKVENTOM REGULACIJOM114**

Dejan Stevanović, Milutin Petronijević, Predrag Petković

**KARAKTERIZACIJA ČETVOROKVDRANTNOG JEDNOSMERNOG POGONA UZ POMOĆ
MODIFIKOVANE STANDARDNE MERNE GRUPE118**

ALGORITAM POSTUPKA OPTIMIZACIJE IZBORA LOKACIJE NOVIH TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA (TEP) I ENERGETSKA EFIKASNOST

Zdravko N. Milovanović, *Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka*
Svetlana R. Dumonjić-Milovanović, *Partner inženjering d.o.o. Banja Luka*

Sadržaj – Donošenje odluke o lokaciji za buduće TEP predstavlja jednu od najbitnijih poslovnih odluka potencijalnog investitora. U procesu valorizacije i izbora prihvatljivih potencijalnih mikrolokacija za TEP u okviru odabrane makrolokacije neophodno je primijeniti određeni postupak, koji će biti uniforman u svim svojim aspektima. U okviru rada dat je prikaz algoritma faznog postupka izbora lokacije TEP na uglj. Realizacijom prve faze određuju se eliminacioni kriterijumi za izbor lokacije, proizašli iz zakonske legislative, primjene domaće i svjetske prakse, te tehničko-tehnoloških zahtjeva samog energetskeg objekta, i valorizuje širi prostor. Pri tome se odbacuju područja koja su neprihvatljiva po barem jednom eliminacionom kriterijumu. Preostale potencijalne lokacije u širem području idu u dalje dodatno vrednovanje i međusobno poređenje. Pravila za vrednovanje potencijalnih mikrolokacija, koja trebaju biti unaprijed definisana, predstavljaju kriterijume za poređenje, a obično se daju u formi zahtjeva za postizanje unaprijed definisanog cilja. Dati različiti kriterijumi mogu biti i međusobno suprotstavljene, pa je potrebno za vrednovanje alternativa raspolagati i metodom kojom bi se omogućila njihova simultana obrada. Proces inženjerske optimizacije predstavlja sistemsko traženje optimalnog rješenja zadatog inženjerskog problema uzimajući u obzir definisane kriterijume optimalnosti, a u uslovima zadovoljavanja zadatih ograničenja. Optimalno rješenje mora biti i energetska efikasno.

1. UVOD

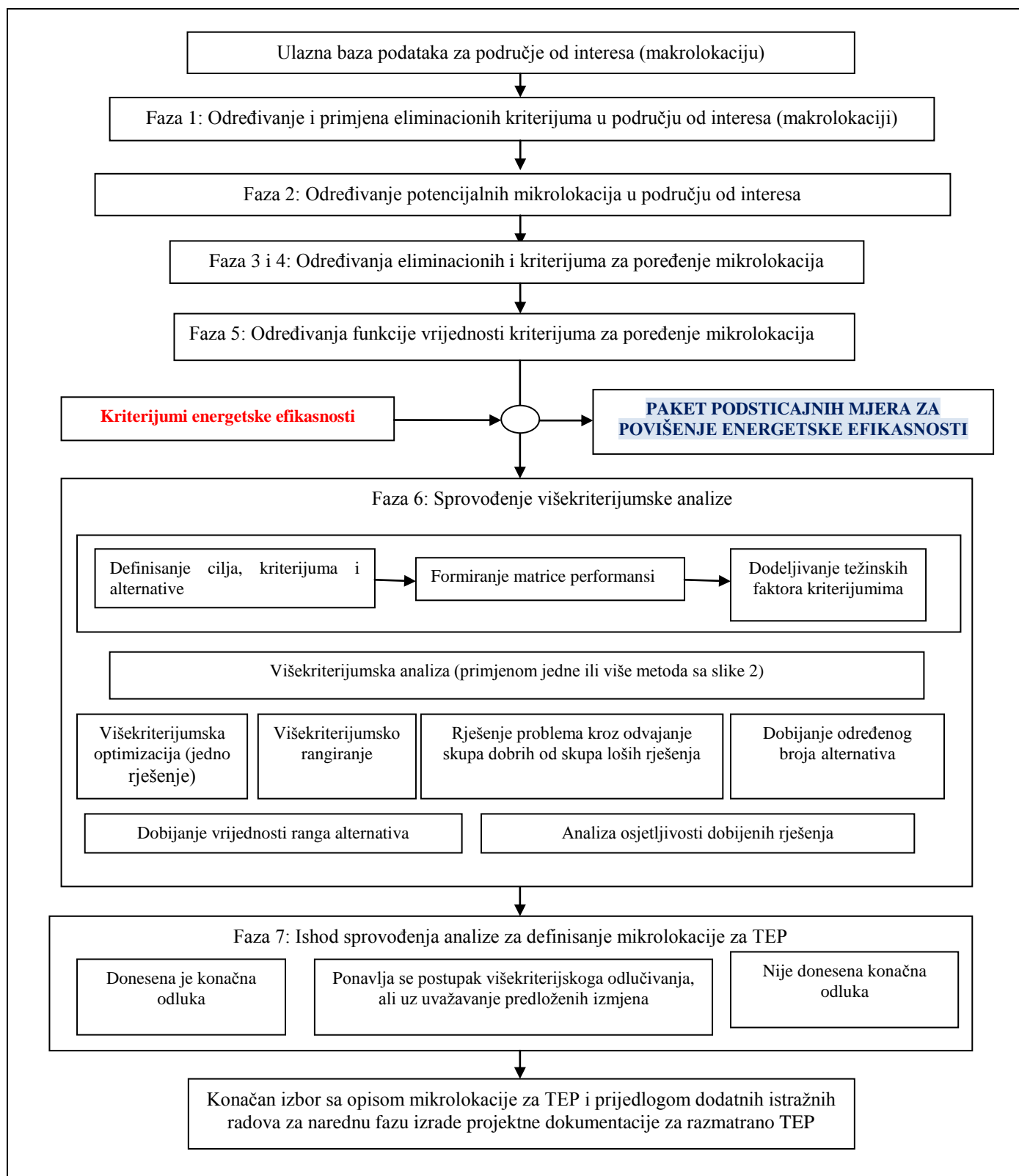
Donošenje odluke o lokaciji za buduće TEP predstavlja jednu od najbitnijih poslovnih odluka vezanih za cjelokupan postupak koji prati najranije etape njihovog životnog ciklusa - pripremu za projektovanje, proces projektovanja i izgradnje, pa sve do puštanja u rad i njihovog probnog pogona. U procesu valorizacije i izbora prihvatljivih potencijalnih mikrolokacija za TEP u okviru odabrane makrolokacije neophodno je primijeniti određeni postupak, koji će biti uniforman u svim svojim aspektima. Da bi se ovakav cilj i ostvario neophodno je definisati opšte kriterijume za izbor i međusobno poređenje izabranih mikrolokacija u okviru ranije utvrđene makrolokacije pomoću primjene metode višekriterijalne optimizacije. Proces donošenja odluke o lokaciji usko je determinisan sa donošenjem drugih odluka, od kojih su posebno bitne definisanje namjene TEP (proizvodnja samo električne ili električne i toplotne energije) i izbor sirovinke baze kod TEP. Algoritam postupka izbora lokacije dat je na slici 1. Pristupanje ozbiljnijoj izradi projektnog zadatka i potrebne (zakonom propisane) projektne dokumentacije zahtijeva prethodno definisanu ulaznu bazu podataka. Eventualne potrebne dodatne podloge, ostala projektna i druga dokumentacija, kao i druge informacije od važnosti za izradu dalje projektne dokumentacije definišu se

nakon obavljenih preliminarnih analiza i tokom postupka postepene izrade dokumentacije (niži nivo projektne dokumentacije determiniše obim i sadržaj istražnih radnji potrebnih za naredni viši nivo dokumentacije). U slučaju neraspoloživosti nekih od podloga, investitor i projektant zajedno ocjenjuju uticaj neraspoloživosti podloge na očekivane rezultate i dinamiku izrade dokumentacije, rizik i način prevazilaženja problema. Izbor lokacije termoelektrane prvenstveno zavisi od snabdijevanja i raspoloživih količina goriva i vode, dok izbor lokacije toplane ili energane podređen je prvenstveno potrošačima koje treba snabdijevati sa toplotnom energijom. U okviru Faze 1 određuju se eliminacioni kriterijumi za izbor lokacije, proizašli iz zakonske legislative, primjene domaće i svjetske prakse, te tehničko-tehnoloških zahtjeva samog energetskeg objekta, i valorizuje širi prostor, pri čemu se odbacuju područja koja su neprihvatljiva po barem jednom eliminacionom kriterijumu. Glavni cilj realizacije ove faze je da se eliminiše što veći dio područja od interesa i pojednostavi proces traženja i vrednovanja potencijalnih mikrolokacija u okviru šire makrolokacije. U slučaju da na stadiju razrade i projektovanja ne postoje dovoljno dobri kvalitetni i pouzdani podaci za primjenu eliminacionih kriterijuma za izbor mikrolokacija isti se ne koriste, uz obavezu njihove realizacije po sprovedenim dodatnim terenskim istraživanjima. Cilj je sprečavanje nepovratnog odbacivanja potencijalno dobrih, ali dovoljno neistraženih, lokacija, dok eventualni prolazak "loših" lokacija u sljedeću fazu istraživanja sigurno će biti "otkriven" i "sankcionisan" u daljim fazama postupka izbor lokacije primjenom višekriterijalnih metoda odlučivanja. U okviru Tabele 1 dat je pregled eliminacionih kriterijuma za potrebe izbora lokacije TEP na uglj i gas. Po realizaciji ove faze određuju se potencijalne lokacije u širem području koje nije eliminisano, tzv. globalno vrednovanje ("Site Screening"). Lokacije koje ostanu nakon Faze 2 neophodno je dodatno vrednovati i najčešće i porediti, s ciljem njihovog rangiranja prema povoljnostima lokacija za smještaj TEP. Pravila za vrednovanje potencijalnih mikrolokacija, koja trebaju biti unaprijed definisana, predstavljaju kriterijume za poređenje (KP), a obično se daju u formi zahtjeva za postizanje nekakvog cilja. Kriterijumi za poređenje se obično grupišu, Tabela 2. Povećanje nivoa uticaja energetskeg objekata i postrojenja na degradaciju životne sredine zahtijeva podjednako i od razvijenih i zemalja u razvoju usklađivanje potreba između zahtjeva konzuma i proizvodnje energije, uz poboljšanje energetskeg opcija za održivi razvoj.

Usklađivanjem ciljeva zaštite vazduha, vode, zemljišta, flore, faune i pejzažnih karakteristika sa društveno-ekonomskim ciljevima ima za osnovni cilj maksimizaciju neto ekonomskog blagostanja razvoja energetike, uz zadržavanje zalihe ekonomskih, ekoloških i sociokulturnih vrijednosti za buduće generacije i osiguravanje mreže za pokrivanje osnovnih potreba i zaštititi kategorije siromašnih.

Održivost izabranih energetske opcija zahtijeva detaljni i integrisani okvir za analizu i proces odlučivanja, sa više kriterijuma i više nivoa odlučivanja, kao i uz mnogo objektivnih i subjektivnih ograničenja. Polazeći od ranijeg principa planiranja razvoja energetike, koji je podrazumijevao zadovoljenje zahtjeva konzuma za energijom

sa minimalnim ekonomskim troškovima, neophodno je dodatno uključiti i zahtjeve vezane za životnu sredinu i samo društvo, počev od najranije etape razrade i izrade projektne dokumentacije, gdje je izbor mikrolokacije važan preduslov za osiguranje održivog energetskog razvoja, [3].



Sl. 1. Algoritam postupka izbora lokacije novih TEP.

Tabela 1. Prikaz eliminacionih kriterijuma za izbor lokacija TEP na ugalj/gas/mazut.

Oznaka	Opis	Podkriterijumi
Grupa EK 0	Usklađenost sa planskom dokumentacijom	EK 0.1. Usklađenost sa prostornom planskom dokumentacijom, EK 0.2. Usklađenost sa strategijama razvoja energetskog sektora, EK 0.3. Usklađenost sa ekonomskom politikom i sl.
Grupa EK 1	Potreban prostor za smještaj objekata i postrojenja GPO i pomoćne opreme	EK 1.1. Glavni pogonski objekat (GPO): kotao, turbine, električni generator, EK 1.2. Pomoćna postrojenja (HPV-hemijska priprema vode, dobava osnovnog i pomoćnog goriva, otprema nus proizvoda nastalih u procesu eksploatacije, ekološki sistemi - otpadne vode, ESF, dimnjak i sl., sistem tehničkih gasova, elektro oprema - rasklopna postrojenja, transformatori i dr.)
Grupa EK 2	Konflikti sa drugim prostornim sadržajima	EK 2.1. Područja posebnih namjena (vojni objekti i postrojenja), EK 2.2. Postojeća i planirana naseljenost područja, EK 2.3. Turističko-rekreaciona područja, EK 2.4. Manevarske zone aerodroma, EK 2.5. Saobraćajna infrastruktura (putevi i željezničke pruge), EK 2.6. Zaštitne zone od drugih industrijskih i privrednih objekata, EK 2.7. Ostalo (poljoprivredni sadržaji, sistemi za vodosnabdijevanje i sl.)
Grupa EK 3	Tehničko-tehnološki aspekti	EK 3.1. Količina i transport potrebne rashladne vode, EK 3.2. Opasnost od plavljenja, EK 3.3. Elektroenergetski aspekti vezivanja na prenosnu mrežu, EK 3.4. Naselja - gasna mreža, EK 3.5. Naselja - toplifikaciona mreža, EK 3.6. Naselja - vodovodna mreža EK 3.7. Eksploatacija ruda i minerala
Grupa EK 4	Ekonomsko-finansijski aspekti izgradnje i/ili rada i okvirna energetska efikasnost i održivost	EK 4.1. Investicioni troškovi EK 4.2. Troškovi eksploatacije (rada) i održavanja, EK 4.3. Troškovi goriva i potrošnog materijala, EK 4.4. Troškovi vezani za uticaj ograničenja emisije gasova sa efektom staklene bašte, EK 4.5. Ekonomski vijek elektrana, EK 4.6. Ekonomska profitabilnost ulaganja u elektrane, EK 4.7. Odnos vraćene i uložene energije (Okvirna energetska efikasnost)
Grupa EK 5	Sigurnosni aspekti i rizik	EK 5.1. Seizmotektonika, EK 5.2. Neotektonika, EK 5.3. Hidrogeologija, EK 5.5. Litološke i geomorfološke karakteristike, EK 5.6. Topografija, EK 5.7. Naselja - gustoća i sigurnosni aspekti lokacije
Grupa EK 6	Ekološki aspekti i zaštita životne sredine u periodima tokom životnog ciklusa (izgradnja, rad, revitalizacija, rekonstrukcija i modernizacija i uklanjanje objekata)	EK 6.1. Zaštita prirodne baštine, EK 6.2. Zaštita kulturne baštine, EK 6.3. Zaštita biološko-ekoloških vrijednosti, EK 6.4. Socijalni aspekti, EK 6.5. Sociološke vrijednosti ugrožavanja prirode

Tabela 2. Prikaz kriterijuma za poređenje kod izbora lokacija TEP na ugalj/gas/mazut

Oznaka	Opis	Podkriterijumi
Grupa PK 0	Prostorno-planski uslovi	PK 0.1. Potencijal konflikta u prostoru sa drugim korisnicima prostora, PK 0.2. Odnos lokacije prema zaštićenim dijelovima prostora na lokaciji i u njenoj blizini, PK 0.3. Namjena i korišćenje prostora (demografija i naselje, poljoprivreda i šumarstvo, industrija i rudarstvo, školstvo i obrazovanje)
Grupa PK 1	Geološko-seizmološki pokazatelji	PK 1.1. Seizmološki i seizmotektonski pokazatelji, PK 1.2. Lokalni geološki pokazatelji, PK 1.3. Hidrogeološki pokazatelji, PK 1.4. Hidrološki pokazatelji (disperzija otpadne toplote, disperzija u vodi, udaljenost površinskih tokova od odlagališta otpada i sl.), PK 1.5. Meteorološki aspekti (stanje zadirmljenja, smog, stanje tišine i ostalih nepovoljnih meteoroloških stanja)
Grupa PK 2	Tehničko-tehnološki pokazatelji	PK 2.1. Transport (rashladna voda, VN dalekovod, ugalj/gas/mazut, tehnički gasovi, šljaka i leteći pepeo, saobraćajna pristupačnost, građevinski material i dr.), PK 2.2. Meteorološki i hidrološki aspekti (sigurnost od plavljenja, ekstremne meteorološke pojave i uticaj), PK 2.3. Geologija i seizmologija (seizmotektonika i seizmika, inženjerska geologija - mehanika tla i temeljenje, litologija i geomorfologija, neotektonska aktivnost)

Grupa PK 3	Sigurnosno-bezbjedonosni pokazatelji	PK 3.1. Uslovi za dopremu opreme PK 3.2. Uslovi za dopremu sirovina i potrošnog materijala, PK 3.3. Procjena rizika u okolini PK 3.4. Blizina i opasnost od uticaja drugih industrijskih i ostalih rizičnih objekata i postrojenja
Grupa PK 4	Ekonomsko-finansijski pokazatelji i energetska efikasnost	PK 4.1. Opis obračunskih jedinica za cost-benefit analizu (analiza investicionih troškova, troškova eksploatacije i održavanja, troškova rekonstrukcije, revitalizacije i modernizacije i troškova uklanjanja objekta ili promjene njegove namjene), PK 4.2. Analiza društvenih tokova (ocjena distorzije cijene ulaganja, plata, fiskalni aspekti), PK 4.3. Analiza društvene koristi (distorzija cijene učinak/rezultata, društvena korist od zaposlenosti, spoljašne koristi, ekonomska neto sadašnja vrijednost - NSV i isplativosti - Isp), PK 4.4. Analiza dodatnih kriterijuma za procjenu, sa aspekta prezentacije rezultata sa stanovišta opštih ciljeva standarada EU, povećanja GDP-a, povećanje zaposlenosti i dr., PK 4.5. Mogućnost izgradnje kogenerativnih/hibridnih postrojenja, kao i drugih kompatibilnih objekata PK 4.6. Analiza indikatora energetske efikasnosti
Grupa PK 5	Ekološki aspekti i održivi razvoj	PK 5.1. Vizualni uticaj i uticaj na pejzaž, PK 5.2. Biološko-ekološka osjetljivost lokacije i njene neposredne okoline, PK 5.3. Zaštita životne sredine (priroda i kulturna baština, ekološko-biološke karakteristike, radiološki aspekti, kvalitet voda, stanje tla-hemijska agresivnost)
Grupa PK 6	Posebni pokazatelji sa aspekta održivog prostornog razvoja	PK 6.1. Očuvanje vrijednosti prostora za prioritete djelatnosti područja, PK 6.2. Mogućnost korišćenja ekološki povoljnijih energenata, PK 6.3. Nogućnost korišćenja novih tehnologija sa višim stepenom korisnog dejstva (kogeneracija, trigeneracija, kombinovana parno-gasna postrojenja za proizvodnju električne energije, hibridni sistemi u kombinaciji sa obnovljivim izvorima i sl.), PK 6.4. Zadržavanje ili smanjenje opterećenja već opterećenog područja, PK 6.5. Prvenstveno otklanjanje konflikata i njihovo usklađivanje sa interesima zaštite prirodne baštine, uz potrebu valorizaciju krajolika (pejzaža) i relevantnih ekoloških komponenti, PK 6.6. Sanacija devastiranih područja i prostora bez drugih djelatnosti, PK 6.7. Mogućnost zapošljavanja i privredni razvoj depopulacijskih područja

2. ENERGETSKA EFIKASNOST I LOKACIJA TEP

Grupa kriterijuma, označena kao PK 4, obuhvata analizu ekonomsko-finansijskih pokazatelja, kao i energetske efikasnosti sistema u cjelini. Društveno-ekonomska analiza opravdanosti troškova (Cost-benefit analiza) obuhvata analizu investicionih troškova, troškova eksploatacije i održavanja, troškova rekonstrukcije, revitalizacije i modernizacije i troškova uklanjanja objekta ili promjene njegove namjene, zatim analizu društvenih tokova (ocjena distorzije cijene ulaganja, plata, fiskalni aspekti), društvene koristi (distorzija cijene učinak/rezultata, društvena korist od zaposlenosti, spoljašne koristi, ekonomska neto sadašnja vrijednost (NSV) i isplativosti (Isp), kao i dodatnih kriterijuma za procjenu, sa aspekta prezentacije rezultata sa stanovišta opštih ciljeva standarda EU, povećanja GDP-a, povećanje zaposlenosti i dr. Prilikom kreiranja politike energetske efikasnosti, polazeći od stanja na tržištu energije, potrebno je definisati mjere mogu stimulisati ulazak na tržište i koje mogu ubrzati komercijalizaciju ili povećati prodor energetski efikasnih proizvoda i usluga na tržište, [4, 5]. Prije definicije paketa instrumenata podsticajne politike potrebno je provesti detaljnu analizu, koja najčešće obuhvata:

- analizu neposredne potrošnje energije u zadnjih minimalno deset godina (odrediti istorijske trendove te ispitati različite moguće razvojne scenarije),
- proračun indikatora energetske efikasnosti na makroekonomskom i sektorskom nivou (energetska intenzivnost, specifična potrošnja, indeks energetske efikasnosti, prilagođene indikatore prema klimatskim uslovima, difuzijske indikatore i CO₂ indikatore,

- Benchmark uporednu analizu, analizu sa referentnim zemljama ili sa vrijednošću prosjeka za EU-15,
- određivanje nacionalnog cilja za poboljšanje energetske efikasnosti kako za cjelokupnu potrošnju, tako i za svaki sektor posebno.

Ciljevi se postavljaju za cjelokupnu potrošnju energije, kao i za svaki sektor moraju biti SMART (specifični, mjerljivi, ambiciozni, realistični i ostvarivi u određenom vremenu). Na osnovu rezultata analize tržišta definišu se podsticajne mjere i uspostavlja prihvatljiva teorija o načinima na koje će instrumenti politike dovesti do ostvarenja ciljeva, odnosno utvrđuju se načini na koje će upravo određeni instrument dovesti do ekonomski isplativih poboljšanja energetske efikasnosti (pristup poznat kao "ex ante evaluacija").

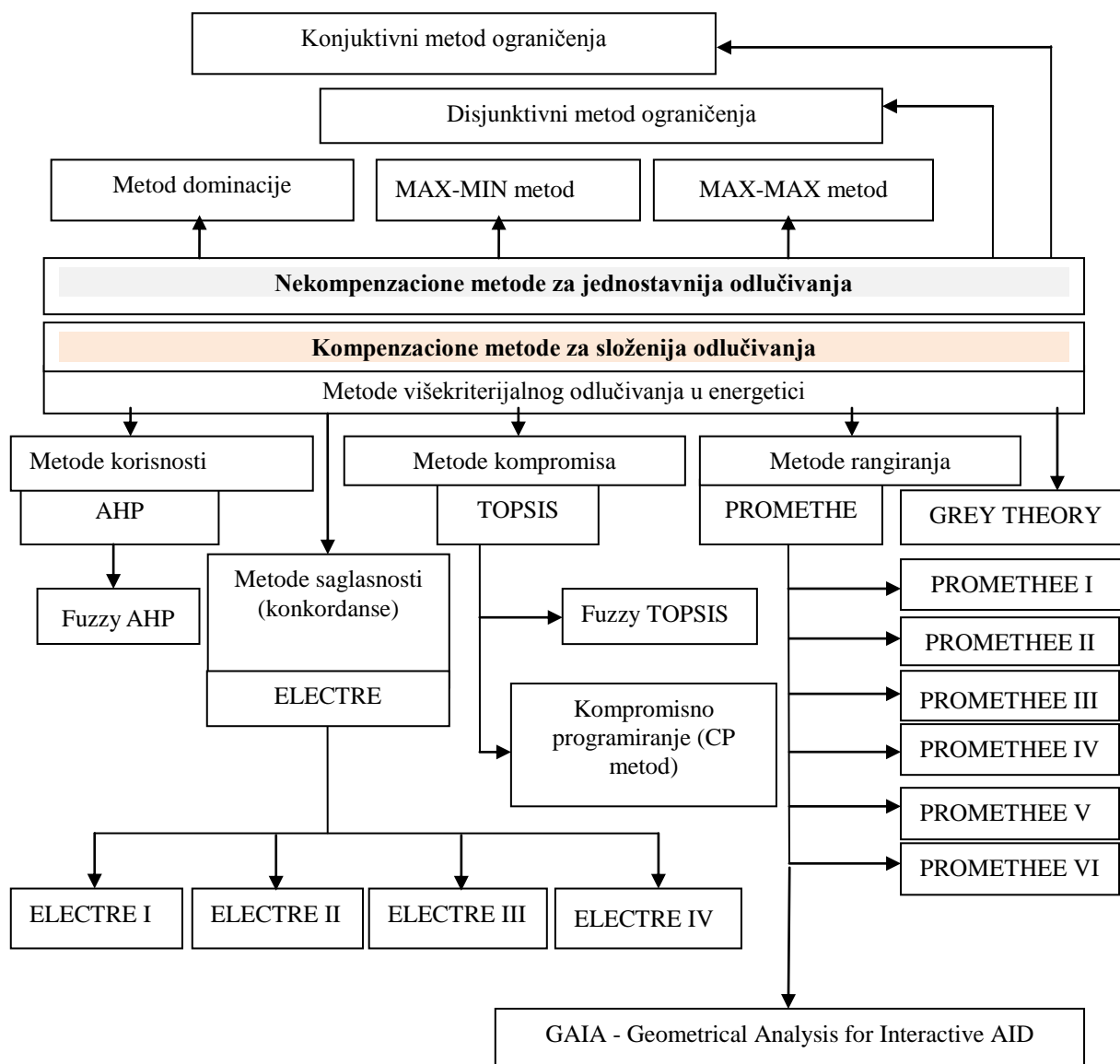
3. MODELI ODLUČIVANJA I FAZE REALIZACIJE PROBLEMA IZBORA LOKACIJE

Postojanje teškoća u vrednovanju određenih ekoloških i društvenih uticaja razvoja novih energetskih objekata i veliki broj mogućnosti za izbor njihove lokacije zahtjeva primjenu metode višekriterijumske analize, a ne samo primjenu konvencionalne metode analize troškova i dobiti. Zbog osiguranja većeg obima prihvatljivih alternativa izbora lokacije, od posebne važnosti je identifikacija mogućih kriterijuma (eliminacioni i kriterijuma za poređenje), koji u osnovi moraju zadovoljavati elemente održivog razvoja - ekonomiju, životnu sredinu, energetsku efikasnost i društvo.

Korišćenje metoda višekriterijalnog odlučivanja treba da obezbijedi pomoć donosiocima odluka u slučaju kada postoji

veliki izbor alternativa za problem koji se rješava. Pri tome, proces odlučivanja i izbora optimalnog rješenja prilikom projektovanja energetskih postrojenja je višekriterijumskog tipa, pri čemu je potrebno u obzir uzeti veći broj faktora i interesa različitih grupacija i nivoa društvene zajednice (često i međusobno suprotstavljenih), uz učešće više interesnih grupa u procesu odlučivanja, [2]. Postavlja se pitanje kako pomiriti sve ove kriterijume, sa aspekta različitih preferencija i često međusobno suprotstavljenih interesa. Prilikom izbora varijantnih rješenja kod energetskih postrojenja, idealan slučaj bi odgovarao situaciji kod koje bi se svi kriterijumi u problemu mogli klasifikovati u dvije kategorije: profitnu kategoriju, gdje se kriterijumi maksimiziraju, pri čemu kriterijum ne mora nužno biti profitni i troškovnu kategoriju, gdje se kriterijumi minimiziraju. Idealno rješenje bilo bi ono

koje omogućava maksimiziranje svih profitnih i minimiziranje svih troškovnih kriterijuma, što je u praksi veoma teško postići. Kako idealno rešenje nije moguće postići, potrebno je tražiti tzv. nedominiranih rješenja (rješenje je dominirano ako postoji bar jedno drugačije rješenje, koje je bar po jednom atributu bolje od posmatranog, uz uslov da je po drugim atributima bar jednako). Treću kategoriju čine tzv. zadovoljavajuća rješenja, kao redukovani podskup mogućih rješenja. Konačno, postoje poželjna rješenja koja su nedominirana, a najbolje zadovoljavaju očekivanja donosioca odluke. U principu razlikuju se dvije grupe metoda - jednostavne nekompensacione metode za jednostavnija odlučivanja i preciznije kompensacione metode za složenija odlučivanja, slika 2.



Sl. 2. Hijerarhijski pregled metoda odlučivanja u energetici, [1].

Polazeći od tri najčešća tipa višekriterijumskih zadataka moguće je izdvojiti višekriterijumsku optimizaciju (jedno rješenje), višekriterijumsko rangiranje (rangirano više rješenja) i višekriterijumsko odvajanje skupa dobrih iz skupa loših rješenja (podskup za dalje rješavanje problema), [6, 7].

Pri tome se posmatra konačan skup alternativa (odluka, akcija, potencijalnih rješenja) $A_j \in A$ (taj broj u praksi najčešće ne prelazi 4), gdje se svaka od alternativa opisuje sa više kriterijuma (atributa, pokazatelja) $PK_j \in PK$. Za konkretni slučaj izbora lokacije TEP alternative i kriterijumi

se uređuju u matricnom obliku. Svaki od tih kriterijuma je ili maksimizacionog (max) ili minimizacionog (min) tipa, dok je sa x_{ij} data vrijednost i -te alternative prema j -tom kriterijumu i sa W_j težinom kriterijuma (ocjena njegove važnosti). Na osnovu većeg broja publikovanih radova, može se zaključiti da AHP predstavlja pogodan i veoma prilagodljiv sistem za podršku odlučivanju kod različitih problema pri varijantnom odlučivanju sa više kriterijuma, a koji sa druge strane se realizuje kao softver za PC platforme sa kompletnom tehničkom podrškom u oblasti višekriterijumskog odlučivanja. Kod rješavanja nekih problema može se pojaviti određena nesigurnost u odlučivanju, pa se koristi tzv. *fuzzy* višekriterijalno odlučivanje, [9]. Ta nesigurnost može biti uzrokovana na dva načina: prvi način, za slučaj kada donosilac odluke nije 100% siguran pri donošenju neke subjektivne procjene, a naziva se nesigurnost subjektivne prosudbe, i drugi, kada informacije o nekim kriterijima nisu potpune ili nisu dostupne uopšte, a naziva se nesigurnost zbog nedostatka podataka ili nepotpunih informacija. U principu, za rješavanje takvih problema koriste se izvedbe običnih metoda višekriterijalnog odlučivanja koje su namijenjene problemima definisanim s određenom nesigurnosti (*fuzzy* izvedenice metoda, kao što su: *fuzzy* AHP, *fuzzy* TOPSIS, itd.), [1, 6-10]. Grey theory (siva teorija) je metoda koja se koristi za proučavanje nesigurnosti, posebno kod realizacije matematičkih analiza tehničkih sistema sa ulaznim neizvjesnim informacijama, posebno problema nesigurnosti, koje su uzrokovani diskretnim podacima i nepotpunim informacijama. Izvorni koncept ove metode razvijen je od strane prof. Denga 1982. godine, [1]. Koristi se kod rješavanja problema odlučivanja koji su definisani sa relativno malo ulaznih informacija i podataka, poznatih na specifičnoj ljestvici i nepoznatih na specifičnoj ljestvici, [8]. *Grey theory* se bavi visokom matematskom analizom sistema, koji su djelomično poznati i djelomično nepoznati, a definisani su s nedovoljno podataka i nedovoljno znanja. Kada proces odlučivanja nije jasan, *grey theory* ispituje interakcijsku analizu između velikog broja međusobno različitih i nepotpunih ulaznih podataka. Pored višekriterijumskog odlučivanja, ova metoda se koristi se i kod računarske grafike, prognoze te kontrole sistema u cjelini, [8]. *Grey theory* metod korišćen je pored ostalog u radovima Ozcana i kod izbora lokacije skladišta ([9]), a pod određenim uslovima primjenljiv je i kod analize izbora makro i mikrolokacije za složene energetske objekte.

3.1. Faze rješavanja problema

Osnovne faze rješavanja problema sastoje se od određenih modula, koji su međusobno uslovljeni. Izgradnja konkretnog modela višekriterijalne analize za rješavanje problema u energetici započinje definisanjem nivoa na koju se model odnosi, tj. za strateški nivo odlučivanja skup kriterija i generisanje akcija (alternativa) će imati sigurno različit postupak u odnosu na niže nivoe odlučivanja. Polazeći od podjele na strateški, taktički i operativni nivo odlučivanja (politički nivo odlučivanja je izvan razmatranog konteksta problema), onda se strateškom nivou odlučivanja može opredijeliti makro teritorijalni pristup u definisanju akcija, kao i vremenski period koji se odnosi na 3 do 5 godina. Za niže nivoe odlučivanja karakterističan je mezo i mikro teritorijalni pristup (konkretno teritorij jedne regije ili

njenog dijela, te opštine ili njenog dijela), odnosno vremenski periodi manji od 3 godine pa do nekoliko mjeseci.

3.2. Dimenzija problema i preliminarne težine grupa kriterijuma za vrednovanje

Konkretna primjena višekriterijalne analize na vrednovanje procedure izbora lokacije u okviru predinvesticionih i investicionih studijskih analiza projekata TEP posebno izdvaja prostorno-geološki segment analize (kriterijumi grupe PK 0 i PK 1), ekonomsko-finansijski segment analize (kriterijumi grupe PK 4), tehničko-tehnološki segment analize (kriterijumi grupe PK 2), društveno-politički segment analize (kriterijumi grupe PK 6) i ekološko-sigurnosni segment analize (kriterijumi grupe PK 3 i PK 5). Prethodno se podrazumijeva da su izabrane mikrolokacije u okviru šire makrolokacije u potpunosti zadovoljile eliminacione kriterijume iz Tabele 1. Navedenim segmentima analize ravnomjerno bi dodjeljivali po 20% vrijednosti sume težina, a unutar segmenta analize za raspodijele težina pojedinim kriterijima, koristili bi se najčešće anketom ekspertnih timova. Pojedini autori su ukazivali na potrebu dodjeljivanja većih težina grupi ekološko-sigurnosnih kriterija, te kriterijima koji su se odnosili na legislativu i pravnu regulativu za njihovo ispunjenje. Za realizaciju potrebnih građevina u okviru energetske sistema u cjelini, Tavares (1999.) razvija tri karakteristične glavne grupe kriterijuma - kriterijumi koji utiču na proces izgradnje građevina iz dispozicionog plana TEP, kriterijumi koji govore o samom sistemu u cjelini, kriterijum koji se odnose na integraciju sistema u okolinu, društvo, politiku, kulturu, itd. Prema [2], kriterijumi za poređenje termoelektrane na uvozni ugalj i domaći ugalj dobijen iz jamske eksploatacije grupisani su prema prevladavajućim karakteristikama u tri grupe - tehničko-tehnološke (A), sigurnost i prihvatljivost uže lokacije (C) i prihvatljivost šire lokacije (D). Slično, kriterijumi za gasne termoelektrane grupisani su prema prevladavajućim karakteristikama u dvije grupe - tehničko-tehnološki aspekti (A) i prihvatljivost lociranja (B). Sunil Ghose (2008.) uvodi metodu sa 21 kriterijumom za izbor lokacije za novi termoenergetski objekat snage 750 MW: namjena ili dostupnost zemljišta (Land Availability), seizmička stabilnost (Seismic Stability), plavno područje (Floodplain), karakteristike vremena na lokaciji (Weather), postojeća područja opasnosti (Existing Site Hazards), postojeće korišćenje zemljišta (Existing Land Use), ograničenost vazdušnog prostora (Restricted Air Space), kulturna dobra (Cultural Resources), endemične i ugrožene vrste (Threatened and Endangered Species), blizina javnog područja (Proximity to Public Access Areas), državni/lokalni uslovi za zaštitu životne sredine (State/Local Environmental Requirements), blizina klase I vidljivosti (zasićenosti) područja (Proximity to Class I Visibility Areas), blizina zemljišta sa posebnim vlasništvom (Proximity to Tribal Lands), pristup rashladne vode (Access to Cooling Water), ekološki aspekt snabdijevanja gorivom (Fuel Supply Environment), pristup na električnu mrežu (Access to Grid), prava služnosti (Rights of Way), opcije transporta na raspolaganju (Transportation Options Available), dostupnost izvođača i zahtijevanih vještina za realizaciju projekta (Labor and Skills Availability) i troškovi i ekonomija vezana za privredno okruženje (Cost and Economic Environment). Kao posebno značajni izdvajaju se sljedeći kriterijumi: dostupnost

i način realizacije sistema hlađenja objekata TEP (Cooling Water Consumption & Availability), transport i skladištenje CO₂ (CO₂ Transportation and Storage), dostupnost i namjena zemljišta (Land Availability), dostupnost za realizaciju planiranih radova i potrebnih vještina (Labor and Skills Availability) i razmatranje dostupnosti goriva (Fuel Supply Consideration).

3.3. Definisanje i usaglašavanje težina kriterija i tipova preferencije za svaki pojedinačni kriterijum

Višekriterijalni problem izbora lokacije za TEP sadrži više različitih, ponekad i konfliktnih kriterija koji mogu biti od različite važnosti za donosioca odluke za konkretni projekat. Za procjenjivanje stepena važnosti kriterija postoje metode zavisne do sposobnosti eksperta donosioca odluke ili grupe eksperata (sudaca). Pri tome, uobičajno je da se relativna važnost kriterija izrazi u terminima prioriteta (slučaj kada su kriteriji poredani po važnosti) ili težina odnosno pondera (koriste da bi se brojčano, najčešće u procentima, izrazila važnost kriterija ili da bi se razlikovala relativna važnost nekoliko kriterija unutar istog prioriteta). U prvom slučaju, postupak se sprovodi planiranim redosljedom na bazi važnosti, pri čemu sljedeći, manje važan, kriterijum uopšte ne ulazi u igru, sve dok se važniji kriterijum s višeg nivoa ne uzme u razmatranje. Težine kriterijuma oslikavaju stavove donosioca odluka, koji imaju veoma visok uticaj na konačne odluke za izbor lokacije. Važan aspekt koji je prilikom određivanja težina kriterijuma potrebno razmotriti predstavlja subjektivizam donosioca odluka, koji se donekle može smanjiti uz istovremeno obezbjeđivanje mogućnosti da se stavovima konsultovanih eksperata iz oblasti projektovanja energetskih postrojenja obezbijedi znatno veći značaj u odnosu na stavove početnika prilikom određivanja težina kriterijuma, koji je delimično prilagođen u cilju primene grupnog odlučivanja u slučaju grupe sa različitim značajima dodeljenim učesnicima grupe. Postupci za određivanje težina kriterijuma obično ne predstavljaju sastavni dio metoda višekriterijumskog odlučivanja. Metode za grupno ocjenjivanje predstavljaju metode pomoću kojih se u višekriterijalnim problemima određuju važnosti kriterija, čija je osnovna prednost nad individualnim mišljenjem širi spektar informacija, stručnost i iskustvo u analizi. Međutim, postoje i problemi kao što su utrošak vremena, dominacija pojedinih autoritativnih osoba ili sposobnost uvjeravanja nekog člana grupe, koja može odvesti diskusiju u nebitnom smjeru. U literaturi se razmatra više načina za određivanje težina kriterijuma, među kojima izdvajamo postupak poređenja po parovima, metodu rangiranja, metodu ocjenjivanja, sukcesivno poređenje, Entropy i Delphi metodu. Neke od metoda koje se koriste za izbor najbolje alternative su i metode jednostavnog zbrajanja težina i metoda PROMETHEE. Svaki od navedenih načina ima svoje prednosti, specifičnosti ali možda i određene slabosti. Metoda jednostavnog zbrajanja težina (Simple Additive Weighting Method - SAW) je poznata i široko korištena metoda višeatributnog odlučivanja, gdje se svakom kriteriju (atributu) u toj metodi pridružuje ponder važnosti (težina), dobijen direktno od donosioca odluke ili nekom od metoda za određivanje težina kriterija. Težine svakog kriterija postaju koeficijenti varijabli iz matrice odluke na način da se ukupni skor za svaku pojedinu alternativu dobiva jednostavno množeći podatke iz matrice odluke za svaki atribut s težinom

tog atributa. Zbrajajući te umnoške preko svih atributa dobiva se konačna ocjena svake alternative. Alternativa sa najvećim skorom (najveći ponderirani prosjek) predlaže se donosiocu odluke. Metoda PROMETHEE razvijena je s namjerom da pomogne donosiocu odluke u rješavanju problema višekriterijalnog odlučivanja. Ova metoda vrši poređenje i rangiranje različitih alternativa istovremeno vrednovanih na bazi više kvantitativnih ili kvalitativnih kriterija (atributa).

3.4. Usaglašavanje težina kriterija za poređenje mikrolokacija TEP

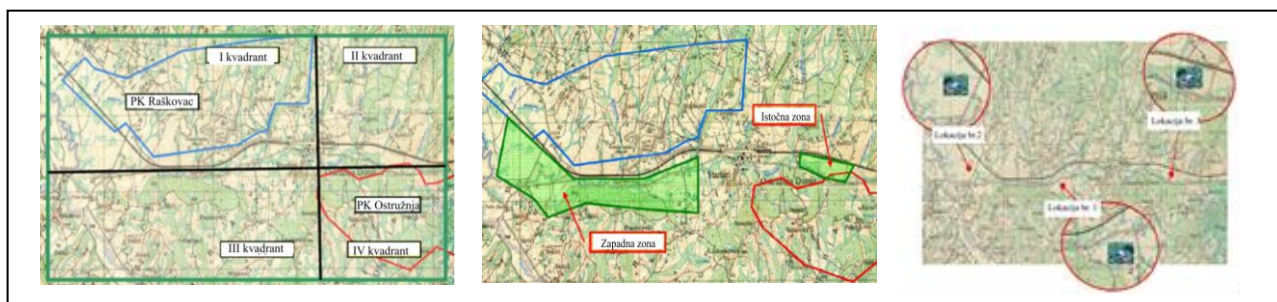
Polazeći od perspektiva i potreba za razvojem TEP nije teško zaključiti da dobro odabrana lokacija predstavlja važnu mjeru sigurnosti, pa je iz tih razloga je veoma bitan segment kod realizacije preinvesticione projektne dokumentacije. Makrolokacija za svaki od kopova uglja iz posmatranog regiona je definisana određenim strateškim dokumentima na nivou republičkog ili lokalnog nivoa. Ponekad su ova rješenja veoma skupa i ne prate trend razvoja novih tehnologija i korišćenja nove opreme u oblasti termoenergetike i energetike u cjelini, pa je neophodno dodatno izvršiti ocjenu varijantnih rješenja prema određenim kriterijumima i uslovima, koji će se primjenjivati u postupku poređenja i izbora odabranih mikrolokacija za realizaciju TEP u okviru unapred odabrane makrolokacije. Ovi kriterijumi, osim svoje različitosti, mogu biti i međusobno suprotstavljene, pa je potrebno za vrednovanje alternativa u višekriterijumskoj analizi raspolagati i metodom kojom bi se omogućila njihova simultana obrada, uz uvažavanje inherentnih mogućnosti svakog tehnološkog pristupa i njihove relativne međusobne važnosti prema kriterijumima. Odgovarajućim izborom tehničkih rješenja nekada je moguće lokacije svesti na približno iste ukupne uticaje na okolinu, pa se one mogu rangirati po obimu ovih rješenja i potrebnim ulaganjima. Međutim, nekada je, zbog zatečenog stanja, nemoguće u posmatrani prostor uklopiti zadati objekat, bez nedozvoljenog nivoa štetnih uticaja. Metode koje se koriste za uspoređivanje i rangiranje alternativa na bazi ulaznih podataka za odlučivanje moraju uzeti u obzir prednosti koje neka alternativa ima u odnosu na ostale i izvršiti poređenje prednosti s njezinim nedostacima. Ukoliko kriteriji imaju različite važnosti, treba uzeti u obzir i njihove težine. Metode koje se mogu upotrebiti u ovoj situaciji zasnivaju se na određenim pretpostavkama koje se matematički karakteriziraju. Zavisno od težine i složenosti datog modela neophodno je poznavati odgovarajuću matematičku teoriju da bi se on riješio. Postupkom za računanje težina kriterija i prioriteta alternativa iz poređenja u parovima računaju se prioriteta alternativa i težine kriterija, čije vrijednosti u najvećoj mjeri zadovoljavaju uslove zadate međusobnim odnosima i čija ukupna suma je jednaka jedinici. U okviru prvog koraka formira se matrica (tablica) odnosa prioriteta (težina). U *i*-tom redu i *j*-toj koloni te matrice nalazi se vrijednost procijenjenog odnosa prioriteta alternativa. Ukoliko se daju procjene relativnih važnosti kriterija, onda je to vrijednost odnosa njihovih težina. Izračunate vrijednosti odgovaraju težinama kriterija, odnosno prioritetima kriterijuma kod ocjene alternativa. Ovaj postupak u slučaju konzistentnih procjena odnosa veličina daje njihove tačne vrijednosti. Kao kontrola, u procjeni vrijednosti odnosa težina kriterija i važnosti alternativa pomaže nam Saaty-eva skala.

Na osnovu sprovedene analize prezentovane u okviru [8], može se zaključiti da se po oba koncepta (težinski i koeficijenti iz Saaty-eve skale) daje prednost za tri kriterija kod vrednovanja potencijalnih lokacija za TEP na ugaj: PK4 – ekonomsko-finansijski uslovi, PK5 - ekološki uslovi i uslovi održivog razvoja i PK3 – sigurnosno-bezbjedonosni pokazatelji (pouzdanost, održavanje i rizik). Rezultat prethodnog izbora je i usvojen kao optimalan i primijenjen u procesu dalje izrade projektnog rješenja TE Stanari instalisane snage 300 MW, slika 3. Za kombinovane parno-gasne elektrane najčešće se koriste sljedeći kriteriji: uslovi životne sredine na licu mjesta, kvaliteta vazduha posebno, trošak proizvodnje električne i toplotne energije, socio-ekonomski problemi, blizina dostupnih dalekovoda, razmatranja transportnog sistema, dostupnost goriva, voda i kanalizacija potrebe, prevoz, dostupnost nekretnine.

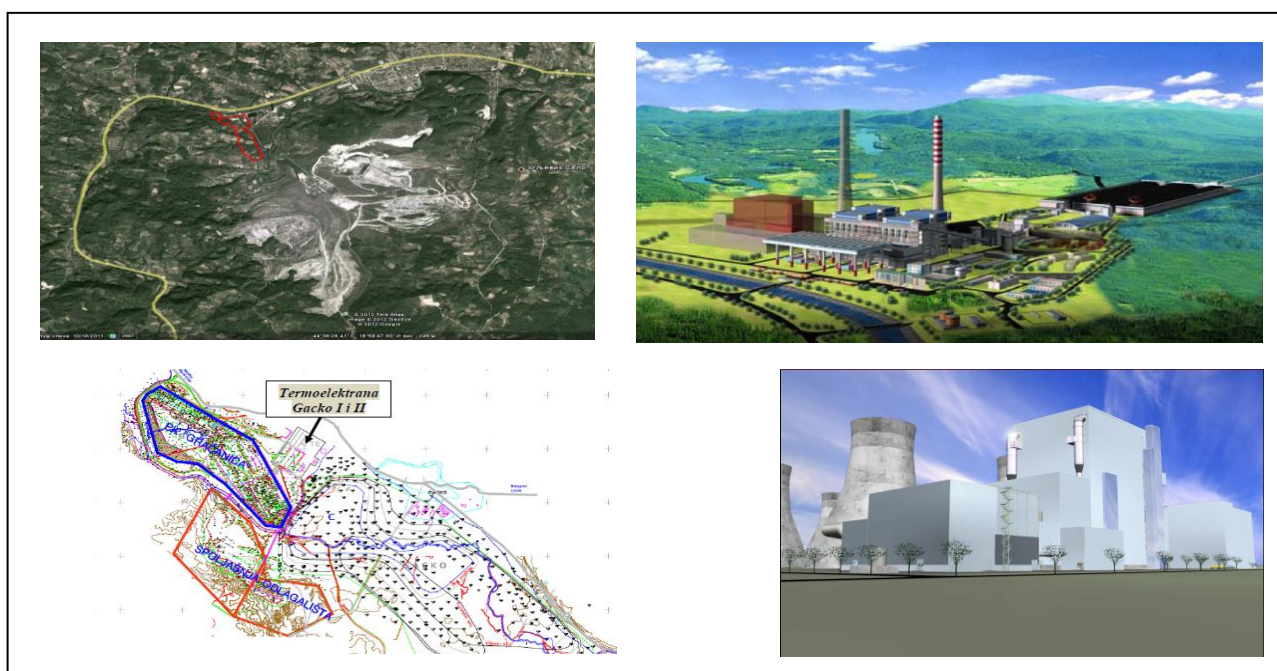
Prema istraživanjima datim u okviru [11], a prema Delphi i AHP metodologiji dobijeni su težinske vrijednosti za sledeća 4 kriterijuma za poređenje: Faktori vezani za prirodu A – 0,232 (geološki parametri – 0,433, voda – 0,048, hidrološki i geološki – 0,520), Tehnički faktori B - 0,083 (dužina infrastrukturne mreže za pristup sistemu (Route Length of the Access System) 0.049, pristup dalekovodnom i mrežnom sistemu (Access Systems Line Voltage) 0.738, stvarna snaga (Actual Power) 0.138, stanje u saobraćaju

(Traffic Conditions) 0.078, Ekonomski faktori C – 0,046 (ukupna sredstva potrebna za finansiranje projekta (The Total Project Funding) 0.125, potreban period za pripremu i izgradnju (Construction Period Interest) 0.067, period povraćaja kapitala (Payback Period) 0.071, ROI 0.612, investicioni količnik (Net Profit Ratio of Capital) 0.125, Sigurnosni parametri vezani za radioaktivnost – 0,639 (osnovni pravni zahtjevi, engl. Basic Legal Requirements 0.632, rezervni planovi, engl. Contingency Plans 0.229, gustina naseljenosti i distribucija oko lokacije, engl. Population Density and Distribution around the Site 0.082, uticaj spoljašnjih događaja na nuklearnu elektranu, engl. The Impact of External Events on the Nuclear Power Plant 0.05).

Prostor planiran za izgradnju novog bloka termoelektrane Ugljevik III obuhvata zemljište površine od 30,14 ha, a nalazi se van urbanog područja naselja Ugljevik. Za datu lokaciju i realizaciju planiranih sadržaja, riješeni su imovinsko-pravni odnosi, odnosno otkup zemljišta koje je bilo u vlasništvu fizičkih lica. Dio parcela čini i zemljište koje predstavlja vlasnički udio ZP RiTE Ugljevik. Za potrebe izgradnje novog bloka termoelektrane Ugljevik 3, na prostoru užeg obuhvata biće zauzeto zemljište za izgradnju stambenog dijela, tj. kampusa za smještaj radnog osoblja koje će biti angažovano na izgradnji predmetnog postrojenja, slika 4.



Sl. 3. Makrolokacija za TE Stanari instalisane snage 300 MW, [1].



Sl. 4. Satelitski snimak i situacioni pregled sa prikazom prostora, predviđenog za blokove TE Ugljevik III i TE Gacko II, [1].

Projektne rješenja eksploatacije uglja u Gatačkom ugljenom basenu treba posmatrati kroz važeća projektne rješenja za PK "Gračanica", sa aspekta razvoja idejnih rješenja za novu TE "Gacko 2". U procesu valorizacije i izbora prihvatljivih potencijalnih mikrolokacija za TE "Gacko 2" primijenjen je sličan postupak kao i za TE Ugljevik 3. S obzirom da je makrolokacija i mikrolokacija novih energetske kapaciteta definisana u dokumentaciji Rudnika i TE Gacko 1, glavni pogonski objekat (GPO) druge faze TE Gacko projektovan je na prostoru koji se naslanja na GPO postojeće TE Gacko 1 u pravcu zapada. Lokacija je optimizirana uzimajući u obzir klimatske, geološke, ekološke, sociološke, tehnološke i druge uticaje na naseljena mjesta Opštine Gacko i u dosadašnjoj eksploataciji Rudnika i TE Gacko 1, pokazala se kao dobro odabrana. Svi pomoćni objekti nalaze se u krugu TE Gacko 1 u blizini GPO. Iz ovih razloga, rezervne varijante lokacije za TE Gacko 2 nisu razmatrane, pa nije bilo potrebne ni za sprovođenje dodatne analize i rangiranja više mikrolokacija u okviru makrolokacije.

4. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj rada bio je analiza mogućnosti i izrade matematičkog modela primjene modifikovane višekriterijumske metode za određivanje prioriteta između pojedinih alternativa realizacije izbora optimalne mikrolokacije u već zadatim okvirima (definisana makrolokacija), u situaciji odlučivanja gde učestvuje veći broj donosilaca odluke različite specijalnosti, uz osiguranje energetske efikasnosti i održivog rješenja. Postupak izbora lokacije TEP, do unošenja preferentnih lokacija u prostorni plan neke zemlje ili npr. entiteta u BiH, sastoji se od dvije faze: faza globalnog vrednovanja državnog/entitetskog teritorija prema eliminacijskim kriterijumima i faze međusobnog poređenja na taj način utvrđenih potencijalnih područja s ciljom dodatnog njihovog vrednovanja i konačnog izbora. Cilj prve faze je utvrditi ona šira područja, koja ispunjavaju zahtjeve svih usvojenih eliminacionih kriterija. Ova potencijalna područja predstavljaju bazu za naredna istraživanja. Područja koja ne ispunjuju zahtjeve barem po jednom od eliminacionih kriterija odbacuju se, a izdvojena potencijalna područja u drugoj fazi postupka se podvrgavaju dodatnom vrednovanju kriterijima za njihovo međusobno poređenje, te detaljnoj komparativnoj analizi primjenom težinskih kriterijuma. Na taj način se unutar širih potencijalnih područja (makrolokacije) izdvajaju manje površine, tzv. potencijalne lokacije ili mikrolokacije (jedične površine 0,5 do 20 km²). Konačno, detaljnim vrednovanjem potencijalnih lokacija se određuju one najoptimalnije ili preferentne lokacije. Ciljevi u okviru povišenja energetske efikasnosti postavljaju se za cjelokupnu potrošnju energije, kao i za svaki sektor. Oni moraju biti SMART, tj. specifični, mjerljivi, ambiciozni, realistični i ostvarivi u određenom vremenu. Na osnovu rezultata analize tržišta definišu se podsticajne mjere i uspostavlja prihvatljiva teorija o načinima na koje će instrumenti politike dovesti do ostvarenja ciljeva, odnosno utvrđuju se načini na koje će upravo određeni instrument dovesti do ekonomski isplativih poboljšanja energetske efikasnosti (pristup poznat kao "ex ante evaluacija"). Kako su metode višekriterijumske analize

zasnovane na značajnom učešću donosioca odluka odnosno projektanta, neophodno je dobro poznavanje problema i učešće više donosioca odluke različitih specijalnosti, kako bi se dobio optimalan redoslijed kriterijuma po kojoj se i bira konačna mikrolokacija za dalju razradu dokumentacije. Nivo razvoja na kome se nalaze metode višekriterijumske analize i dobijeni rezultati primjene modela omogućavaju postizanje dobrih rezultata kod izbora optimalne mikrolokacije za konkretno termoelektrno postrojenje.

5. LITERATURA

- [1] Z. Milovanović, S. Dumonjić-Milovanović, A. Milašinović, D. Knežević, „Primjena višekriterijumskog odlučivanja za izbor mikrolokacije novih termoelektrnih postrojenja (TEP), *Tematski zbornik "Analitički hijerarhijski proces - teorijske osnove i primena u energetici, zaštiti radne i životne sredine i obrazovanju"*, Matematički institut SANU Beograd, 2015.
- [2] Vlada Republike Hrvatske. Zaključak o utvrđivanju kriterija za izbor lokacija za termoelektrane i nuklearne objekte. Narodne novine, broj 78/92, Zagreb, 1992.
- [3] L.R. Bishnoi, P.C. Basu, "Siting of Nuclear Installations", *Nuclear India*, Vol 38, No.7-8, pp. 8-10, 2005.
- [4] *Energy Information Administration Energy Outlook*, DOE/EIA-0383(2009), 2009.
- [5] Update Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants, *Energy Information Administration 12*, 2013.
- [6] Z. Milovanović, F. Begić, M. Samardžić, D. Jeremić, S. Dumonjić-Milovanović, J. Škundrić, „Optimizacija izbora mikrolokacije termoelektrnog postrojenja „Stanari” metodom višekriterijalnog rangiranja“, *Termotehnika*, vol. 37, no. 1, pp. 85-101, 2011.
- [7] Z. Milovanović, F. Begić, M. Samardžić, D. Jeremić, S. Dumonjić-Milovanović, J. Škundrić, „Optimizacija izbora mikrolokacije termoelektrnog postrojenja metodom višekriterijalnog rangiranja - Teorijske osnove“, *Termotehnika*, vol. 37, no. 1, pp. 29-40, 2011.
- [8] G. D. Li, D. Yamaguchi, M. Nagai, „A Grey based Approach to Suppliers Selection Problem“, *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*, vol. 2, 2006.
- [9] T. Ozcan, N. Celebi, S. Esnaf, „Comparative Analysis of Multi-criteria Decision Making Methodologies and Implementation of a Warehouse Location Selection Problem“, *Expert Systems with Applications*, vol. 38, Elsevier, 2011.
- [10] T. L. Saaty, „How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process“, *European Journal of Operational Research*, vol. 48, pp. 9-26, North-Holland, 1990.
- [11] Wu Yun-na, Yi-li Han Narenmandula, „The Study on the Site Selection of Nuclear Power Plants Based on

Optimized Fuzzy Comprehensive Evaluation“, *Communications in Information Science and Management Engineering CISME*, vol. 2, no. 6, pp. 35-38, 2012.

- [12] S. Sener, E. Sener, B. Nas, R. Karaguzel, „Combining AHP with GIS for Landfill Site Selection: A Case Study in the Lake Beysehir Catchment Area (Konya, Turkey)“, *Waste Management*, vol. 30, pp. 2037–2046, 2010.
- [13] W. Guiqin, Q. Li, L. Guoxue, C. Lijun, „Landfill Site Selection Using Spatial Information Technologies and AHP: A Case Study in Beijing, China“, *Journal of Environmental Management*, vol. 90, pp. 2414–2421, 2009.

Abstract – Making decision regarding future TEP location is one of the most important business decisions potential investor is about to make. Inside the process of valorization and selection of acceptable potential micro locations for TEP on previously selected macro location it is of high importance to implement certain method which will be uniform in all the aspects. Inside this paper the algorithm of phase method for coal burning TEP location selection is described. Through fulfillment of the first phase, the

eliminating criteria for selection are being determined. Those criteria are result of legal legislative, of implementation of domestic and global practice, and so of technical and technological demands of specific energetic facility. Therein locations which do not meet any of eliminating criteria are being rejected. The rest of potential locations in wider region are further being evaluated and compared between themselves. Rules for evaluating potential micro locations, which should be previously defined, represent criteria for comparison and are usually given in form of demand for achieving previously defined goal. Since different criteria can collide with each other, a method for their simultaneous processing should also be available. Process of engineering optimization represent systematic seek for optimal solution for the given engineering problem with respect to defined criteria for optimal solution and given limits. The optimum solution must be energy efficient.

**ALGORITHM FOR OPTIMIZATION METHOD OF
NEW THERMOENERGETIC POWER PLANT (TPP)
AND ENERGY EFFICIENCY**

Zdravko N. Milovanovic
Svetlana R. Dumonjić-Milovanovic

ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI RADA TE UGLJEVIK ZA PERIOD 2004-2014. GODINA

Zdravko N. Milovanović, *Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet*, Banja Luka
Momir Samardžić, *RiTE Ugljevik*, Ugljevik

Sadržaj – U radu su teoretski obrađene vremenske, energetske i tehno-ekonomske karakteristike bloka sa načinom definisanja i njihovog izračunavanja. Dobijene definicije i formule su primijenjene na određeni vremenski period proizvodnje električne energije termoelektrane (2004 – 2013. godina). Takođe, izvršena je detaljna analiza veličina i dat tabelarni i dijagramski prikaz posmatranih veličina. Pri tome, ostvarene karakteristike u eksploataciji bloka termoelektrane grupisane su u tri grupe za ocjenu i analizu efekata eksploatacije bloka termoelektrane (vremenske i energetske karakteristike i tehno-ekonomske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka termoelektrane). Na osnovu parametara uporedne analize energetskih karakteristika i veličina u posmatranim vremenskim intervalima data su određena zaključna razmatranja.

1. UVOD

Energetska efikasnost predstavlja odnos između ostvarenog rezultata u proizvodnji električne energije i utrošene primarne energije za njenu proizvodnju (iz energenata i za vlastite potrebe). Na osnovu propisanih metoda računaju se: koeficijenti iskorišćenja vremena i snage, koeficijent energetske korisnosti postrojenja bloka, način i količine proizvedene električne energije, kao i količine upotrebene energije za vlastite potrebe. Pravilno izračunavanje ostvarenih karakteristika bloka omogućuje ocjenu energetske efikasnosti, [1].

Energetsku efikasnost bloka termoelektrane treba da slijede aktivnosti i radnje koje u normalnim okolnostima dovode do provjerljivog i mjerljivog povećanja energetske efikasnosti postrojenja bloka, tehničkih sistema bloka, proizvodnih procesa i uštede primarne energije goriva. Ove aktivnosti se zasnivaju na primjeni energetski efikasne tehnologije, odnosno postupaka kojima se postižu uštede energije i drugi prateći pozitivni efekti, a mogu da uključe odgovarajuća rukovanja, održavanja i podešavanja na bloku termoelektrane. Kao primjer, data je analiza rada TE Ugljevik.

TE Ugljevik je pušten u pogon 1985. godine i u eksploataciji je odradio 151.416 časova zaključno sa 2013. godinom, slika 1. U svom eksploatacionom periodu je imao prekid eksploatacije (april 1992. do novembar 1995.), što je imalo posledično uzročnu problematiku u nastavku eksploatacije. Nepostojanje adekvatne prenosne mreže, nedostatak i neujednačen kvalitet uglja, industrijsko ogledni kotao bloka dovoljno neprilagođen uglju u prethodnoj eksploataciji su uslovlili nešto duži period normalizacije eksploatacije. Podizanje snage bloka na nominalnu vrijednost je bilo neostvarljivo bez dodatnih ulaganja, pogotovo što je kotao bloka i prije prekida eksploatacije bio limitirajući

faktor za ostvarenje nominalnog opterećenja. Uslovi za veće zahvate na kotlu bloka su se stekli tek 2010. godine u kapitalnom remontu gdje je urađena djelimična revitalizacija (zamijenjen zagrijač vode – EKO novim modifikovanim, zamijenjeni gorionici novim, zamijenjen sistem čišćenja ekrana ložišta kotla sa novim modifikovanim sistemom, ugrađena termo vizija plamena ložišnog prostora i dr.). Revitalizacija je dala pozitivne efekte, pri čemu je pored analize energetske efikasnosti postrojenja bloka, data i tehno-ekonomska analiza, kao i mogućnosti povećanja energetske stepena korisnosti postrojenja, odnosno poboljšanja energetskih svojstava bloka i proizvodnje električne i toplotne energije.



Sl. 1. Prikaz TE Ugljevik.

2. KARAKTERISTIČNI PARAMETRI ZA OCJENU ENERGETSKO - EKONOMSKE EFIKASNOSTI RADA TERMoeLEKTRANE

Ostvarene karakteristike u eksploataciji bloka termoelektrane grupisane su prema pripadnosti za ocjene i analizu vremenskih, energetskih i tehno-ekonomskih efekata eksploatacije bloka termoelektrane u tri grupe: vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka termoelektrane, energetske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka termoelektrane i tehno-ekonomske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka, [3,7].

2.1. Vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka termoelektrane

Vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka za posmatrani vremenski period (na nivou godine, polugodišta, mjeseca ili neki drugi period koji se analizira) definisane su sa koeficijentom eksploatacije bloka K_e i koeficijentom zastoja (otkaza) bloka (K_e^I). Koeficijent eksploatacije je jedan od pokazatelja vremenskog iskorišćenja bloka termoelektrane i može da se definiše na dva načina. Prvi način i najčešće korišćen u literaturi je definicija koeficijenta eksploatacije bloka preko količnika vremena eksploatacije tj. rada bloka na mreži (T_e) i kalendarskog

vremena (T_k) za posmatrani period (mjesečni, godišnji i dr.). Za nove blokove faktor eksploatacije na godišnjem nivou je 0,85 do 0,90, dok kod starih blokova se kreće do 0,85. Na ovaj način izračunati koeficijent eksploatacije se koristi u uporednim analizama, pošto je i vrijeme remonata u okviru kalendarskog vremena. Drugi način određivanja koeficijenta eksploatacije na godišnjem nivou je preko količnika između vremena eksploatacije (T_e) i razlike kalendarskog vremena i vremena određenog za godišnji remont ($T_k - T_r$). U većini termoelektrana trajanje remonata nije standardizovano, pa pri uporednim analizama o energetske efikasnosti podaci nisu primjenjivi. Ovaj način računanja se više koristi na lokalnom nivou i pri izradi godišnjih planova za svaku konkretnu termoelektranu. Vrijeme eksploatacije u posmatranom periodu (godišnji, polugodišnji, mjesečni ili neki drugi zadati period za analize) je sastavljeno od svih vremena neprekidnog rada bloka bez otkaza – zastoja ($T_{e,i}$), gdje je $i = 1...n$, a n ukupan broj intervala neprekidnog rada bloka za posmatrani period.

Otkazi na postrojenjima i vitalnoj opremi termoelektrane kao posledica otkaza su uzrok poremećaja tehnološkog procesa i ne stacionarne režima rada bloka. Otkazi na postrojenjima i vitalnoj opremi, koji eksploatacionom osoblju ne daju mogućnost održavanja procesnih parametara prema tehnološkom upustvu i tehničkim propisima eksploatacije i ugrožavaju bezbjedan i siguran rad bloka, uzrokuju zastoje. Neki otkazi iziskuju trenutnu obustavu bloka termoelektrane. To su otkazi koji ugroze bezbjednost postrojenja i osoblja u eksploataciji i održavanju. Zato postoje zaštite i blokade na bloku termoelektrane za trenutna isključenja sa pojavom takvih slučajeva. Otkaze, odnosno zastoje postrojenja i opreme bloka termoelektrane možemo grupisati u tri osnovne grupe, i to: havarijske ili neplanske - trenutno bezbjedno isključenje blok, planske - može se proizvesti rad za neko izvesno vrijeme do ugrožavanja tehničkih propisa eksploatacije i bezbjednosti i sigurnosti postrojenja i okoline i planske remontne zastoje bloka za godišnji remont. Neplanski otkazi nastaju kao posljedica otkaza pri radu bloka koji su izazvani abrazijom materijala, starenjem i gubljenjem funkcionalnih osobina, toplotnim preopterećenjem, nepravilnom eksploatacijom i greškom pri održavanju, nepridržavanja tehničkih uputstava i propisa, neadekvatnih remonata, pohabanost, pogoršan kvalitet osnovnog goriva i sl. Kako su blokovi termoelektrana kompleksna cjelina i sastavljeni od velikog broja zavisnih tehnoloških cjelina i kompleksnih postrojenja, to su i mogućnosti za neplanske otkaze veće, a naročito za blokove starije izvedbe. Planski otkazi obuhvataju godišnje remonte i planirane radnje koje se pojave u toku eksploatacije sa ciljem povećanja energetske efikasnosti. Analize efikasnosti i kvaliteta preventivnih mjera eksploatacije i održavanja se vrši i preko koeficijenta otkaza termoelektrane. Koeficijent otkaza prema grupisanju otkaza je sastavljen od: koeficijenta neplanskih otkaza (K_{no}), koeficijenta planskih obustava (K_{po}), koeficijenta godišnjeg remonta (K_r) i koeficijenta potiskivanja (K_p). Otkazi mogu nastati i zbog nemogućnosti prenosne mreže da preuzme proizvedenu električnu energiju zbog pojave neplanskih viškova proizvodnje u elektroenergetskom sistemu u odnosu na potrošače. Ovu pojavu prouzrokuje najčešće rad hidroelektrana energetskeg sistema (povoljna hidrologija i znatno jeftinija proizvodnja električne energije u odnosu na

proizvodnju u TE). Ovi slučajevi se definišu pomoću koeficijenta potiskivanja. Koeficijent otkaza se računa po formuli :

$$K_{ot} = K_{no} + K_{po} + K_r + K_{pot} \quad (1)$$

Vrijednost ovog koeficijenta je u dijapazonu 0,02 do 0,10 računato na godišnjem nivou. Niže vrijednosti su za nove blokove, a više za stare blokove.

Planske obustave su uvedene kao preventivne mjere u cilju postizanja veće pogonske spremnosti i smanjenja rizika te sprečavanja neplanskih otkaza u radu blokova termoelektrana. Važna je veličina pri planiranju investicija kod starih blokova ili razrješenju problematičnih slučajeva u eksploataciji koji ne ugrožavaju bezbjedan rad, a potrebno ih je anulirati u nekom vremenskom razdoblju. Za planiranje rada starih blokova na prenosnoj mreži elektroenergetskog sistema koji su pri kraju radnog vijeka koristi se koeficijent planske obustave, čija vrijednost se definiše na bazi iskustvenih podataka pri praćenju eksploatacionih podataka termoelektrane ili sličnih termoelektrana u okruženju. Definiše se kao količnik vremenskog trajanja planskog zastoja i kalendarskog vremena za posmatrani vremenski interval. Faktički to je vremenski period za koji je otklonjen planirani nedostatak zbog koga je blok u stanju u otkazu ili izvršena planirana investicija na bloku termoelektrane. Najčešće se određuje na nivou godine i rijetko se primjenjuje u planiranju. Koristi se u posebnim slučajevima kod blokova starijih izvedbi i većih investicionih ulaganja, a pri kraju radnog vijeka termoelektrane.

Koeficijent remonta definiše tekuće i kapitalne godišnje remonte. Definiše se kao količnik vremena trajanja remonta i kalendarskog vremena na nivou godine. Koeficijent remonta se određuje na nivou godine i ima različite vrijednosti (zavisno da li su blokovi termoelektrane starijih izvedbi, većih snaga i obima planiranih radova u remontu, tj. da li su u pitanju tekući ili kapitalni godišnji remont). Vrijednosti ovog faktora za starije blokove se kreće od 0,08 do 0,16. Više vrijednosti se odnose na kapitalne a niže na tekuće remonte.

U toku eksploatacije blokova termoelektrane se pojavljuju slučajevi gdje količine proizvedene električne energije nisu pokriveno potrošnjom, odnosno kada se u mreži elektroenergetskog sistema (EES) zbog smanjene potrošnje ili iz nekih opravdanih razloga su povećane proizvodnje pojedinih proizvodnih komponenti u okviru EES. U tim slučajevima dispečerska služba mora da održava sistem u ravnoteži i isključuje pojedine blokove iz pogona, odnosno najčešće vrši potiskivanje bloka termoelektrane sa mreže. Ove pojave se najčešće javljaju kada su dotoci vode u hidroelektranama nekontrolisano veliki ili u slučajevima kada se neplanski smanji potrošnja odnosno nema poznatog kupca električne energije (u slučaju izvoza električne energije). Ovi slučajevi su rijetki, ali se susreću u praksi. Ove pojave se definišu preko koeficijenta potiskivanja i nisu planske veličine. Koeficijent potiskivanja se definiše kao količnik vremena trajanja potiskivanja i kalendarskog vremena.

Energetske karakteristike bloka daju ocjenu proizvodne sposobnosti bloka i utrošenoj energiji za vlastite potrebe. Energetske karakteristike bloka se daju u vidu određenih parametara (koeficijent iskorišćenja snage bloka, koeficijent iskorišćenja kapaciteta bloka, koeficijent vlastite potrošnje bloka termoelektrane i koeficijent korisnog dejstva

termoelektrane). Koeficijent iskorišćenja snage bloka se definiše kao količnik ostvarene snage i nominalne (proračunske) snage. Koeficijent iskorišćenja snage bloka je najčešće u dijapazonu od 0,97 do 1,00. Proizvodni kapaciteti bloka termoelektrane se mogu analizirati preko koeficijenta iskorišćenja kapaciteta bloka. Ovaj koeficijent se određuje na osnovu proizvedene električne energije, a definiše se kao količnik između ostvarene količine proizvedene električne energije i maksimalno teoretski moguće količine proizvedene električne energije pri 10%-tnom iskorišćenim kapacitetima postrojenja bloka termoelektrane. Koeficijent vlastite potrošnje bloka termoelektrane definiše vlastite potrebe postrojenja bloka za električnom energijom.

Koeficijent korisnog dejstva termoelektrane definiše odnos između proizvedene električne energije termoelektrane i ukupno uložene toplotne energije goriva. U termoelektrani, pri odvijanju tehnološkog procesa proizvodnje električne energije u svim dijelovima transformacije jednog vida energije u drugi, dolazi do nepovratnih gubitaka energije. Ove gubitke objedinjuje i definiše koeficijent korisnog dejstva termoelektrane - η_{TE} . koeficijent korisnog dejstva termoelektrane po proizvedenoj električnoj energiji (bruto) može se definisati i kao proizvod nekoliko koeficijenata korisnog dejstva pojedinih dijelova tehnološkog procesa, i to:

$$\eta_{TE}^B = \eta_{kor}^B \cdot \eta_{tg}^B \cdot \eta_c, \quad (2)$$

gdje su:

η_{kor}^B - koeficijent korisnog dejstva kotlovske postrojenja (bruto);

η_{tg}^B - apsolutni električni koeficijent korisnog dejstva turbogeneratora (bruto);

η_{kor}^B - koeficijent korisnog dejstva cjevovoda (parovoda).

Koeficijent korisnog dejstva termoelektrane se može odrediti i direktnom metodom preko proizvedene električne energije i uložene toplotne energije iz goriva. Može biti bruto i neto, a definišu se:

- *bruto* (η_{TE}^B) - kao odnos ukupno proizvedene električne energije na stezaljkama generatora termoelektrane prema ukupno uloženoj količini toplotne energije iz goriva, i
- *neto* (η_{TE}^P) - kao odnos proizvedene električne energije koja se preda u prenosnu mrežu elektroenergetskog sistema (proizvodnja na pragu) prema ukupno uloženoj toplotnoj energiji iz goriva.

2.2. Tehničko-ekonomski pokazatelji u eksploataciji bloka termoelektrane

Tehničko ekonomski pokazatelji obuhvataju: količine proizvedene električne energije na generatoru i predate na mrežu elektroenergetskog sistema (generator - prag termoelektrane), količine uložene toplotne energije iz energenata za proizvedenu električnu energiju, eksploatacioni period aktivnog rada bloka uzimajući u obzir i toplu rezervu ukoliko je potisnut sa mreže, specifična potrošnja osnovnog i potpalnog goriva bruto i neto, specifična potrošnja toplotne energije iz osnovnog goriva, specifična potrošnja dekarbonizovane i demineralizovane vode, kao i brojno učešće radne snage po proizvedenom kWh-tu električne energije (ovo obuhvata eksploatacioni personal i personal održavanja). Eksploataciono vrijeme je definisano u vremenskim karakteristikama, kao i vrijeme potiskivanja sa mreže. Gubici toplotne i električne energije za vlastite

potrebe su prikazani kroz odgovarajuće koeficijente u energetske karakteristika. Dio vremenskih i energetske karakteristika bi se takođe mogli uvrstiti u tehničko-ekonomske pokazatelje, jer je nemoguće izvršiti preciznu podjelu. Kao energenti za proizvodnju električne energije koriste se goriva, od kojih su najčešći uglj (mrki i ligniti), mazut i gas. U termoelektranama se najčešće kao osnovno gorivo koristi uglj, a kao potpalno gorivo i gorivo za podršku vatre u kotlovima pri nestacionarnim režimima mazut ili gas. Gorivo u kotlovskom postrojenju sagorijeva i njegova hemijska energija pri procesu sagorijevanja se transformiše u toplotnu energiju koja se predaje radnom fluidu uz nastajanje produkata sagorijevanja (dimni gasovi, leteći pepeo i šljaka). Radni fluid u procesu proizvodnje električne energije je demineralizovana voda, čijom transformacijom faza, uz primljenu toplotnu energiju iz goriva u kotlovskom postrojenju, prelazi u pregrijanu paru, a u turbinskom postrojenju izvrši rad, koji dalje u generatoru proizvodi električnu energiju. Demineralizovana (demi) voda je krajnji proizvod prerade sirove vode u hemiskoj pripremi vode, a kao međufaza je dekarbonizovana (deka) voda, čija je potrošnja u značajnim količinama u zatvorenom termodinamičkom ciklusu bloka, pri proizvodnji električne energije termoelektrane. Električna energija, kao krajnji proizvod se dalje, preko sabirnica, blok transformatora, prenosne i distributivne mreže, doprema do potrošača. Za praćenje, analizu i optimalno vođenje proizvodnog ciklusa termoelektrane ostvarene specifične potrošnje potrebno je održavati u granicama, koje su propisane i normativnim ispitivanjima dokazane. Specifične potrošnje se mogu posmatrati sa aspekta proizvodnje električne energije na stezaljkama generatoru (bruto vrijednost) i sa aspekta predate električne energije u prenosnu mrežu (neto vrijednost). Specifične potrošnje se u proizvodnom ciklusu TE mogu dati kao specifična potrošnja osnovnog goriva bloka (bruto i neto), specifična potrošnja toplote bloka (bruto i neto), specifična potrošnja toplote goriva bloka (bruto i neto), specifična potrošnja potpalnog goriva (mazuta ili gasa), specifična potrošnja toplote potpalnog goriva, specifična potrošnja dekarbonizovane (deka) vode i specifična potrošnja demineralizovane (demi) vode. Na osnovu specifičnih utrošaka se vrši ocjena ekonomičnosti rada bloka termoelektrane.

Specifična potrošnja osnovnog goriva bloka (bruto i neto) definiše se kao odnos ukupno utrošene količine goriva za proizvedenu električnu energiju i proizvedene električne energije na stezaljkama generatoru bloka. Prema potrebama može se računati dnevna, mjesečna i godišnja specifična potrošnja goriva bloka. Više se koristi kod termoelektrana koje imaju lokalne rudnike i gdje ne postoje kvalitetne tehničke i hemijske analize uglja za procjenu kvaliteta uglja.

Specifična potrošnja toplote bloka (bruto i neto) daje zavisnost potrošene toplotne energije pri ostvarenim parametrima u eksploataciji bloka i ostvarenim pogonskim uslovima i režimima rada. Daje ocjenu o vođenju eksploatacije za posmatrano vrijeme sa stanovišta ekonomičnosti i iskorišćenja toplotne energije, a pri transformacijama toplotne energije u električnu energiju. U opštem slučaju, postoji funkcionalna zavisnost između uložene toplotne energije goriva i proizvedene električne energije bloka termoelektrane, što energetske karakteristike te

dvije veličine povezuju. Ova funkcionalna zavisnost se iskazuje u formi $Q = f(E)$ ili $E = f(Q)$, gdje je sa E data proizvedena električna energija, odnosno sa Q data utrošena toplotna energija. Ova zavisnost je jednoznačno određena tehničko-izvedenim karakteristikama i definisana je režimima eksploatacije bloka termoelektrane. Međutim, na odstupanje od jednoznačne zavisnosti proizvedene električne energije i utrošene toplotne energije ima uticaj veliki broj faktora eksploatacije (parametri svježe pare, parametri među pregrijane pare, ostvarena šema tokova unutar termodinamičkog ciklusa, stanje hladnog dijela turbine - izlazni stepeni turbine niskog pritiska sa kondenzatorom, a koji zavisi od količine rashladne vode, temperature rashladne vode, čistoće kondenzatora i prodora vazduha). Specifična potrošnja toplote bloka obzirom na snagu na stezaljkama generatora (bruto), odnosno na snagu na pragu bloka (neto), može se izraziti u toploti radnog medija, koja je prihvaćena u kotlu, kao i toplotu utrošenog goriva određenom donjom toplotnom moći goriva. Prva nam omogućuje da se, na osnovu poređenja sa odgovarajućom specifičnom potrošnjom toplote u turbinskom ciklusu, utvrdi uticaj gubitka toplote radnog medija od kotla do turbine, kao i uticaj vlastite potrošnje toplote.

Specifična potrošnja toplote goriva (bruto i neto) služi nam kao osnova za upoređivanje sa normativnom specifičnom potrošnjom toplote goriva. Ona obuhvata cjelokupnu transformaciju energije u bloku, počev od goriva do proizvedene električne energije. U direktnoj je sprezi sa specifičnom potrošnjom toplote energije iz osnovnog goriva. Danas, ova veličina se sve više koristi za uporedne analize i ocjenu efikasnosti termoelektrana. Za njeno računanje od posebne važnosti je kvalitetno određena donja toplotna moć osnovnog (primarnog) goriva. Termoelektrane koje nemaju svoje rudnike, osnovno gorivo nabavljaju kupovinom na tržištu i plaćaju po toplotnim jedinicama. Ovaj koeficijent je u direktnoj sprezi sa specifičnom potrošnjom goriva. Specifična potrošnja goriva za kretanje i potpalu može da se prikaže preko mase (g_{PG}) i preko toplote energije utrošene iz goriva za kretanje i potpalu (q_{PG}). Definiše se kao odnos ukupno potrošenog goriva za potpalu i kretanje preko mase ili preko toplote energije i proizvedene električne energije. Može da se prikazuje u odnosu na proizvedenu električnu energiju (bruto) i na isporučenu električnu energiju u prenosni sistem (neto). I ova specifična potrošnja se izračunava za određeni vremenski period (dnevni, mjesečni, godišnji). Specifična potrošnja deka i demi vode može da se prikaže preko zapremnske potrošnje (v_{DK} , v_{DM}) i preko mase (m_{DK}^I i m_{DM}^I). Definiše se kao odnos ukupno potrošene deka ili demi vode i proizvedene električne energije (bruto) ili isporučene električne energije u prenosni sistem (neto) za posmatrani vremenski period (dnevni, mjesečni, godišnji). Brojno učešće radne snage po proizvedenom kWh električne energije obuhvata personal eksploatacije i održavanja termoelektrane.

3. REZULTATI I ANALIZA EKSPLOATACIJE TE UGLJEVIK U PERIODU 2004. DO 2014. GODINA

3.1. Tehničke karakteristike TE Ugljjevik

Za uporednu analizu i ocjenu ostvarenih karakteristika korištene su tehničko – projektne karakteristike koje su date u Tabeli 1.

Tabela 1: Pregled tehničkih projektnih karakteristika TE Ugljjevik instalisane snage 300 MW, [1, 6].

Parametar	Jedinica mjere	Vrijednost / karakteristika
Nominalna snaga bloka TE	MW	300
Snaga na pragu TE	MW	279
Tehnički minimum	MW	180
Napon prenosne mreže	kV	400
Koeficijent vlastite potrošnje	-	0,07
Koeficijent iskorišćenja snage bloka	-	1,0
Koeficijent eksploatacije	-	0,8
Koeficijent iskorišćenja kapaciteta bloka	-	0,8
	-	0,8
Koeficijent korisnog dejstva TE	Bruto, -	0,339
	Neto, -	0,320
Osnovno gorivo	-	Mrki ugalj
Gorivo za podršku vatre i potpalu	-	Mazut
Donja toplotna moć osnovnog goriva	kJ/kg	10.495,00
	-	-
Specifična potrošnja toplote energije	Bruto, kJ/KWh	10.558,00
	Neto, kJ/KWh	11.250,00

3.2. Vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji

Ove karakteristike prikazuju stabilnost eksploatacije, iskorišćeno kalendarsko vrijeme za rad bloka, turbulencije u eksploataciji zbog neplanskih obustava odnosno pojave otkaza, kao i trajanje remonata i ostalih planskih otkaza u eksploataciji. Normativi za vremenske karakteristike blokova od 300 MW i većih snaga su:

- za koeficijent eksploatacije (godina kapitalnog remonta - $K_e = 0,75$; godina srednjeg remonta - $K_e = 0,80$ i godina tekućeg remonta - $K_e = 0,825$);
- za koeficijent remonta (kapitalni remont - $K_r = 0,200$; srednji remont - $K_r = 0,150$ i tekući remont - $K_r = 0,125$).

Pregled izračunatih ostvarenih vremenskih karakteristika je prikazan u Tabeli 2. Analizom ove tabele može se zaključiti da se je koeficijent eksploatacije po godinama posmatranog eksploatacionog vremenskog perioda mijenjao od 0,458 iz 2005. godine (minimalna vrijednost) do 0,8463 (2012. godine, maksimalna vrijednost). U toku 2005. godine je, pored ostvarenog minimalnog koeficijenta eksploatacije, ostvaren i maksimalan koeficijent otkaza. Slično, tokom 2012. godine, uz maksimalan koeficijent eksploatacije ostvaren je i minimalan koeficijent otkaza. Zbir ovih koeficijenata je uvijek jednak jedinici. S obzirom da je 2005. godina posebno karakteristična tokom eksploatacije TE Ugljjevik za razmatrani period, treba istaći sljedeće:

- ostvarene su izuzetno loše vremenske karakteristike;
- izvršen je kapitalni remont i ostvaren koeficijent remonta - $K_r=0,225$, koji je u odnosu na normativnu vrijednost veći za 9,76 %, što dalje govori o produženom remontu za 175 časova;
- neplanskih otkaza je bilo 24, uz ostvaren koeficijent - $K_{no}=0,122$, zbog čega blok termoelektrane nije radio 1069 časova;
- tok eksploatacije u 2005. godini pratilo je zatrpavanje konvektivnih ogrijevniha štati letećim pepelom, uz začepljenja svijetlih otvora za prolaz dimnih gasova zbog starog ekonomajzera, kao i planskih zastoja za čišćenje. pri čemu je ostvaren koeficijent - $K_{po} = 0,135$ (u normalnim uslovima eksploatacije nije slučaj da se

planiraju zastoji), a zbog ovih događaja blok termoelektrane nije radio 1182 časa;

- zbog viška električne energije na tržištu bilo je potiskivanja TE sa mreže, pri čemu je ostvareni koeficijent – $K_{pot} = 0,038$, zbog čega je blok bio u stanju tople rezerve 33 časa;
- ostvaren je koeficijent eksploatacije od 0,458, što je 61,5 % od normativne vrijednosti (najlošiji rezultat u posmatranom vremenskom periodu), što je za rezultat imalo rad bloka na mreži od samo 4012 časova na godišnjem nivou.

Najpovoljnije vremenske karakteristike su ostvarene 2012. godine, sa sljedećim karakteristikama:

- izvršen tekući remont i ostvaren koeficijent remonta – $K_r=0,101$, što je u odnosu na normativnu vrijednost manje za 19,2 %, što govori o skraćenom tekućem remontu u odnosu na normativ od oko 207 časova;
- ostvaren koeficijent neplanskih otkaza – $K_{no}=0,0421$, zbog čega blok nije radio 370 časova (neplanskih otkaza je bilo 13, što je ispod svih ostvarenih vrijednosti u dosadašnjoj eksploataciji termoelektrane;
- planski otkazi svedeni na minimalne vrijednosti iznose – $K_{po} = 0,0106$ i pokazuje da su zaprljanja konvektivnih šahti kotla svedena u minimalne okvire i da je zamjena

ekonomajzera kotla novim dala pozitivne rezultate (na otklanjanje planskih otkaze je utrošeno oko 93 časa);

- potiskivanja sa mreže nije bilo, što pokazuje da viška energije na tržištu takode nije bilo.;
- Da je ostvaren maksimalan koeficijent eksploatacije $K_e = 0,8463$, što je za 2,58 % veće od normativne vrijednosti za tekuće remonte i pokazuje da je blok bio u radu oko 7.434 časova, što takode predstavlja rekord u eksploataciji bloka TE Ugljevik;
- Ukoliko se odbije vrijeme skraćenog remonta (što ne treba praktikovati) i dalje je koeficijent eksploatacije veći od normativne vrijednosti za 0,275 %, što daje predstavu o stabilnoj i dugotrajnoj proizvodnji električne energije.

Analizirajući vremenske karakteristike za posmatrane godine eksploatacije može se konstatovati da je zamjena ekonomajzera u remontu 2010. godine dala pozitivne rezultate za sve vremenske karakteristike. Tako, naprimjer koeficijent eksploatacije u periodu do 2010. godine je od 6 do 10 % manji od normativne vrijednosti, a u periodu 2011. Do 2013. godine veći za 0,2 do 2,6 % , što izraženo preko časova rada je manje za oko 434 do 728 (period 2005. do 2010. godine) ili za 12 do 160 časova više (period 2011. do 2013. godine).

Tabela 2: Pregled vremenskih karakteristika bloka TE Ugljevik – srednje vrijednosti na godišnjem nivou, [2].

Godina eksploatacije	Koeficijent eksploatacije	Koeficijent neplanskih otkaza	Koeficijent planskih otkaza	Koeficijent remonta	Koeficijent potiskivanja	Koeficijent otkaza - zastoja	Broj zastoja otkaza
	K_e	K_{no}	K_{po}	K_r	K_p	K_o	n
2004	0,575	0,178	0,015	0,087	0,145	0,425	23
2005	0,458	0,122	0,113	0,225	0,038	0,542	24
2006	0,737	0,166	0,013	0,106	0,023	0,263	27
2007	0,767	0,055	0,079	0,128	0,001	0,233	22
2008	0,753	0,04	0,063	0,123	0,007	0,247	16
2009	0,7725	0,054	0,042	0,112	0,0195	0,2275	24
2010	0,6478	0,0616	0	0,2776	0,013	0,3522	16
2011	0,8264	0,0601	0,0361	0,0774	0	0,1736	21
2012	0,8463	0,0421	0,0106	0,101	0	0,1537	13
2013	0,7554	0,0529	0,0222	0,1695	0	0,2446	17
Ukupno:	0,71166	0,08364	0,03932	0,14066	0,02472	0,28834	203

Vremenske karakteristike za analizirane vremenske periode na nivou godine su u dozvoljenim granicama, a njihove vrijednosti su zavisile od uslova eksploatacije, kvaliteta goriva i poremećaja u eksploataciji, te dužine trajanja remonata, obima pojave otkaza (kvarova) i brzine otklanjanja nedostataka u toku trajanja zastoja. Ako se pri analizi vremenske karakteristike po godinama eksploatacije posmatranog vremenskog perioda uporede sa ostvarenim srednjim vrijednostima cjelokupnog dosadašnjeg efektivnog rada bloka termoelektrane, može se konstatovati da je:

- a) ostvareno vrijeme eksploatacije za analizirani period u odnosu na ukupno vrijeme eksploatacije od prve sinhronizacije iznosi 41,19 %, dok je odnos kalendarskih vremena samo 24,12 %;

- b) ostvareni koeficijent eksploatacije u analiziranom periodu veći za 0,0662 ili za 10,26 % u odnosu na cjelokupni efektivni rad termoelektrane;

- c) blok termoelektrane je od prve sinhronizacije i zaključno sa 2013. godinom odradio 151.416,00 efektivnih časova rada, što predstavlja 75,7 % radnog vijeka ove vrste blokova termoelektrana.

Za blokove ove snage i izvedbe normativ radnog vijeka, uz ekonomsku opravdanost ulaganja, zadovoljenja ekoloških normi i dobro izvršenje tekućih održavanja, tekućih, srednjih i kapitalnih remonata iznosi 200.000,00 efektivnih časova rada. Radni vijek se može produžiti do 250.000 efektivnih časova rada ako se na vrijeme planiraju i izvrše revitalizacija uređaja, postrojenja i dijelova bloka, uz ekonomsku opravdanost i zadovoljenje ekoloških normi. Pod dobrim izvršenjem navednih radnji tekućih, srednjih i kapitalnih

remonata se podrazumijeva: da su remontu dobro isplanirani, zamijenjeni dotrajali dijelovi i sklopovi postrojenja, da se ne skraćuje vrijeme trajanja remonata na štetu kvaliteta ili smanjenja obima planiranih zamjena dijelova i radova, da se redovno vrše kontrole materijala vitalnih dijelova i postrojenja bloka i preventivno djeluje, kao i da je dobro preventivno održavanje, uz vođenje historijata događaja i ponašanja postrojenja, dijelova i sklopova postrojenja te njihovog radnog vijeka. Ostvarene vremenske karakteristike za analizirani vremenski period su relativno dobre, ako se ima u vidu da su bila dva kapitalna remonta i jedan srednji. Takođe se može konstatovati da je bilo i skraćivanja remonata (što nije dobro, pošto se kasnije događaju neplanirani otkazi). Broj otkaza, zbog kojih je blok termoelektrane bio izvan pogona u analiziranom vremenskom periodu je 203, što je 39,26 % od ukupnog broja otkaza od prve sinhronizacije termoelektrane. Analize govore da broj zastoja i njihovo trajanje ima trend smanjenja, odnosno ukazuje na poboljšanje rada bloka TE u cjelini za razmatrani period.

3.3. Energetske karakteristike ostvarene u eksploataciji

Srednje vrijednosti energetske karakteristika za posmatrani period su date u Tabeli 3. Kao osnovne energetske karakteristike za analizu i ocjenu kvaliteta proizvodnje električne energije bloka termoelektrane koriste se koeficijent iskorištenja snage bloka, koeficijent iskorištenja kapaciteta bloka, koeficijent vlastite potrošnje bloka i ukupni koeficijent iskorištenja termoelektrane. Analizirani rad bloka u posmatranom vremenskom proizvodnom periodu prema postignutim energetske karakteristikama može se grupisati u tri dijela i to:

- prvi dio - godine 2004., 2005. i 2006.;
- drugi dio - godine 2007., 2008., 2009. i 2010., i
- treći dio - godine 2011., 2012. i 2013.

U prvom dijelu nivo srednje ostvarenih koeficijenata iskorištenja snage na godišnjem nivou je najmanji, a koeficijenta vlastite potrošnje najviši. Ostvarena srednja

snaga na generatoru je od 225 do 237 MW. Ostvarene srednje vrijednosti koeficijenta vlastite potrošnje su od 9,21 do 9,51 %. Ostupanja od nominalnih vrijednosti su preko 25 %. Ostvarene vrijednosti karakteristika daju sliku lošijeg perioda eksploatacije i slabije energetske efikasnosti bloka termoelektrane. Ovu konstataciju potvrđuje i ostvareni koeficijent iskorištenja kapaciteta do 0,565 (manji od 60 %). U drugom dijelu posmatranog vremenskog proizvodnog perioda se nivo ostvarenih karakteristika iskorištenja snage povećao do 0,835 (2010. godina), a koeficijent vlastite potrošnje smanjio na vrijednosti do 7,52 % (2010. godina). Ostvarene vrijednosti koeficijenta iskorištenja snage su povećane za oko 5,5 %, a koeficijent vlastite potrošnje je smanjen drastično čak i do 16 %. Koeficijent iskorištenja kapaciteta je dostigao nivo vrijednosti do 0,642, što je u odnosu na prvi dio za 12 % veći i govori o povećanju energetske efikasnosti. Postignuti ostvareni nivo snage u ovom dijelu proizvodnog perioda je oko 250 MW. Zamjena zagrijača vode u kotlu bloka izvršena je u kapitalnom remontu iz 2010. godinr, zbog čega je ostvaren koeficijent remonta 0,26, a koeficijent iskorištenja kapaciteta 0,542. U trećem dijelu posmatranog vremenskog proizvodnog perioda ostvarene su srednje vrijednosti energetske karakteristika iskorištenja snage od 0,885 do 0,9145. To je za 5 do 8 % viši nivo u odnosu na drugi dio vremenskog proizvodnog perioda rada termoelektrane. Koeficijent vlastite potrošnje je dostigao nivo 7,18 %, što je 2,6 % veći od nominalne vrijednosti 7%. Snaga na generatoru je povećana na nivo oko 270 MW. Maksimalno ostvarene vrijednosti koeficijenta iskorištenja kapaciteta je 0,755 ili 75,5 %. Ostvarene vrijednosti energetske karakteristika u 2011. godini bile su najpovoljnije u odnosu na sve ostale godine eksploatacije bloka termoelektrane. Ukupni koeficijent iskorištenja bloka termoelektrane je niži od normativne vrijednosti za oko 3 % u prosjeku, Tabela 3.

Tabela 3: Pregled energetske karakteristika bloka TE Ugljevik– srednje vrijednosti na godišnjem nivou, [4, 5].

Godina eksploatacije	Koeficijent iskorištenja snage	Koeficijent vlastite potrošnje	Koeficijent iskorištenja kapaciteta	Koeficijent korisnog dejstva TE - bruto	Koeficijent korisnog dejstva TE - neto
	K_N	K_{vp}	K_{ik}	η_{te-bru}	$\eta_{te-netu}$
2004	0,747	0,0928	0,429	0,3336	0,3026
2005	0,790	0,0944	0,362	0,3374	0,3056
2006	0,767	0,0951	0,565	0,3360	0,3040
2007	0,817	0,0898	0,626	0,3399	0,3096
2008	0,823	0,0783	0,620	0,3409	0,3105
2009	0,832	0,0759	0,642	0,3405	0,3138
2010	0,837	0,0752	0,542	0,3409	0,3152
2011	0,913	0,0718	0,755	0,3415	0,3170
2012	0,890	0,0735	0,753	0,3429	0,3177
2013	0,881	0,0759	0,677	0,3285	0,3035
Ukupni:	0,835	0,0822	0,594	0,3384	0,3106
Normativ:	1.000	0,0700	0,75/0,80/0,825	0,3400	0,3200

3.4. Tehničko-ekonomske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka TE Ugljevik

Ostvarene tehničko ekonomske karakteristike u eksploataciji bloka TE su predstavljene u Tabelama 4, 5 i 6. Kao tehničko-ekonomske karakteristike bloka za analizu ekonomičnosti rada su uzete specifične potrošnje osnovnog i potpalinog goriva (maseni i toplotni udjeli), specifične potrošnje vode (kako sirove tako i obrađene) za potrebe napajanja kotla i opsluživanje bloka termoelektrane.

Ostvarena srednja specifična potrošnja osnovnog goriva – uglja je bruto od 1 kg/kW_eh (2004. godina) do 1,076 kg/kW_eh (2013. godina), a neto je od 1,13 kg/kW_eh (2004. godina) do 1,164 kg/kW_eh (2013. godina). Ostvarena srednja specifična potrošnja potpalinog goriva – mazuta je bruto od 0,00068 kg/kW_eh (2012. godina) do 0,00315 kg/kW_eh (2005. godina), a neto je od 0,00073 kg/kW_eh (2012. godina) do 0,00348 kg/kW_eh (2005. godina), Tabela 4.

Tabela 4: Pregled ostvarenih specifičnih utrošaka goriva bloka – srednje vrijednosti na godišnjem nivou, [4, 5].

Godina eksploatacije	Specifična potrošnja uglja - bruto	Specifična potrošnja uglja - neto	Specifična potrošnja mazuta - bruto	Specifična potrošnja mazuta - neto	Donja toplotna moć trošenog uglja
	g_{og} , kg/kWeh	g_{og} , kg/kWeh	g_{pg} , kg/kWeh	g_{pg} , kg/kWeh	H_d , kJ/kg
2004	1,0000	1,1000	0,00250	0,00276	10.690
2005	1,0242	1,1309	0,00315	0,00348	10.291
2006	1,0211	1,1285	0,00216	0,00239	10.407
2007	1,0432	1,1310	0,00156	0,00169	10.091
2008	1,0242	1,1110	0,00103	0,00112	10.269
2009	1,0455	1,1315	0,00157	0,00170	10.050
2010	1,0372	1,1220	0,00152	0,00165	10.120
2011	1,0718	1,1545	0,00142	0,00153	9.781
2012	1,0312	1,1129	0,00068	0,00073	10.154
2013	1,0756	1,1640	0,00142	0,00154	10.136
Ukupno:	1,0403	1,1335	0,00158	0,00173	10.163
Proračunski:	1,009	1,0719	0,0015	0,0017	10.495

Za analizirani vremenski period proizvodnje električne energije od deset godina ostvarena je srednja specifična potrošnja uglja – bruto od 1,0403 kg/kW_eh i neto 1,1335 kg/kW_eh i specifična potrošnja potpalinog goriva (mazuta) – bruto od 0,00158 kg/kW_eh i neto – 0,00173 kg/kW_eh. Ostvarene vrijednosti specifične potrošnje uglja su veće od računsko projektovanih u masenim jedinicama za 3 do 6 %, a mazuta su u granicama normativa. Ostvarena srednja specifična potrošnja toplotne energije iz osnovnog goriva – uglja je u granicama – bruto od 10.471kJ/kW_eh (2012. godina) do 10.902 kJ/kW_eh (2013. godina), a neto 11.292 kJ/kW_eh (2011. godina) do 11.798 kJ/kW_eh (2013. godina), Tabela 5. Vrijednosti su veće od proračunskih od 0,4% do 5%, što govori o povećanoj potrošnji toplotne energije iz osnovnog goriva, a samim tim i povećanje količinskih vrijednosti. Proizvodnja električne energije se može okarakterisati sa aspekta potrošnje toplotne energije iz osnovnog goriva kao nedovoljno ekonomična. Primjera radi, tako u 2013. godini je zabilježeno povećanje potrošnja toplotne energije za isto proizvedenu električnu energiju u odnosu na projektovane vrijednosti za 712.096 GJ, što izraženo u masenim jedinicama je 70.070 tona uglja toplotne moći 10.163 kJ/kg. Posmatrano za desetogodišnji vremenski period proizvodnje električne energije, te količine su 3.858.448 GJ ili u masenim jedinicama cca 380.000 tona uglja. Ostvarena donja toplotna moć uglja (10.163 kJ/kg) je u projektnim granicama, a odstupanje od garancijske vrijednosti (10.495 kJ/kg) je 3,2% prema nižoj projektnoj vrijednosti.

Za ocjenu ekonomičnosti proizvodnje električne energije značajni su i faktori specifične potrošnje sirove, dekarbonizovane i demineralizovane vode, Tabela 6. Analize pokazuju da su potrošnje dekarbonizovane vode niže od normativnih vrijednosti. Za analizirano vrijeme proizvodnje električne energije od deset godina manje su ostvarene vrednosti od normativa za 10,3 %, što govori o precijenjenosti normativa. Postojeće normative je potrebno promijeniti i na osnovu desetogodišnje potrošnje uspostaviti novi normativ u svrhu preciznijeg planiranja i kvalitetnijih analiza troškova. Uz optimizaciju procesa proizvodnje i potrošnje dekarbonizovane vode i na bazi desetogodišnjeg praćenja ostvarene specifične potrošnje za normativ bi se mogla dati preciznija vrijednost od 0,0028 m³/kWeh i odnosio bi se na neto specifičnu potrošnju, a za bruto je vrijednost 0,0026 m³/kWeh. Analize pokazuju da su potrošnje demineralizovane vode niže od normativnih vrijednosti, pa za analizirano vrijeme proizvodnje električne energije od deset godina manje su ostvarene vrijednosti od normativa za 11,3 %, što govori o normativu koji nije adekvatno određen. Uz optimizaciju procesa proizvodnje i potrošnje demineralizovane vode te na bazi desetogodišnjeg praćenja ostvarene specifične potrošnje za normativ bi se mogla dati preciznija vrijednost od 0,00029 m³/kWeh i odnosio bi se na neto specifičnu potrošnju, a za bruto je vrednost 0,00027 m³/kWeh. Pored navedenih karakteristika potrebno je uzeti u razmatranje kao ekonomske faktore zaposlenu radnu snagu i troškove održavanja, kako bi se upotpunila ekonomska analiza i ekonomska efikasnost.

Tabela 5: Pregled količina proizvedene električne energije i specifične potrošnje toplotne energije iz goriva, [4, 5].

Godina eksploatacije	Proizvodnja električne energije	Predata proizvedena električna energija na mrežu EES	Specifična potrošnja toplotne energije iz uglja - bruto	Specifična potrošnja toplotne energije iz uglja - neto	Specifična potrošnja toplotne energije iz mazuta - bruto	Specifična potrošnja toplotne energije iz mazuta - neto
	E_G, kWh	E_p, kWh	$q_{og}^b, kJ/kWh$	$q_{og}^n, kJ/kWh$	$q_{pg}^b, kJ/kWh$	$q_{pg}^n, kJ/kWh$
2004	1.129.579.200	1.024.719.476	10.690	11.759	102,50	113,16
2005	1.042.860.000	944.411.397	10.580	11.682	129,15	142,68
2006	1.392.469.920	1.259.995.635	10.627	11.744	88,56	98,04
2007	1.582.463.520	1.441.501.094	10.527	11.413	64,07	69,46
2008	1.660.921.440	1.512.545.954	10.517	11.409	42,41	46,00
2009	1.687.237.920	1.554.699.541	10.508	11.372	64,57	69,88
2010	1.423.314.840	1.315.720.000	10.497	11.355	62,37	67,46
2011	1.977.944.160	1.836.224.000	10.483	11.292	58,29	62,79
2012	1.982.602.560	1.837.054.000	10.471	11.300	27,79	30,00
2013	1.749.621.480	1.616.802.000	10.902	11.798	58,40	63,20
Ukupno:	15.629.015.040	14.343.673.097	10.572	11.519	64,98	70,80

Tabela 6: Ostvareni specifični utrošci sirove, deka i demi vode – srednje vrednosti, [4, 5].

Godine eksploatacije	Specifična potrošnja sirove vode - bruto	Specifična potrošnja sirove vode - neto	Specifična potrošnja deka vode - bruto	Specifična potrošnja deka vode - neto	Specifična potrošnja demi vode - bruto	Specifična potrošnja demi vode - neto
	$v_{sv}^b, m^3/kWh$	$v_{sv}^n, m^3/kWh$	$v_{dk}^b, m^3/kWh$	$v_{dk}^n, m^3/kWh$	$v_{dm}^b, m^3/kWh$	$v_{dm}^n, m^3/kWh$
2004	0,0029754	0,0032799	0,002651	0,002922	0,000304	0,000335
2005	0,0024484	0,0027037	0,002644	0,002919	0,0003143	0,000347
2006	0,0045498	0,0050281	0,002702	0,002986	0,0002957	0,0003268
2007	0,0041099	0,0045118	0,002843	0,003082	0,0002778	0,0003012
2008	0,0069875	0,0076729	0,002675	0,002901	0,0002462	0,0002671
2009	0,0049403	0,0053614	0,002635	0,002852	0,0002593	0,0002806
2010	0,0033931	0,0036705	0,002462	0,002663	0,0002943	0,0003184
2011	0,0050991	0,0054927	0,002369	0,002551	0,0002697	0,0002905
2012	0,0046406	0,0050083	0,002343	0,002529	0,0002316	0,0002500
2013	0,0042856	0,0039602	0,002153	0,002330	0,0001738	0,0001880
Ukupno:	0,0044622	0,0048620	0,0025275	0,002745	0,0002613	0,0002839
Normativ:	-	-	0,00284	0,00306	0,00030	0,00032

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu parametara uporedne analize energetskih karakteristika i veličina u posmatranim vremenskim intervalima može se zaključiti da ostvarena vrijednost koeficijenta iskorišćenja snage bloka termoelektrane nije dostigao proračunsku vrijednost i da je 9,8 % niži, što pokazuje da revitalizacija nije dala maksimalan rezultat, odnosno da nije postignuta nominalna snaga bloka (u odnosu na period prije izvršene revitalizacije koeficijent je povećan za 9,06 %, što je rezultat povećane snage za 20 MW). Imajući u vidu eksploataciono ponašanje bloka termoelektrane i kvalitet uglja koji se koristio, nije za očekivati da se u budućoj eksploataciji znatnije poveća koeficijent iskorišćenja snage, a samim tim i snaga bloka. Znaajući karakteristike kotla i njegovo ponašanje u dosadašnjoj eksploataciji, realno je očekivati prosječne

vrijednosti koeficijenta iskorišćenja snage od oko 0,905, a ukoliko se nastavi sa revitalizacijom i konstruktivnim poboljšanjima moguće je ostvariti vrijednost koeficijenta iskorišćenja snage i do 0,95. Ostvareni koeficijent eksploatacije u posmatranom periodu relativno je visok kada se uzmu u obzir karakteri otkaza i remonata, a u periodu nakon izvršene revitalizacije je veći od proračunskog za 4,34 %. Povećanje koeficijenta eksploatacije u navedenom periodu je rezultat smanjenja koeficijenta remonta i koeficijenta planskih otkaza, te nepostojanja koeficijenta potiskivanja. Ostvareni koeficijent eksploatacije je dostigao nivo nominalne vrijednosti i uz dobro održavanje moguće ga je održati u nominalnim vrednostima (0,8) za planirane srednje remonte. Vidljivo je da se koeficijent remonta planski smanjuje u odnosu na računski, što nije dobro, jer ima negativne posljedice na kvalitet urađenih godišnjih remonata. Skraćivanje godišnjih remonata se odražava na kvalitet i

kvantitet radova, što uvećava šanse za povećanje koeficijenta neplanskih otkaza (tokom 2013. godine se to i dogodilo). Neplanski otkazi su imali najniže vrijednosti 2008. (0,04) i 2012. godine (0,0421). I dalje su to vrijednosti ispod normativnih (0,05). Kada se posmatraju preostale godine iz navedenog vremenskog perioda, povećanje koeficijenta neplanskih otkaza je za 5,6 % veći u odnosu na normativ. Posljedica većeg broja neplanskih otkaza i isključenja termoelektrane je smanjenje energetske efikasnosti i poskupljenje proizvoda. Samim tim se umanjuje i pogonska sigurnost i bezbjednost postrojenja i opreme bloka. Umanjeni koeficijent planskih otkaza (u odnosu na normativ 6,4 % i na raniji period 55,68 %) je rezultat izvršene zamjene zagrijača vode, što je dalo pozitivne rezultate na efekte proizvodnje, smanjenu potrošnju mazuta i poboljšanje pogonske spremnosti bloka termoelektrane. Ostvarena srednja vrijednost koeficijenta vlastite potrošnje na nivou godine od 7,18 % (2011. godine), što je niže od normativne vrednosti (7,2%), ali je i dalje veća od proračunske za 2,6%. U periodu 2011. do 2013. godine, usljed smanjene vlastite potrošnje, dato je kumulativno više energije u elektroenergetski sistem, čime je postignut pozitivan efekat sa energetskog i ekonomskog stanovišta. Rezultati analize su pokazali da je trošen ugalj u periodu proizvodnje električne energije u posmatranom vremenskom razdoblju lošijeg kvaliteta, što se djelimično odrazilo i na specifičnu potrošnju uglja u procesu proizvodnje električne energije. Trošeni ugalj po donjoj toplotnoj moći je za 3,2 % lošiji od garancijskog, ali ne izlazi iz okvira projektovanog uglja (vrijednosti 8790 do 12.090 kJ/kg). Hemijske karakteristike uglja nisu obuhvaćene ovom analizom, ali i njih treba u narednom periodu uzeti kroz dodatnu analizu. Specifična potrošnja uglja je veća za oko 5 % u odnosu na proračunske vrijednosti. Na povećani koeficijent specifičnog utroška, pored lošijeg kvaliteta uglja, ima uticaj povećanog stepena iskorištenja kotla. U okviru analiziranog vremenskog perioda od deset godina specifične potrošnje dekarbonizovane i demineralizovane vode za proizvedenu električnu energiju u odnosu na normative su manje za 10,3 odnosno 11,3 %. Najvjerovatnije da normativne vrijednosti nisu određene na osnovu računskih pokazatelja i da su bile u startu prevelike. U cilju kvalitetnijih uporednih analiza i boljeg planiranja troškova proizvodnje potrebno je definisati nove normativne vrednosti za navedene koeficijente. Na bazi urađene analize u radu i iskustva iz proizvodnje predložene vrijednosti su za specifičnu potrošnju dekarbonizovane vode – bruto 0,0028 m³/kWeh, odnosno za specifičnu potrošnju dekarbonizovane vode – neto 0,0026 m³/kWeh. Slično, vrijednosti za specifičnu potrošnju demineralizovane vode su – bruto 0,00029 m³/kWeh i specifična potrošnja demineralizovane vode – neto 0,00027 m³/kWeh. Ostvarene specifične potrošnje toplotne energije osnovnog goriva su veće od proračunskih vrijednosti za 2,3%, što nam daje za pravo da konstatujemo da je koeficijent korisnog dejstva kotla pogoršan u odnosu na proračunske vrijednosti. Za posmatrani desetogodišnji period proizvodnje električne energije povećana je potrošnja toplotne energije za 3.858.448 GJ ili prevedeno u masene jedinice oko 380.000 tona uglja donje toplotne moći 10.163 kJ/kg. Slično, kada se

uzme u obzir osnovno i potpalno gorivo ostvareni koeficijent korisnog dejstva termoelektrane je manji za 2,94% od normativne vrijednosti (0,32%), što za stare blokove predstavlja relativnodobro iskorišćenje. Karakteristično za ove blokove je da najekonomičniji rad ostvaruju pri opterećenjima od 269 do 272 MW, gledano sa stanovišta koeficijenta korisnog dejstva i specifične potrošnje toplotne energije.

5. LITERATURA

- [1] Z. Milovanovic, „*The algorithm of activities for improvement of competitiveness of power-process plant*“, Communications in Dependability and Quality Management, No. 3, pp. 18-28, 2009.
- [2] Tehnički otčet energobloka 300 MVt TЭС „Uglevik“, VO KOTЭС, Moskva, 2012.
- [3] Z. Milovanovic, „*Optimization of Power Plant Reliability*“, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, Banja Luka, 2003.
- [4] Mjesečni izvještaji proizvodnje električne energije TE Ugljevik za 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012 i 2013. godinu
- [5] Godišnji izvještaji o kretanjima i zastojima TE Ugljevik 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012 i 2013. Godinu
- [6] A. P. Kovaleva: Парогенераторы, Энергия, Moskva – Leningrad, 1966.
- [7] Z. Milovanovic, „*Modified Method for Reliability Evaluation of Condensation Thermal Electric Power Plant*“, Ph.D. Thesis, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, Banja Luka 2000.

Abstract – Inside this paper the subject were time, energetic and techno-economical characteristics of the block together with method for their defining and computing. Acquired definitions and equations were applied on certain time period of electricity production inside the power plant (2004-2013). Also the detailed analysis of observed magnitudes was performed and so the associated reviews in tabular forms and related diagrams were given. Thereat, the acquired characteristics in exploitation of the block of thermal power plant were grouped into three groups for evaluating and analysis of effects of exploitation of the block (time characteristics, energetic characteristics and techno-economical characteristics acquired during exploitation of the block). On the basis of parameters of the analysis of energetic characteristics and magnitudes in observed time intervals the certain final observations were given.

ANALYSIS OF ENERGETIC EFFICIENCY OF OPERATION OF TPP UGLJEVIK FOR PERIOD 2004-2014

Prof. Dr Zdravko N. Milovanović
Momir Samardžić

ПОБОЉШАЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ У ПУМПНОМ ПОСТРОЈЕЊУ ОДАБИРОМ ОДГОВАРАЈУЋЕГ ЕЛЕКТРОМОТОРНОГ ПОГОНА СА ФРЕКВЕНТОМ РЕГУЛАЦИЈОМ

Раденко Марјановић, *Arcelor Mittal Prijedor*, д.о.о. Приједор, Босна и Херцеговина
Петар Матић, *Електротехнички факултет, Бања Лука, РС Бања Лука, Босна и Херцеговина*

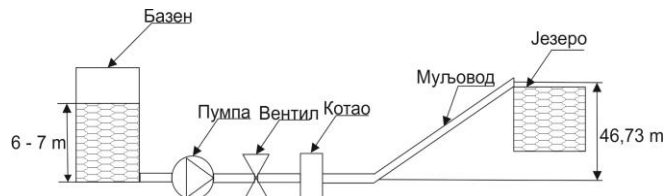
Садржај – Овај рад презентује студију побољшања енергетске ефикасности у пумпном постројењу рудника помоћу регулисаног погона са фреквенцијским регулатором. Истражено је како одабир одговарајућег електромоторног погона са асинхроним мотором промјенљиве брзине утиче на смањење утошене снаге, и показано је колике се уштеде могу остварити у односу на постојећи систем са синхроним мотором константне брзине.

Кључне ријечи - пумпа, асинхрони мотор, фреквентни регулатор, енергетска ефикасност.

1. УВОД

Електромоторни погони пумпних система у рачунима за утрошену електричну енергију заузимају 25 % до 50 % у индустрији. Утрошак електричне енергије за потребе пумпе може бити један од највећих ставки у рачуну ако пумпа ради више од 2000 радних часова годишње. Постоји велика могућност да се трошак за пумпу смањи путем одговарајућег пројектовања и избора пумпног система и контроле. Рад пумпе са промјенљивим протоком или лошим избором пумпе (предимензионисање) уобичајено захтјева коришћење вентила за пригушење, бајпаса и/или мотора са промјенљивом брзином да би се добио жељени проток. Вентил за пригушење може бити извор вибрација и буке, такође може доћи лијепљења материјала, кавитације, цурења, до оштећења вентила услед корозије. Најефикаснији начин манипулације протоком је подешавање брзине пумпе. Треба напоменути да снага пумпе зависи од куба брзине. Најбољи начин регулације протока је регулисање брзине обраћања пумпе, нпр. коришћењем фреквентног регулатора који има високу ефикасност, једноставно управљање, итд.

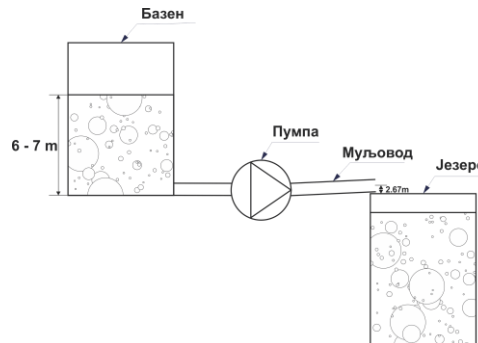
За потребе препумпавања муља из пумпне станице муља у руднику *ArcelorMittal Prijedor* користи се центрифугална пумпа *GPT 4000/71a* коју покреће синхрони мотор СДНЗ-16-41-12у3 номиналне брзине 500 об/мин, снаге 1250 kW и напона 6000V. Мотор је при раду узимао из мреже 1000 kW [1]. Капацитет пумпе је 3200 m³/h, а доток муља из система у пријемни базен, односно у пумпу је око 2200 m³/h. Пумпа кроз муљовод дужине 5465,27 m и унутрашњег пречника 700 mm препумпава муљ у акумулационо језеро Градина. Висинска разлика између осе излазне цијеви пумпе и осе цијеви на акумулационом језеру износи 46,73 m. Шема тренутног пумпног система и муљовода приказана је на слици 1.



Сл. 1. Шема пумпног система и муљовода

Због већег капацитета пумпе од дотока муља у пумпну станицу, регулација протока се врши пригушењем вентила. Котао за компензацију хидрауличног удара (приказан на слици 1) служи за смањење хидрауличног удара, односно смањења притиска у муљоводу.

Због будућих технолошких потреба, долази до промјене постојећег система, па ће се одлагање муља вршити на мјесту старог површинског копа. Удаљеност новог мјеста одлагања од постојеће пумпне станице је 3000 m, док је висинска разлика између осе излазне цијеви пумпе и осе цијеви на акумулационом језеру износи 2,67 m (слика 2). Због промјене технолошког процеса, искориштена је прилика да се истражи да ли се примјеном регулисаног погона може побољшати енергетска ефикасност постројења.



Сл. 2. Шема новог пумпног система и муљовода

Циљ рада је да утврди да ли би се у конкретном случају могао користити мотор мање снаге у односу на постојећи због смањења дужине цијевовода и смањења висинске разлике. Такође, потребно је размотрити до које границе би се могла смањити брзина обраћања мотора, без угрожавања технолошког процеса, а да се постигне увећана ефикасност. На крају, анализираће се колика уштеда се очекује у потрошњи електричне енергије у односу на постојећи систем.

2. СТАЊЕ НОВОГ СИСТЕМА

Да би се одабрао одговарајући погон пумпе, потребно је прво израчунати губитке новог муљовода и одредити радну криву новог система [2].

Манометарска висина дизања је:

$$H_m = H_g + H_l \quad (1)$$

Гдје су:

H_m - манометарска висина дизања [m];

H_g - геодетска висина дизања [m];

H_l - линијски губици у муљоводу [m].

Геодетска висина дизања при запуњености пријемног базена од 6 m је:

$$H_g = 2,67 - 6 = -3,33m \quad (2)$$

Линијски губици у муљоводу промјера цијеви $D=700\text{mm}$ и протока $Q=2500\text{m}^3/\text{h}=0,6944\text{m}^3/\text{sek}$ се рачунају на основу [2]:

$$H_l = L \cdot i \quad (3)$$

Гдје су L дужина цијевовода, i пад притиска у цијеви.

Пад притиска у цијеви износи:

$$i = 0,54 \sqrt{\frac{Q}{0,27854 \cdot C \cdot D^{2,63}}} = 0,54 \sqrt{\frac{0,6944}{0,27854 \cdot 100 \cdot 0,7^{2,63}}} = 0,0061 \text{ m/m} \quad (4)$$

Гдје је C коефицијент условљен унутрашњим стањем цијеви, за челичне цијеви старије од 5 година $C=100$. На основу тога линијски отпори у цијевоводу износе:

$$H_l = L \cdot i = 3000 \cdot 0,0061 = 18,3m \quad (5)$$

Потребан напор (манометарска висина дизања) муљне пумпе износи:

$$H_m = H_g + H_l + \Delta p = -3,33 + 18,3 + 5 = 19,97m \quad (6)$$

С обзиром на малу густину муља није потребна корекција напора за његов транспорт па се усваја да је потребни напор муљне пумпе 19,97 m или 196 J/kg.

За проток $Q=2500 \text{ m}^3/\text{h}$ или $0,6944 \text{ m}^3/\text{sek}$, напор $Y=196 \text{ J/kg}$ и максималну густину муља $\gamma_{\text{муљ}} = 1060 \text{ kg/m}^3$ потребан је електромотор снаге:

$$N = 1,05 \cdot \frac{Q \cdot Y \cdot \gamma_{\text{муљ}}}{1000 \cdot \eta} = 1,05 \cdot \frac{0,6944 \cdot 196 \cdot 1060}{1000 \cdot 0,65} = 233 \text{ kW} \quad (7)$$

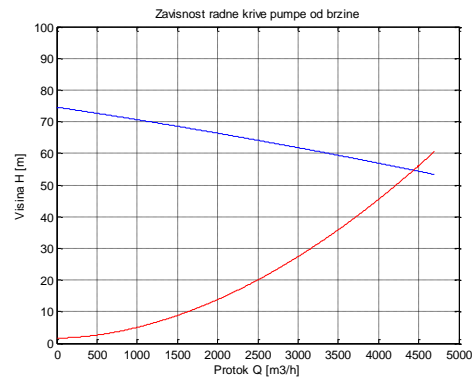
гдје је η степен искоришћења пумпе.

Због могућих потреба препумпавања муља на стару локацију, усваја се мотор снаге 500 kW и 500 ob/min чије карактеристике на основу [3] одговарају потребама старог система.

На основу радног дијаграма из [4] и коришћењем функције *polyfit* програмског пакета *Matlab* добијамо да је функцију која описује висину дизања пумпе у зависности од протока, односно:

$$H = -2,014 - 12,259Q + 79,285Q^2 \quad (8)$$

Радна крива пумпе и крива система за ново мјесто одлагања муља приказани су на слици 3.



Сл. 3. Зависност пумпног система од протока

Са слике 3 се види да је са нови радним системом потребна и мања брзина обртања пумпе у односу на постојећи систем.

3. ПРОРАЧУН ПОТРЕБНЕ БРЗИНЕ

Да бисмо одредили оптималну брзину конкретне пумпе потребно је да одредимо зависности радних величина пумпе од промјене брзине.

$$Q \sim n \quad (9)$$

$$H \sim n^2 \quad (10)$$

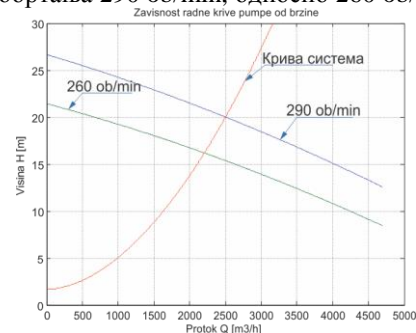
$$P \sim n^3 \quad (11)$$

Посматраћемо два радна режима пумпе. Пумпа је у 2014. години радила око 4800 радних часова. Од тога је 4100 радних часова радила при стандардном режиму рада постројења (доток муља $Q=2500\text{m}^3/\text{h}=0,6944\text{m}^3/\text{sek}$), а 700 радних часова је радила при режиму филтрације постројења (доток муља $Q=2200\text{m}^3/\text{h}=0,6111\text{m}^3/\text{sek}$). На основу једначина (2) до (6) и једначина (9) и (10) подаци за ове протоке приказани су у Табели 1.

Табела I. Оптимални подаци пумпног система за различите протоке

	H_g [m]	i	H_l [m]	H_m	n [ob/min]
$Q=2500 \text{ m}^3/\text{h}$	-3,33	0,0061	18,3	19,96	290
$Q=2200 \text{ m}^3/\text{h}$	-3,33	0,0048	14,4	16,12	260

На слици 4 приказане су радне криве пумпе при брзинама обртања 290 ob/min, односно 260 ob/min.



Сл. 4. Зависност радне криве пумпе од брзине

При новим брзинама имамо да мотор из мреже узима слjedeће снаге:

$$\left. \begin{matrix} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{290} \sim n_{290}^3 \end{matrix} \right\} = \left. \begin{matrix} 500 \cdot 10^3 \sim 500^3 \\ P_{290} \sim 290^3 \end{matrix} \right\} \Rightarrow P_{290} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{290}{500} \right)^3 = 97,5 \text{ kW} \quad (12)$$

$$\left. \begin{matrix} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{260} \sim n_{260}^3 \end{matrix} \right\} = \left. \begin{matrix} 500 \cdot 10^3 \sim 500^3 \\ P_{260} \sim 260^3 \end{matrix} \right\} \Rightarrow P_{260} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{260}{500} \right)^3 = 70,3 \text{ kW} \quad (13)$$

На бази једначине (8) хидрауличне снаге за протоке и одговарајуће висине $(Q;H)=(2500; 19,96)$, $(Q;H)=(2200; 16,12)$ су респективно:

$$P_{hid1} = \gamma_{\text{м.в.}} g H_1 Q_1 = 1060 \cdot 9,81 \cdot 19,96 \cdot 0,6944 = 144 \text{ kW} \quad (14)$$

$$P_{hid2} = \gamma_{\text{м.в.}} g H_2 Q_2 = 1060 \cdot 9,81 \cdot 16,12 \cdot 0,6111 = 102,4 \text{ kW} \quad (15)$$

Из једначина (14) и (15) се види да је потребна хидрауличка снага већа од снаге мотора при смањеним брзинама. Додатна регулација протока би се морала вршити пригушењем вентила. Међутим, у пракси, на бази искустава се очекује да због старости пумпе, односно лошијег стања радног кола и кућишта пумпе, регулација вентилом ће се вршити врло мало или уопште неће бити потребна.

4. УШТЕДЕ И РОК ОТПЛАТЕ

Са новим системом очекују се велике уштеде у потрошњи електричне енергије. Замјеном синхроног мотора мотора 1250 kW са новим асинхроним од 500 kW добиће се уштеда у једноставнијем и јефтинијем одржавању. Даље, коришћењем регулације брзине мотора са фреквентним регулатором, мотор ће из мреже узимати око 100 kW, односно 70 kW. Са електротехничке стране добре особине регулацијом брзине фреквентним регулатором су „мекан“ старт (полазна струја $1,5I_n$), мања струја у трајном раду. На овај начин су елиминисани струјни удари на мрежу при старту, а такође и механички удари на мотор и пумпу.

Користиће се нисконапонски систем (трансформатор 6kV/690 V, фреквентни регулатор, мотор) због мање цијене инвестиције у односу на средњенапонски систем (цијена НН система је око 135000 ВАМ, а цијена СН система је око 180000 ВАМ).

Уштеде у електричној енергији у два нова радна режима у односу на постојећи режим рада са синхроним мотором су:

$$\Delta P_{290} = P_{500} - P_{290} = 1000 - 97,5 = 902,5 \text{ kW} \quad (16)$$

$$\Delta P_{260} = P_{500} - P_{260} = 1000 - 70,3 = 929,7 \text{ kW} \quad (17)$$

Како пумпа током године ради са протоком $Q=2500 \text{ m}^3/\text{h}$ око 4800 часова и са протоком $Q=2200 \text{ m}^3/\text{h}$ око 700 часова, а цијена за потрошену електричну енергију је 0,065 ВАМ/kWh, имамо да су уштеде електричне енергије промјеном брзине за ова два режима:

$$C_{e1} = \Delta P_{290} \cdot c_e \cdot T_1 = 902,5 \cdot 0,065 \cdot 4100 = 240.516 \text{ ВАМ} \quad (18)$$

$$C_{e2} = \Delta P_{260} \cdot c_e \cdot T_2 = 929,7 \cdot 0,065 \cdot 700 = 42.301 \text{ ВАМ} \quad (19)$$

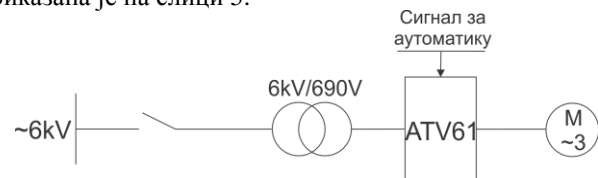
Укупна уштеда у електричној енергији и одржавању при регулацији брзине пумпе фреквентним регулатором је:

$$C_e^{\text{укупно}} = C_{e1} + C_{e2} = 240516 + 42301 = 282817 \text{ ВАМ} \quad (20)$$

Из (20) видимо да су укупне уштеде у електричној енергији око 283.000 ВАМ на годишњем нивоу.

5. ТЕХНОЛОШКА РЕАЛИЗАЦИЈА ФРЕКВЕНТНИ РЕГУЛАТОР-СИНХРОНИ МОТОР

За регулацију брзине користиће се суви трансформатор *Schneider Electric „Trihal“* 6 kV/690 V 850 kVA, фреквентни регулатор *Schneider Electric Altivar 61* и асинхронни електромотор *АТБ Север* 500 kW и 496 об/мин. Трансформатор ће се напајати из већ постојеће СН хелије. За аутоматизацију регулације брзине *Altivar 61* има *PID* регулатор који регулише брзину мотора на основу нивоа воде у пријемном базену. Податке о нивоу воде *PID* регулатор добија од сонде која се налази на дну пријемног базена. Шема система цијелокупног система приказана је на слици 5.



Сл. 5. Шема електромоторног погона

Процењена цијена опреме и извођења радова је око 135.000 ВАМ.

6. ЗАКЉУЧАК

У раду смо истражили како одабир регулисаног електромоторног погона са асинхроним мотором на постојећој пумпи утиче на смањење трошкова пумпног система и потрошње електричне енергије, односно увећање енергетске ефикасности.

Показали смо да губици центрифугалне пумпе зависе од вриједности Q и H , односно од различитих радних тачака. Код центрифугалних пумпи висина дизања флуида зависи од протока. Ова релација се назива радна карактеристика пумпе и илустрована је кривим за различите вриједности протока. Рачунским путем доказане су уштеде при одабиру одговарајућег система за погон пумпе при промјени цијевовода и уштеде електричне енергије регулацијом брзине мотора фреквентним регулатором, односно регулацијом протока за два карактеристична радна режима пумпног система. Такође коришћењем фреквентног регулатора добија се „мекан“ старт мотора и смањују се механички удари на мотор и центрифугалну пумпу.

Упоредицањем вриједности уштеда коришћењем фреквентног регулатора и цијене улагања у нови систем, видимо да се инвестиција отплаћује за пола године.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Раденко Марјановић, „Моделовање и анализа рада високонапонског синхроног мотора у погону помпне

станции,“ Електротехнички факултет Бања Лука, 2013.

- [2] Допунски рударски пројекат – Пројект депоније муља, Приједор, 2014.
- [3] Раденко Марјановић, „Побољшање енергетске ефикасности у пумпном постројењу коришћењем фреквентног регулатора,“ ЕНЕФ Бања Лука, 2013.
- [4] Technical and accompanying document for 4000/71&4000/71a, USSR, 1982.
- [5] UQ-75-03/21, „Упутство руковањем пумпном станицом муља,“ ArcelorMittal Prijedor, 2005.

Abstract - This paper presents a study of improving energy efficiency in pumping plant mines using regulated drives with frequency converter. Explored how selected the appropriate electric drives with induction motor with variable speed impact on reducing power, and it is shown how much savings can be achieved compared to the existing system with synchronous motor at a constant speed.

Improving energy efficiency in pumping systems by selecting appropriate electric drive with a frequency regulation

Radenko Marjanović

Petar matić

KARAKTERIZACIJA ČETVOROKVDRANTNOG JEDNOSMERNOG POGONA UZ POMOĆ MODIFIKOVANE STANDARDNE MERNE GRUPE

Dejan Stevanović, *Inovacioni centar naprednih tehnologija u Nišu*, dejan.stevanovic@icnt.rs,
Milutin Petronijević, Predrag Petković, *Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet*

Sadržaj – Cilj ovog rada je da ukaže na potrebu prilagođavanja postojećih metoda merenja snaga potrošnje industrijskih potrošača saglasno promenjenom profilu priključenih uređaja. Masovna primene elektroenergetskih pretvarača snage kao tipičnih nelinearnih potrošača dovela je u pitanje opravdanost postojećih metoda registrovanja potrošnje. Talasni oblik struje nelinearnih potrošača odstupa od sinusnog talasnog oblika usled čega deo isporučene energije ostaje nevidljiv, što, između ostalog, dovodi do značajnih gubitaka. Da bi se rešio ovaj problem, neophodno je detektovanje i kvantifikovanje snage izobličenja nelinearnih potrošača. U ovom radu prvi put se prikazuju rezultati merenja snage izobličenja na priključcima četvorokvadrantnog tiristorskog pretvarača koji napaja motor jednosmerne struje. Verifikacija predloženog algoritma merenja snage izobličenja obavljena je u motornom i generatorskom režimu rada pogona. Za tu svrhu koristi se standardna merna grupa modifikovana prema originalnoj ideji autora. Rezultati merenja upoređeni su sa onima iz preciznog analizatora snage.

1. UVOD

Jedan od glavnih zahteva s kojima se suočava moderno ljudsko društvo je smanjenje potrošnje energije, odnosno korišćenje energije na efikasniji način. Elektronika je odgovorila na ovaj zahtev, omogućivši proizvodnju uređaja visoke energetske efikasnosti. Međutim, borba za svaki vat na strani potrošača je beskorisna ako nije podržana od strane elektroenergetskog (EE) sistema. Nedavna istraživanja objavljena u [1] i [2] pokazuju da godišnja vrednost gubitaka na nivou distributivne mreže dostiže do 6% ukupne proizvedene energije. Od toga 2% predstavljaju gubici na vodovima, dok oko 4% predstavlja gubitke na distributivnoj opremi (najviše transformatori). Pomenute brojke obuhvataju gubitke koji se javljaju u savremenim evropskim sredjenaponskim (SN) i niskonaponskim (NN) mrežama. Mnoge zemlje donele su regulative kojima se zahteva smanjenje gubitaka za 1,5% svake godine [3].

Ovi gubici mogu da se klasifikuju kao tehnički i ne-tehnički gubici. Tehnički gubici se javljaju usled disipacije snage na samoj opremi EE sistema (transformatori, vodovi i dr.). Ne-tehnički gubici se odnose na isporučenu energiju koja je utrošena, ali iz nekog razloga nije registrovana - najčešće su posledica ilegalno priključenih potrošača. Schneider Electric [3], ukazuje da se 90% ne-tehničkih gubitaka javlja u SN i NN mrežama. Pretpostavlja se da ekvivalentan novčani iznos ima vrednost između 1.000 € i 10.000 € po SN/NN transformatorskoj stanici na godišnjem nivou u evropskim zemljama [3]. To je dovelo SN i NN mreže u sam vrh prioriteta sa aspekta smanjenje gubitaka. Prvi korak u smanjenju gubitaka je praćenje i lokalizacija izvora gubitaka. Ovaj zahtev je bio teško izvodljiv i veoma skup u prošlosti, dok je danas novim tehničkim rešenjima ovaj posao značajno pojednostavljen. Pametna brojila (*smart*

meters) omogućavaju precizniji uvid u trenutno stanje pojedinih parametara mreže.

Nažalost, zbog inertnosti prihvatanja činjenica u vezi karaktera savremenih elektroenergetskih potrošača, neke odluke koje utiču na povećanje efikasnosti EE sistema nisu blagovremeno donete. Osnovna pretpostavka na kojoj se dugo godina zasniva merenje snage potrošača je da su opterećenja u potpunosti linearna (otporna ili reaktivna). To znači da struja prati promenu talasnog oblika napona uz moguću faznu razliku koja se javlja kod reaktivnih opterećenja. Do početka poslednjeg kvartala 20. veka većina potrošača uklapala se u ovaj koncept. U domaćinstvima su dominirali potrošači otpornog karaktera (grejači, sijalice i sl.), dok su u industriji potrošači obično imali induktivni i linearni karakter (asihroni motori). Shodno tome, bilo je dovoljno da brojila registruju samo aktivnu energiju u domaćinstvima i, dodatno, reaktivnu energiju kod industrijskih potrošača.

Povećana primena raznih vrsta pretvarača na bazi energetske elektronike, kako u domaćinstvu, tako i u industriji dovela je do novih, ranije nepoznatih problema. Porast angažovane reaktivne snage od strane kućnih potrošača, uz istovremenu pojavu harmonika doveli su do pojave dodatnih gubitaka snage. Pojedini distributeri postali su svesni značaja merenja aktivnih i reaktivnih snaga kod rezidencijalnih korisnika, pa su pokrenuli široku kampanju zamene starih elektro-mehaničkih brojila novim elektronskim. Tako je na primer Enel S.p.A. (Ente Nazionale per l'Energia eLettrica), najznačajniji distributer u Italiji i drugi prema instalisanosti snazi u Evropi, zamenio oko 99% brojila. Ovom kampanjom i tarifiranjem reaktivne energije kod rezidencijalnih potrošača gubici su delimično smanjeni, ali su problemi sa izobličenjima koji su posledica nelinearnih potrošača i dalje ostali prisutni.

Nedavno je pokazano [4, 5, 6] da pravi uvid u isporučenu snagu ne može da se dobije merenjem samo aktivne i reaktivne snage. Nelinearni karakter potrošača i prateća harmonijska izobličenja struja i napona u EE mreži, između ostalih problema, generisali su dodatne gubitke u distributivnoj mreži zbog čega je potrebno osmisliti pouzdan, a uz to i ekonomski opravdan metod za registraciju izvora harmonijskih izobličenja.

Nelinearna harmonijska izobličenja izazivaju pojavu nove komponente snage koju postojeća brojila ne registruju. Ova komponenta snage naziva se *snaga izobličenja*. U ovom radu pokazaćemo na primeru jednog reverzibilnog, tiristorski regulisanog jednosmernog pogona značaj verodostojne registracije snage izobličenja. Pokazaćemo da ova komponenta snage ima isti red veličine kao i aktivna snaga, pa je stoga važno da se uvede pouzdan način za njeno kvantifikovanje. U ovom radu primenićemo ranije predloženi metod [7] za modifikaciju standardnih elektronskih brojila koji omogućava registrovanje i snage izobličenja. Po prvi put biće publikovani rezultati merenja snage izobličenja za

višekvadrantni - motorni i generatorski režim rada pogona sa motorom jednosmerne struje sa tiristorskim ispravljačem na ulazu koji je dobro poznat kao značajan izvor viših harmonika struja.

Rad je organizovan u pet poglavlja. Naredno poglavlje daje kratak pregled principa rada savremenih elektronskih brojila. U trećem poglavlju predložen je metod za merenje snage izobličenja koje je posledica prisustva nelinearnih potrošača u EE mreži. Metod je verifikovan merenjima na industrijskom, tiristorskom ispravljaču koji napaja jednosmerni motor u motornom i generatorskom režimu rada. Rezultati verifikacije prikazani su u četvrtom delu ovog rada. Zaključak je dat u petom poglavlju.

2. OSNOVNI PRINCIP RADA ELEKTRONSKIH BROJILA

Osnovni princip rada elektronskih brojila zasniva se na digitalnoj obradi trenutnih vrednosti napona i struje. Vrednost merenog napona se preko naponskog razdelnika dovodi na analogni ulaz (ADC) gde se uzorkuje (sempluje) u diskretnim vremenskim trenucima (najmanje dva po periodu, prema Nyquist-Shannonovoj teoremi) i digitalizuje. Istovremeno se naponski ekvivalent struje, dobijen uz pomoć strujnog transformatora, konvertuje u digitalnu vrednost preko odgovarajućeg ADC. Dobijene diskretizovane i digitalizovane vrednosti obrađuju se u digitalnom procesoru signala (DSP).

Trenutna vrednost složenoperiodičnog signala (napona ili struje), koji osim osnovnog harmonika na 50Hz, sadrži i harmonike višeg reda, može se predstaviti sa:

$$x(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M X_{RMS h} \cdot \cos(2\pi f_h t + \varphi_h), \quad (1)$$

gde f_h predstavlja frekvenciju h -tog harmonika.

Posle diskretizacije po vremenu dobija se

$$x(nT) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M X_{RMS h} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_h}{f_{semp}} n + \varphi_h\right), \quad (2)$$

gde f_{semp} označava frekvencija uzorkovanja signala. Efektivna, odnosno srednjekvadratna vrednost signala računa se usrednjavanjem:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N x(nT)^2}{N}}, \quad (3)$$

gde N označava ukupan broj uzoraka u sekundi. Trenutna vrednost aktivne snage dobija se množenjem trenutnih vrednosti struje i napona, a njena srednja vrednost računa se kao:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N v(nT)i(nT)}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N p(nT)}{N} \quad (4)$$

Za izračunavanje reaktivne snage koristi se prethodna jednačina, s tim što su uzorci napona pomereni za $\pi/2$.

$$Q = \frac{\sum_{n=1}^N v_{\pi/2}(nT)i(nT)}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N q(nT)}{N} \quad (4a)$$

Prividna snaga računa se kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struje (5).

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}. \quad (5)$$

Detaljnije objašnjenje o principu rada elektronskog brojila može se naći u [8].

3. KOMPONENTE PRIVIDNE SNAGE U SLUČAJU NELINEARNIH POTROŠAČA

Prema dosadašnjoj regulativi industrijski potrošači plaćaju samo utrošenu aktivnu/reaktivnu energiju što je bilo sasvim razumno u periodu kada su dominirali linearni potrošači. Pojava regulisanih pogona zahteva ugradnju raznovrsnih pretvarača snage na bazi poluprovodnika (dioda, tiristora, tranzistora). Vrlo često se zamena postojećih, neregulisanih pogona, novim sa regulacijom brzine motora opravdava zahtevima za energetsom efikasnošću. Međutim, zamena starih linearnih potrošača novim nelinearnim, stvorila je dodatne probleme distributerima električne energije. Deo snage koja se javlja usled prisustva viših harmonika praktično je isporučen potrošaču, ali je nevidljiv sa stanovišta distributera ako se za registraciju potrošnje primene standardna elektro-mehanička ili elektronska brojila.

Naime kada se primene jednačine za izračunavanje aktivne (4) i reaktivne snage (4a), a prividna snaga se izračuna na osnovu (5), dobija se, da u prisustvu harmonika važi sledeća relacija:

$$S^2 > P^2 + Q^2. \quad (6)$$

S obzirom da za prostoperiodične sisteme važi da je $S^2 = P^2 + Q^2$, jasno je da razlika potiče od prisustva viših harmonika, odnosno da je ona posledica izobličenja napona i struje u EE sistemu. Prateći ukupnu logiku u definisanju aktivne i reaktivne snage Budeanu je još 1927. godine uveo pojam snage izobličenja, koja je posledica prisustva harmonika u mreži. Korigovao je izraz za prividnu snagu:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D_B^2, \quad (7)$$

gde je sa D_B označio snagu izobličenja. Suština ove korekcije sadržana je u činjenici da je u odsustvu harmonika, $D_B=0$, tako da važi $S^2 = P^2 + Q^2$. Očigledno da ova poznata definicija postaje specijalni slučaj primene (7). Odavde sledi da snaga izobličenja može da se izračuna kao:

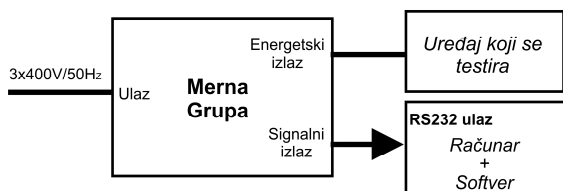
$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (8)$$

Može se pokazati da snaga izobličenja postoji samo kod nelinearnih potrošača, odnosno u situaciji kada se viši harmonici napona i struje javljaju na različitim učestanostima.

Računanjem snage izobličenja na osnovu (8) i uzimanjem u razmatranje prilikom kreiranja računa (penalizacija značajnih nelinearnih potrošača), distributeri bi bili u prilici da znatno smanje nivo gubitaka u EE sistemu i da redukuju druge probleme koje može izazvati propagacija harmonika u mreži. U sledećem poglavlju biće prikazani rezultati merenja koji su obavljani uz pomoć standardnog elektronskog brojila koje je proizvela firma EWG iz Niša [7].

4. KARAKTERIZACIJA ČETVOROKVADRANTNOG JEDNOSMERNOG POGONA UZ POMOĆ MODIFIKOVANE STANDARDNE MERNE GRUPE

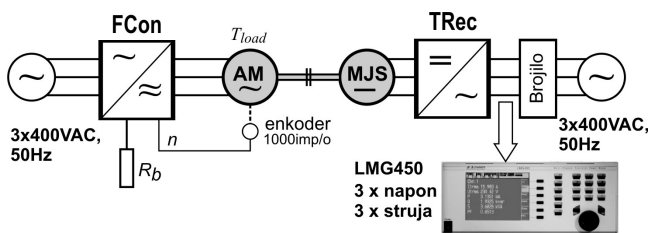
Da bi se potvrdila ideja o opravdanosti uvođenja snage izobličenja u tarifni sistem realizovano je testno okruženje koje će omogućiti merenje osnovnih parametra električne energije. Realizovano testno okruženje prikazano je na Sl.1.



Sl. 1. Blok šema testnog okruženja.

Kao merni instrument korišćena je komercijalna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62053-22 [9] i IEC 62052-23 [10]. Brojilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa njihovim definicijama koje su date jednačinama (3), (4), (4a) i (5). U trenutno raspoloživoj varijanti merna grupa nema mogućnost računanja snage izobličenja, ali registruje efektivnu vrednost napona i struje, aktivnu i reaktivnu snagu. Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računar preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (5) i (8) u računaru se izračunava vrednost snage izobličenja.

U ovom radu prikazani su rezultati dobijeni merenjem potrošnje elektromotornog pogona čija je blok šema prikazana na Sl. 2. Elektromotorni pogon realizovan je kao mehanička veza jednosmernog (MJS) i naizmeničnog, asinhronog motora (AM), koji ima ulogu simulatora opterećenja. AM se napaja iz pretvarača frekvencije (FCon). Zadatak pretvarača Fcon je da obezbedi konstantnu željenu vrednost momenta na osovini motora. To se postiže izborom odgovarajućeg režima vektorske regulacije po momentu uz korišćenje povratne veze po brzini u cilju bolje estimacije stvarnog elektromagnetnog momenta.



Sl. 2. Šema merenja za ispitivani elektromotorni pogon.

Jednosmerni motor sa nezavisnom pobudom (MJS) napaja se iz četvorokvadrantnog tiristorskog ispravljača (TRec) sa digitalnim upravljanjem koji je podešen da radi u režimu regulacije brzine. Četvorokvadrantni rad ispravljača omogućen je antiparalelnom vezom dva punoupravljava, trofazna tiristorska mosta. U Prilogu su dati podaci o korišćenom MJS i tiristorskom pretvaraču. Merenja su obavljena na priključnim krajevima ispravljača i to uporedo preko elektronskog brojila i upotrebom vrlo preciznog analizatora snage LMG450, proizvođača Zes Zimmer [10]. Ispitivani su motorni i generatorski režimi rada pri različitim brzinama obrtanja MJS. U motornom režimu rada energija kočenja AM trošila se na kočionom otporniku R_b , dok je u generatorskom režimu rada energija rekuperacije vraćena u napojnu mrežu regulacijom ugla paljenja tiristorskog mosta. Za opterećenje je odabrana potencijalna karakteristika sa konstantnim momentom, tako da je četvorokvadrantni rad pogona u oba smera obrtanja dao identične rezultate u motornim, odnosno generatorskim režimima rada.

Očekivani rezultati merenja u motornom režimu rada daju pozitivne vrednosti aktivne i reaktivne snage, dok je u generatorskom režimu rada aktivna snaga na ulazu ispravljača

postala negativna. U sledećoj tabeli dati su uporedo rezultati merenja koji su dobijeni uz pomoć merne grupe i analizatora snage LMG450 za motorni i generatorski režim pri opterećenju od 3.8 Nm. Pri ovom opterećenju, u motornom režimu MJS je bio nominalno opterećen, dok je u generatorskom režimu rada (rekuperativno kočenje) struja motora bila manja od nominalne, a što je i očekivano imajući u vidu tokove snaga u pogonu.

Tabela 1. Rezultati poređenja merenja merne grupe (brojila) i preciznog analizatora snage.

	Motorni režim		Generatorski režim	
	Merna grupa	LMG450	Merna grupa	LMG450
$V_{RMS}[V]$	215.05	215.86	217.05	217.35
$I_{RMS}[A]$	9.77	9.766	6.111	6.08
$P[W]$	954.96	985.2	-370.61	-412.3
$Q[VAR]$	1680.83	1701.611	1097.04	1077.98
$S[VA]$	2101.04	2108.1	1326.39	1323.5
$D_B[VAR]$	822.94	793.9	646.89	647.7

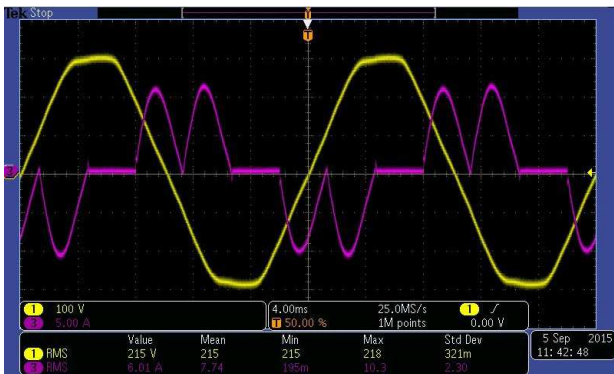
Do razlike u izmerenim vrednostima od strane merne grupe i analizatora snaga dolazi usled postojanja merne greške. Naime, dobro je poznato da se merne grupe projektuju sa klasom tačnošću 0.2S odnosno 0.5S za aktivnu snagu [10] dok se reaktivna snaga meri sa tačnošću 2 odnosno 3 [10]. Analizator snage LMG450 je znatno precizniji instrument - klase 0.07 za aktivnu snagu i 0.1 za reaktivnu snagu za signale u opsegu od 45 – 65Hz [11].

Ilustracija izobličenja struje koju unosi ovakav nelinearni potrošač vidljiva je iz rezultata za snagu izobličenja D_B , (Tabela 1) koja je po vrednosti istog reda veličine kao i aktivna snaga i oko 50% od reaktivne snage. Još jasniji prikaz dat je na slikama 3. i 4. gde su prikazani talasni oblici struje i napona jedne faze na priključcima pretvarača.

Talasni oblik struje označen je ljubičastom bojom. Interesantno je primetiti da napon napajanja ima talasni oblik koji odstupa od sinusnog, a što je poledica da su merenja obavljena u laboratoriji Fakulteta gde su prisutni brojni nelinearni potrošači (računari, fluo svetiljke) što je i dovelo do izobličenja napona. Rezultati iz Tabele 1 potvrđuju da se predložena metoda modifikacije standardnih elektronskih brojila može uspešno primeniti za registraciju snage izobličenja izrazito nelinearnih potrošača, kakvi su na primer tiristorski napajani elektromotorni pogoni, podjednako precizno u motornim i generatorskim režimima rada.

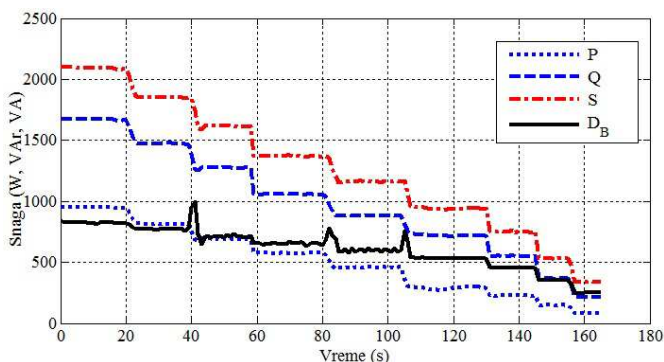


Sl. 3. Talasni oblik struje i napona elektromotornog pogona u motornom režimu.



Sl. 4. Talasni oblik struje i napona elektromotornog pogona u generatorskom režimu.

Uobičajeno, elektromotorni pogoni rade sa promenljivim opterećenjem, bilo da je to usled promene momenta na osovini ili usled promene brzine obrtanja. Kao ilustraciju upotrebljivosti predloženog koncepta merenja izvršeni su eksperimenti pri promenljivom momentu opterećenja. Dijagram potrošnje u vremenskom intervalu kada je elektromotorni pogon u motornom režimu, pri promeni opterećenja u koracima od 0,5Nm počevši od 3.8Nm prikazan je na Sl. 5.

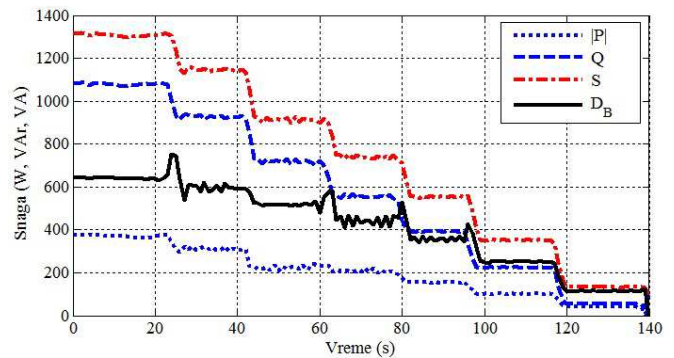


Sl. 5. Dijagram potrošnje elektromotnog pogona – motorni režim.

Kao što se može uočiti sa Sl. 5, snaga izobličenja je po vrednosti veća od aktivne snage u svim slučajevima sem na početku kada je opterećenje bilo maksimalno 3.8Nm. Takođe je interesantno primetiti da se razlika između vrednosti reaktivne snage i snage izobličenja smanjuje sa smanjenjem opterećenja, a što ukazuje na činjenicu da pri opterećenjima koja su manja od nominalnog do izražaja dolaze nelinearni efekti kao posledica prekidnih struja pretvarača.

Na Sl.6 prikazan je dijagram potrošnje u vremenskom intervalu kada elektromotorni pogon radi kao generator. Registrovana aktivna snaga je po znaku bila negativna (generatorski režim), ali je na ovom dijagramu prikazana njena apsolutna vrednost. I u ovom slučaju opterećenja pogona se menjalo u koracima od 0,5Nm počevši od 3.8Nm. Očigledno je da se vrednost snage izobličenja menja po približno istom trendu kao u slučaju kada elektromotorni pogon radi u motornom režimu. Na ovaj način potvrđena je mogućnost korišćenja standardne merne grupe za registraciju snage izobličenja u svim režimima rada elektromotornog pogona, a pri promenljivom opterećenju. Jednostavna i ekonomski opravdana modifikacija merenja koja je moguća i na postojećim elektronskim brojlama dozvoljava operaterima distributivne mreže registraciju značajnih nelinearnih

potrošača kao što su to elektromotorni pogoni sa tiristorskim pretvaračima.



Sl. 6. Dijagram potrošnje elektromotnog pogona – generatorski režim.

5. ZAKLJUČAK

Prisustvo viših harmonika struje u EE mreži ima izuzetno nepovoljan uticaj na elemente EE sistema. Budući da su standardno oni projektovani da optimalno rade na osnovnoj frekvenciji od 50Hz, viši harmonici izazivaju dodatnu disipaciju, značajno smanjuju životni vek opremi i dovode do brojnih drugih problema [12, 13, 14].

Savremeni elektromotorni pogoni projektuju se u skladu sa zahtevima povećanja energetske efikasnosti, pa stoga vrlo često imamo situaciju da se deo energije može vratiti napojnoj EE mreži. Osim ekonomskog aspekta smanjenja potrošnje, ovi potrošači unose nelinearne efekte koji su povezani sa utiskivanjem struja koje su izrazito bogate višim harmonicima. Korišćenja obnovljivih izvora energije u industriji i domaćinstvu dovešće do toga da sve veći broj postrojenja imaju reverzibilnu prirodu, odnosno da ne budu samo pasivni potrošači, nego da proizvode energiju i da višak vraćaju u EE mrežu. Zato je važno da se kvantifikuje nelinearna komponenta koja se unosi u EE mrežu. Najjednostavnije rešenje predstavlja modifikovanje standardnih elektronskih brojila na način opisan u [7]. Ovaj uređaj primenili smo za merenje utrošene i generisane snage na jednom reverzibilnom industrijskom elektromotornom pogonu.

Rezultati merenja prikazani u ovom radu potvrđuju da komponenta snage koja nastaje kao posledica nelinearne prirode savremenih tiristorskih ispravljača, odnosno invertora napona nije zanemariva. Zbog toga je potrebna registracija ove vrste potrošnje, ne samo iz razloga penalizacije potrošača, nego imajući u vidu potrebu da kompenzacijom viših harmonika u cilju suzbijanja njihovog šireg uticaja. Prostiranje harmonika kroz EE sistem može da se smanji primenom raznovrsnih aktivnih i pasivnih uređaja na mestu priključenja potrošača [15] (*PCC- Point of Common Coupling*). Ova intervencija nije jeftina, a njena optimalna implementacija zahteva ozbiljnu tehno-ekonomsku analizu.

Sa druge strane, distributeri električne energije mogu da redukuju gubitke nastale usled korišćenja nelinearnih potrošača ukoliko promene tarifni sistem i stimulišu potrošače da implementiraju sistem za aktivnu kompenzaciju harmonika [15]. Upravo je cilj ovog rada da ukaže na postojanje problema i potrebu promene politiku naplate, pri čemu je ponuđeno jeftino rešenje koje se može primeniti na

postojećim mernim grupama (brojilima), a bez značajnih investicionih ulaganja.

PRILOG

Podaci o motoru jednosmerne struje: 220VDC, 12A, 1,95kW, 2860o/min, pobuda: 200VDC, 0,61A.

Tiristorski ispravljač: Siemens 6RA7013-6DV62-0 (3x400VAC, 13A), ulazne prigušnice 3x1,4mH.

6. LITERATURA

- [1] International Energy Agency, "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries and Energy Statistics of OECD Countries, and United Nations, Energy Statistics Yearbook"
- [2] Eurelectric, Power Statistics 2010, Full report, page 16
- [3] M. Clemence, R. Coccioni, A. Glatigny, "How utility electrical distribution networks can save energy in the smart grid era", Schneider Electric, April 2013
- [4] P. Petković, D. Stevanović, "Detection of power grid harmonic pollution sources based on upgraded power meters", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, No. 3, 2014, pp. 163-168
- [5] M. Dimitrijević, V. Litovski, "Power Factor and Distortion Measuring for Small Loads Using USB Acquisition Module", *Journal of Circuits Systems and Computers*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, August, 2011, Vol. 20, No. 5, pp. 867-880
- [6] D. Stevanović, P. Petković, "The Efficient Technique for Harmonic Sources Detection at Power Grid", *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, pp. 196-199, ISSN 0033-2097
- [7] D. Stevanović, P. Petković, "A Single-Point Method for Identification Sources of Harmonic Pollution Applicable to Standard Power Meters", *Electrical Engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 165-174, June 2015.
- [8] http://www.maxim-ic.com/solutions/smart-electricity-meters/index.mvp/pl_pk/62
- [9] IEC 62053-22 Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S).
- [10] IEC62053-23, "Electricity metering equipment (a.c.) - Particular requirements - Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3)," 2003.
- [11] LMG450 Multi Channel Power Analyzer, Dostupno na: <http://www.zes.com/en/Products/Precision-Power-Analyzer/LMG450>, [Pristupljeno jul 2015]
- [12] G.K. Singh, "Power system harmonics research a survey", *European Transactions on Electrical Power*, vol.19, pp. 151-172, 2007
- [13] Integral Energy Power Quality Centre: "Technical note No. 3 - Harmonic Distortion in the Electric Supply System," University of Wollongong, <http://goo.gl/8QpwdO>, March 2000. [April 8. 2015].
- [14] D. Stevanović, P. Petković, "Harmonics in Power System Problems and Solutions (in Serbian*)", Proc. of XII International Scientific Symposium INFOTEH@-JAHORINA 2013, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 20. mart - 22. mart, 2013, pp. 203-208.
- [15] ABB, "ABB's ACTIVE HARMONIC COMPENSATION systems," <https://goo.gl/XdtWYZ>, March 2012., [Pristupljeno avgust 2015]

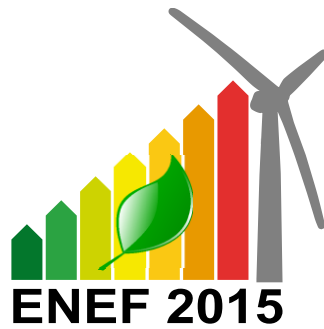
ZAHVALNOST

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekata TR32004 i III44004 čiju realizaciju finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Abstract – The aim of this paper is to highlight the need to adapt measuring equipment to the changed profile of the power system industrial loads. Wide use of power converters as typical nonlinear loads questioned the justification of the existing registration method of power consumption. Nonlinear loads current waveform deviates from ideal sine wave causing part of the supplied energy remains invisible, which, among other things, leads to significant power losses. To solve this problem, it is necessary to detect and quantify the amount of distortion caused by nonlinear loads. In this paper we show, for the first time, the experimental measurement of distortion power measured at the terminals of a four-quadrant DC motor drive. Verification of the proposed algorithm for distortion power measurements performed in both operating modes: when working as a motor (consumer) and generator (motor braking and generating active power at terminals). For this purpose it is used, a standard measurement group modified according to an original idea by the authors. The measurement results are compared with those obtained from precise power analyzer.

CHARACTERIZATION OF A FOUR-QUADRANT DC MOTOR DRIVE USING MODIFIED STANDARD MEASUREMENT GROUP

Dejan Stevanović, Milutin Petronijević, Predrag Petković



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2015
25 - 26. septembar, Banja Luka

Sesija C2

Sesija C2

Jovan P. Šetrajčić, Igor J. Šetrajčić, Siniša M. Vučenović, Danijela Bradić EFIKASNOST FOTOTERMALNIH KONVERTORA SA NANOFILM-PREVLAKAMA	125
Borisav Jovanović, Predrag Petković, Milunka Damjanović, Vančo Litovski MINIMIZACIJA DINAMIČKE POTROŠNJE IP BLOKA MIKROKONTROLERA	128
Srđan Đorđević, Marko Dimitrijević, Dejan Stevanović, Slobodan Bojanić NOVI METOD ZA DETEKCIJU DOGAĐAJA U NEINVAZIVNOM MONITORINGU POTROŠNJE	132
Maja Popovic, Marius Graneas, Donn Morrison, Branko Dokic IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF MICROCONTROLLERS	136

EFIKASNOST FOTOTERMALNIH KONVERTORA SA NANOFILM-PREVLAKAMA

Jovan P. Šetrajčić i Igor J. Šetrajčić, *Univerzitet u Novom Sadu, PMF, Departman za fiziku, Vojvodina – Srbija*
 Siniša M. Vučenočić, *Univerzitet u Banjoj Luci, PMF, Katedra za fiziku, Republika Srpska – BiH*
 Danijela Bradić, *Univerzitet u Banjoj Luci, ETF, Katedra za fiziku, Republika Srpska – BiH*

Sadržaj – U radu su predstavljene solarne ćelije za fototermalnu konverziju Sunčeve energije, sa aspekta potencijalne mogućnosti povećanja njihove relativno male efikasnosti upotrebom/nanošenjem ultratankih film-prevlak na spoljašnje površine solarne ćelije. Rezultati istraživanja ponašanja fononskog podsistema u ultratankim metalo-oksidskim filmovima pokazuju pojačanje amplitude i energije oscilovanja kristalne rešetke na graničnim površinama, a time i povećanje toplotne provodnosti.

1. UVOD

U ovom radu će se analizirati doprinos nanostrukturnih materijala za povećanje energetske konverzije kod fototermalnih solarnih ćelija.

Stepen korisnog dejstva ovog tipa solarne ćelije zavisi od sledećih uticaja [1–3]:

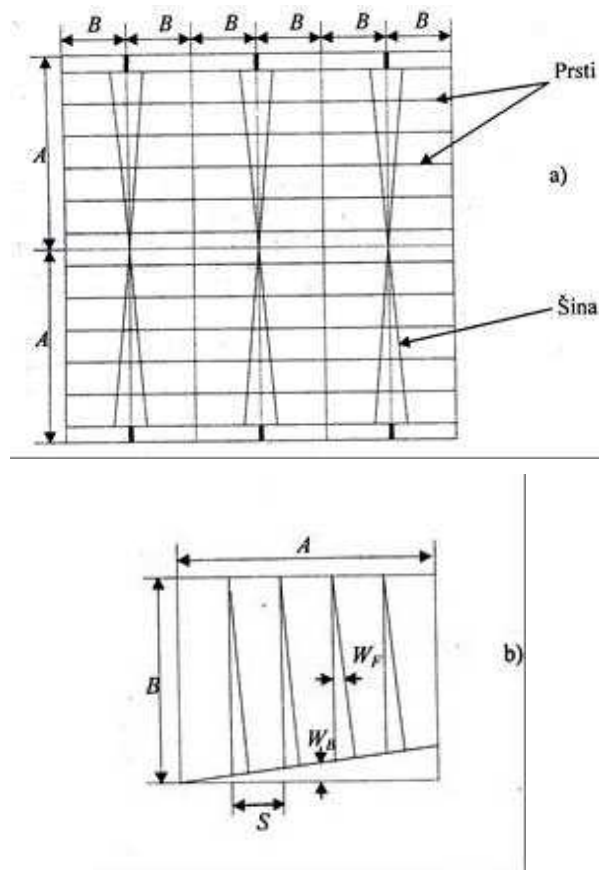
- 1) Malog koeficijenta transformacije elektromagnetne u toplotnu energiju unutar konvertorskog uređaja; ovo je najveći problem i on diktira efikasnost fototermalne konverzije ispod 30 %.
- 2) Refleksije zraka, posebno u IC oblasti, na površini ćelije; gubitak energije pre konverzije u toplotu može se smanjiti na ispod 3 % nanošenjem antirefleksionog sloja.
- 3) Debljine solarne ćelije; osetljivi deo ćelije nije dovoljno debeo da bi se apsorbovali svi fotoni, pa se jedan broj gubi, bilo tako što se apsorbuje na zadnjem kontaktu ili što prolazi kroz ćeliju; ovaj gubitak se može smanjiti ispod 1 % izborom reflektujućeg zadnjeg kontakta, koji vraća fotone u telo konvertora.

Poznata je činjenica da se odgovarajućim dizajnom može optimizovati efikasnost solarne ćelije, mi ćemo prikazati najperspektivniji model. Pored toga, naša hipoteza je da se i odgovarajućim metalo-oksidskim premazima nanoskopskih dimenzija, pogotovo sa donje strane konvertora, ova efikasnost može znatno povećati.

2. OPTIMIZACIJA SOLARNIH ĆELIJA

Postoji nekoliko mehanizama gubitaka snage udruženih sa gornjom kontaktnom površi solarne ćelije. Ovo su gubici prouzrokovani u serijskom otporu metalnih traka i kontaktnom otporu između ovih traka i poluprovodnika. Konačno, ovo su gubici prouzrokovani u senci provodnika kod ovih ćelija. Zato je značajna oblast dizajna solarne ćelije upravo – dizajn gornje metalne kontaktne rešetke. U ovom delu biće razmotren dizajn kontakta za kvadratne ili pravougaone solarne ćelije [3]. Za zajednički dizajn kontakta, dva tipa metalnih elemenata mogu biti poistovećeni kao što je naznačeno na sl.1a. Šine su relativno teške oblasti metalizacije direktnih kontakata kod spoljašnjih primesa u ćeliji. Prsti su

fini elementi koji ukupnu, kolektivnu struju isporučuju u šinu. Simetrične kontaktne šeme (takve kao na slici 1a) mogu biti dole prekinute jedinične ćelije (kao na slici 1b).



Sl. 1: Šema dizajna gornjeg kontakta (a) i tipična jedinična ćelija (b)

Maksimum snage izlaza ove jedinične ćelije može biti dobijen kod $ABJB_{mpB}VB_{mpB}$, gde je AB oblast jedinične ćelije, a JB_{mpB} i VB_{mpB} predstavljaju gustinu električne struje i napon, respektivno, u tački maksimalne snage [4]. Specifična otpornost prouzrokovana u prstima i šinama može biti izračunat korišćenjem integralnog prilaza koristeći izračunatu prouzrokovanu snagu u gornjem sloju ćelije:

$$p \equiv \frac{P_{\text{prouz}}}{P_{\text{mp}}} = \frac{\rho_s S^2 J_{\text{mp}}}{12 V_{\text{mp}}} \quad (1)$$

gde ρ_s – predstavlja slojna specifična otpornost. Normalizacija maksimuma izlaza jedinične ćelije rezultuje:

$$p_{rf} = \frac{1}{m} B^2 \rho_{smf} \frac{J_{\text{mp}} S}{V_{\text{mp}} W_f} \quad (2)$$

$$p_{rb} = \frac{1}{m} A^2 B \rho_{smb} \frac{J_{\text{mp}}}{V_{\text{mp}} W_f}$$

za frakcioni otpor prouzrokovane snage u prstima i šinama, respektivno, a ρ_{smf} i ρ_{smb} su slojni specifični otpori kontaktnog metalnog sloja za prste i šine. Vrednost faktora m je 4 ako je respektivni element linearno sužen i 3 ako je podjednake širine. WB_{FB} i WB_{BB} su prosečne širine prstiju ili šina unutar ćelije, a S je razmak (prored) između prstiju, kao što je prikazano na slici 1b.

Delimični gubici snage zbog „bacanja“ senke pomoću prstiju i šina su:

$$p_{sf} = \frac{W_F}{S}; \quad p_{sb} = \frac{W_B}{B} \quad (3)$$

Zanemarivanjem struje koja teče direktno od poluprovodnika do šine, gubitak kontakata otpora postoji jedino usled prstiju. Delimični gubitak snage usled ovog efekta je jedna generalna aproksimacija:

$$p_{cf} = \rho_{mf} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{S}{W_F} \quad (4)$$

Optimalne dimenzije šine se mogu odrediti sumiranjem odgovarajućih jednačina i diferenciranjem po WB_{BB} . Rezultat daje da se optimalna vrednost dešava kada je gubitak usled otpornosti jednak njegovom gubitku usled senčenja:

$$(p_{rb} + p_{sb})_{\min} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{smb}}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (5)$$

$$W_B = AB \sqrt{\frac{\rho_{smb}}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}}$$

Ovo ukazuje na to da su gubici snage oko 13% niži kada se koristi "zašiljena" (konusna) šina ($m = 4$) pre nego šina konstantne širine ($m = 3$).

3. ULOGA ULTRATANKIH PREVLAKA

U najopštijem slučaju efikasnost solarne konverzije može se dovesti u direktnu vezu sa oscilacijama jona kristalne rešetke: što su ovi efekti izraženiji, veća je i efikasnost solarne ćelije.

Odmah se postavlja pitanje kako povećana efikasnost solarne konverzije može biti posledica prisustva ultratankih film-prevlaka, jer prevlaka u suštini predstavlja dodatnu „barijeru“ i „smetnju“ toplotnom fluksu kao posledici fononskog transfera. Verujemo da odgovor leži kao u posebnostima mehaničkog oscilovanja jona premaza. Naime, moguće je napraviti potpunu analogiju tankih elektrodnih premaza sa ultra-tankim filmovima. Na osnovu saznanja o osobenostima uloge fononskog podsistema ultratankih filmova, što je i referisano u prethodnim radovima [6–9], ovde će biti predstavljen ovaj mehanizam povećanja efikasnosti solarne konverzije.

Kvantno-mehaničko razmatranje prostiranja malih mehaničkih oscilacija, tj. fonona i termodinamičko ponašanje ultratankog filma istraženo je i referisano u našim prethodnim radovima [5–8] najbitniji rezultati se mogu rezimirati u nekoliko sledećih stavki.

1) Spektar dozvoljenih energija akustičkih fonona je diskretan i poseduje gep, što je odlika optičkih fonona i posledica postojanja vrlo ograničene debljine¹ film-strukture.

2) Srednje vrednosti kvadrata pomeraja i kvadrata impulsa zavise od prostornog položaja i određene su date izrazima:

$$\langle u_n^2 \rangle = \frac{\hbar}{M} \frac{1}{N_x N_y} \frac{1}{N_z + 2} \sum_{k_x, k_y} \sum_{\mu=1}^{N_z+1} \frac{1}{\omega_{k_x, k_y, \mu}} \cdot \sin^2(n_z + 1) \frac{\pi\mu}{N_z + 2} \coth \frac{\hbar\omega_{k_x, k_y, \mu}}{2\Theta}; \quad (6)$$

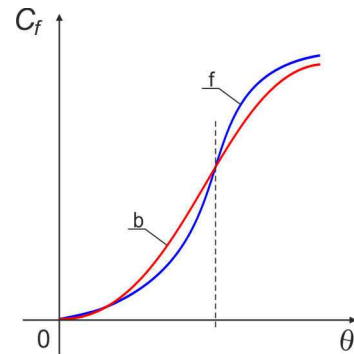
$$\langle p_n^2 \rangle = \frac{\hbar M}{N_x N_y (N_z + 2)} \sum_{k_x, k_y} \sum_{\mu=1}^{N_z+1} \omega_{k_x, k_y, \mu} \cdot \sin^2(n_z + 1) \frac{\pi\mu}{N_z + 2} \coth \frac{\hbar\omega_{k_x, k_y, \mu}}{2\Theta}, \quad (7)$$

iz kojih se vidi da ona predstavljaju izraze za stojeće talase, pri čemu se trbusi nalaze na graničnim površima filma, što ukazuje da atomi na tim ravnima imaju najveću energiju i amplitudu oscilovanja.

3) Zavisnosti redukovane specifične toplote ultratanke [7,8]:

$$C_f = \frac{3}{2\pi} \frac{\Delta^2}{E_0^2} \left[\frac{\Delta}{\theta} (e^{\Delta/\theta} - 1) + 3Z_1(\Delta/\theta) + 6 \frac{\theta}{\Delta} Z_2(\Delta/\theta) + 6 \left(\frac{\theta}{\Delta} \right)^2 Z_3(\Delta/\theta) \right], \quad (8)$$

(gde je $\theta = k_B T$) i balk film-strukture od temperature poseduju dva preseka (sl. 2) i da je na višim temperaturama (sobnim i nešto iznad njih): $C_f > C_b$.



Sl. 2: Temperatursko ponašanje toplotne kapacitivnosti balk (b) i film-strukture (f)

Ovo pokazuje da su ultratanki filmovi u toj temperaturnoj oblasti bolji toplotni provodnici.

Nadalje, ovo nam daje pravo da zaključimo da bi fototermaalni konvertori imali veći stepen iskorišćenja ukoliko bi sa donje strane bili „presvučeni“ nekim nanoslojnim metal-oksidsnim materijalom, jer bi efikasnije provodili/odvodili na kolektorima izdvojenu toplotu. Ovo je u skladu sa rezultatima prikazanim u radovima [9–11].

4. ZAKLJUČAK

U fononskom podsistemu ultratankih filmova, odgovorom za mehaničke osobine, dolazi do pojave pojačanog oscilovanja i formiranja stojećih talasa. Usled pojačanja fononskog uticaja za očekivati je i njihovo pozitivno

¹ Ovaj efekat u literaturi poznat je kao boks kvantizacija ili efekat dimenzionog kvantovanja

delovanje na veličinu jon-fonon interakcije, jer znatniji deo mehaničke energije ide na ovo povećanje. Usled toga možemo zaključiti da bi odgovor na mehanizam bolje efikasnosti toplotnog transporta mogao da bude u pozitivnom uticaju vibracija kristalne rešetke metalo-oksidnih prevlaka donjeg dela solarnog fototermalnog konvertora.

Na taj način fototermalni konvertorski sklop ima perspektivu da efikasnost postojećih solarnih ćelija – adekvatnom upotrebom gornjih i donjih nanoskopskih prevlaka, poveća i preko 50 %. Ovaj rezultat treba shvatiti samo uslovno, više kvalitativno nego kvantitativno, jer se bazira na proceni povećanja fundamentalne termodinamičke karakteristike – specifične toplote film-struktura i činjenice da se toplotni transfer opisuje istom karakteristikom. Ovde nisu uzeti u obzir, odnosno – zanemareni su, gubici toplote usled refleksije toplotnog fluksa na granici spoja kolektor-prevlaka, a i eksperimentalnih saznanja iz citirane literature. Pravilan rezultat usledio bi tek nakon sprovedenih sopstvenih eksperimentalnih istraživanja.

Zahvalnica

Istraživanja čiji su rezultati ovde prezentovani, finansijski su pomognuta od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ON-171039 i TR-34019), te od Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srpske (19/6-020/961-23/14), kao i Sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj APV (114-451-2048).

5. LITERATURA

- [1] J.-M. Tarascon, M. Armand, *Nature* 414 (2001) 359-367.
- [2] P.L. Taberna, S. Mitra, P. Poizot, P. Simon & J.-M. Tarascon, *Nature Materials* 5 (2006) 567-573.
- [3] S. Pejovnik, R. Dominko, M. Bele, M. Gaberscek and J. Jamnik, *Journal of Power Sources* 184/2 (2008) 593-597.
- [4] T. Pavlović, B. Čabrić: *Fizika i tehnika solarne energetike, Građevinska knjiga*, Beograd 2007.
- [5] J.P. Šetrajčić, V.M. Zorić, S.M. Vučenović, D.Lj. Mirjanić, V.D. Sajfert, S.K. Jaćimovski and D.I. Ilić, *Materials Science Forum* 555 (2007) 291-296.
- [6] J.P. Šetrajčić, D.Lj. Mirjanić, S.M. Vučenović, D.I. Ilić, B. Markoski, S.K. Jaćimovski, V.D. Sajfert and V.M. Zorić, *Acta Phys. Pol. A* 115 (2009) 778-782.
- [7] S.K. Jaćimovski, J.P. Šetrajčić, V.M. Zorić and D.I. Raković, *Tehnika – Novi materijali* 20/4 (2011) 533-538.
- [8] J.P. Šetrajčić, V.M. Zorić, N.V. Delić, D.Lj. Mirjanić and S.K. Jaćimovski, Phonon Participation in Thermodynamics and Superconductive Properties of Thin Ceramic Films, Chapter 15, pp. 317-348, In „Thermodynamics”, Ed.M.Tadashi, ISBN: 978-953-307-544-0, InTech, Vienna 2011.
- [9] J. Hong, Ch. Wang, U. Kasavajjula, *Journal of Power Sources* 162 (2006) 1289–1296.
- [10] Yoon Seok Jung, Andrew S. Cavanagh, Anne C. Dillon, Markus D. Groner, Steven M. George, and Se-Hee Leea, *Journal of The Electrochemical Society* 157/1 (2010) A75-A81.
- [11] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, J. Wiley & Sons, New York 2013.

Abstract – In this paper are presented the solar cells for photothermal conversion of solar energy, from the point of view of potential possibility of increasing their relatively low efficiency by using/laying ultrathin coatings on external surfaces of solar cell. The results of research of the behaviour of phonon sub-system in ultrathin metal-oxide films have shown an increase in amplitude and energy of oscillation of crystal lattice on border surfaces, and consequently an increase in thermal conductivity.

EFFICIENCY OF PHOTO-THERMAL CONVERTORS WITH NANOFILM COATINGS

Jovan P. Šetrajčić, Igor J. Šetrajčić,
Siniša M. Vučenović, Danijela Bradić

MINIMIZACIJA DINAMIČKE POTROŠNJE IP BLOKA MIKROKONTROLERA

Borisav Jovanović, Predrag Petković, Milunka Damnjanović, Vančo Litovski, *Elektronski Fakultet, Univezitet u Nišu.*

Sadržaj – Napredni metodi projektovanja digitalnih integrisanih kola, koji se oslanjaju na savremene nanometarske procese fabrikacije kola, primenjeni su pri projektovanju novog IP bloka 8051 mikrokontrolera, koji je namenjen za ugradnju u složene sisteme na čipu (SoC). U radu je razmatrana posebno dinamička potrošnja 8051 IP bloka.

1. UVOD

Smanjivanje potrošnje integrisanih kola donosi mnoge prednosti, spomenućemo samo neke od njih: veći stepen integracije sistema, smanjivanje površine čipa, smanjivanje učestalosti otkaza i samim tim, produženje radnog veka uređaja [1], [2]. Problemi vezani za snagu disipacije postaju još značajniji kada digitalno kolo treba da bude ugrađeno u složeni integrisani sistem na čipu (SoC), u kome drugi potrošači (kao što su A/D konvertori) imaju prioritet i teško ih je optimizovati sa stanovišta potrošnje [3].

Digitalna kola mogu se implementirati u različitim tehnološkim procesima. Od izbora tehnološkog procesa zavisi niz bitnih karakteristika, kao što su brzina rada, površina čipa i potrošnja. Često je neohodno, pre implementacije samog kola u nekom procesu, proceniti snagu disipacije i odabrati tehnološki proces tako da projektni uslovi budu ispunjeni a snaga disipacije i cena proizvodnje kola minimizovane.

Pri projektovanju kola metodom standardnih ćelija, koriste se različite tehnike za smanjivanje dinamičke i statičke komponente snage. One uključuju smanjivanje aktivnosti promene logičkih stanja na vezama u kolu, rad kola pri niskim vrednostima napona napajanja i frekvencije taktnog signala, simultanu upotrebu različitih biblioteka standardnih ćelija, isključivanje napona napajanja neaktivnih blokova, itd.

Mikrokontroler (MCU) predstavlja kompleksan digitalni sistem, koji je teško isprojektovati od nule. Zato mali razvojni centri obično počinju razvoj novog mikrokontrolera počevši od nekog javno dostupnog rešenja. Opisano je novo rešenje IP (*Intellectual Property*) bloka 8051 mikrokontrolera, čija je arhitektura prilagođena ugradnji u složena integrisana kola SoC. Pritom se kao početno rešenje koristi opis koji ima standardni 8051 skup instrukcija i namenjen je implementaciji na FPGA čipovima.

U radu je prikazana primena tehnika za smanjenje dinamičke potrošnje pri razvoju novog 8051 mikrokontrolera koji je namenjen ugradnji u SoC kola. Takođe, razmatran je uticaj skaliranja tehnološkog procesa na dinamičku potrošnju mikrokontrolera. Rezultati vezani za procenu snage disipacije dobijeni su implementacijom mikrokontrolera korišćenjem dva različita tehnološka procesa.

2. UZROČNICI POTROŠNJE U INTEGRISANIM KOLIMA

Kada su vrednosti napona napajanja i temperature konstantne, snaga disipacije integrisanog kola linearno se

uvećava sa porastom vrednosti taktne frekvencije. Ekstrapolacijom funkcije snage disipacije od frekvencije do nulte frekvencije dobija se vrednost snage koja je različita od nule i označava se kao statička snaga P_{static} . Komponenta snage koja je proporcionalna frekvenciji označava se kao dinamička snaga $P_{dynamic}$.

$$P = P_{dynamic} + P_{static} \quad (1)$$

Dinamička snaga se sastoji od unutrašnje snage, $P_{internal}$, i snage nastale usled promene logičkih stanja (prekidanja) na vezama, $P_{switching}$:

$$P_{dynamic} = P_{internal} + P_{switching} \quad (2)$$

Unutrašnja snaga uključuje snagu kratkog spoja P_{sc} i snagu nastalu usled promene stanja na vezama (i kapacitivnostima tranzistora) unutar standardnih ćelija $P_{int-switching}$:

$$P_{internal} = P_{int-switching} + V_{DD} I_{SC} \quad (3)$$

Snaga kratkog spoja P_{sc} je posledica kratkog spoja između napona napajanja i mase, tokom kratkog intervala kada PMOS i NMOS tranzistorske mreže istovremeno vode.

$$P_{sc} = \alpha \cdot f_{CLK} \cdot I_{SC} \left(\frac{t_r + t_f}{2} \right) V_{DD} \quad (4)$$

gde α predstavlja faktor aktivnosti prekidanja, f_{CLK} taktnu frekvenciju, I_{SC} intenzitet struje kratkog spoja, t_r i t_f vremena uspostavljanja rastuće i opadajuće ivice signala, a V_{DD} napon napajanja.

Na osnovu (4) se vidi da je P_{sc} direktno srazmerna struji kratkog spoja I_{sc} . P_{sc} je relativno mala i učestvuje u ukupnoj potrošnji do 20%. Snaga P_{sc} se smanjuje kada se smanjuje vreme rastuće i opadajuće ivice signala (jednačina (4)).

Snaga prekidanja $P_{switching}$ čini najveći deo dinamičke potrošnje. Nastaje usled punjenja i pražnjenja kapacitivnosti tokom promene logičkih stanja na izlazima digitalnih kola.

$P_{switching}$ se može izračunati kao:

$$P_{switching} = \alpha \cdot f_{CLK} \cdot C_L \cdot V_{DD}^2 \quad (5)$$

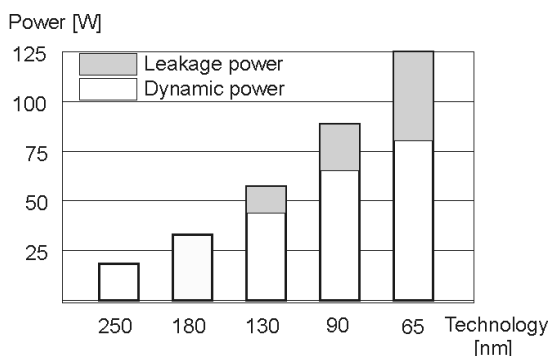
gde α predstavlja faktor aktivnosti prekidanja, C_L kapacitivnost kola, V_{DD} napon napajanja, f_{CLK} taktnu frekvenciju.

Jednačina (5) obuhvata nekoliko efekata. Prvo, C_L predstavlja srednju vrednost kapacitivnosti opterećenja, koje je povezano na izlaz logičkog kola. Zatim, snaga je skalirana faktorom prekidačke aktivnosti α , koja predstavlja verovatnoću promene logičkog nivoa na izlazu kola. Dinamička snaga raste sa povećanjem taktne frekvencije i proporcionalna je kvadratu napona napajanja V_{DD} .

Statička komponenta snage disipacije se uglavnom povezuje sa strujom curenja koja nastaje u MOS tranzistoru kada on radi u podpragovskom režimu [4]. Pored toga, analogni i mešoviti IP blokovi, koji su prisutni u kompleksnim integrisanim kolima, poput A/D konvertora,

izvora referentnog napona i konstantne struje, daju značajan doprinos ukupnoj statičkoj potrošnji kola [5].

U submikronskim tehnologijama smanjena je veličina tranzistora i raste udeo statičke snage u ukupnoj potrošnji kola. Uticaj skaliranja veličine tranzistora na udeo statičke potrošnje čipa prikazan je na Sl.1 (preuzeta iz [6]). Implementacija novih kola i postupaka za upravljanje statičkom potrošnjom je obavezno za sve čipove koji su izrađeni u tehnološkim procesima ispod 90 nm. Pri manjim dužinama kanala MOS tranzistora povećana struja curenja menja postupke projektovanja i utiče na performanse projekata. U nekim projektima statička potrošnja prelazi dinamičku potrošnju i postaje primarni izvor energije disipacije.



Sl. 1. Udeo statičke i dinamičke disipacije čipa koji je implementiran različitim tehnološkim procesima

3. PROJEKTOVANJE IP BLOKA 8051 MIKROKONTROLERA

Iako su 8051 mikrokontroleri odavno dostupni na tržištu kao diskretne komponente, danas se često koriste kao IP (*Intellectual property*) blokovi koji se ugrađuju u složene sisteme integrisane na čipu (SoC). Zbog manje površine čipa koju zauzimaju i uštede u snazi disipacije, IP jezgra 8051 mikrokontrolera se radije koriste umesto 32-bitnih procesora. 8051 jezgra, dostupna u obliku VHDL i Verilog opisa ili netliste standardnih ćelija, integrišu se u mnoge *Embedded* sisteme, od USB Flash memorija do kompleksnih bežičnih telekomunikacionih sistema. Mi smo to iskusili pri projektovanju Integrisanog merača potrošnje električne energije [3]. Jedan od blokova SoC kola Integrisanog merača jeste upravo 8051 IP blok. Takođe, kolo 8051 mikrokontrolera je ugrađeno u telekomunikacioni SoC [7].

U odnosu na originalnu verziju mikrokontrolera iz 1980. godine, savremena IP jezgra imaju unapređenu, bržu arhitekturu. Skup instrukcija je ostao isti. Brzina se ogleda u izvršenju instrukcija i znatno većoj taktnoj frekvenciji. Vreme izvršenja jedne 8-bitne instrukcije kod originalnog Intel 8051 je 12 taktnih ciklusa. Recimo, pri taktnoj frekvenciji od 12 MHz, MCU izvršava milion instrukcija u sekundi. Nasuprot tome, savremena 8051 jezgra izvršavaju jednu 8-bitnu instrukciju u samo jednom taktnom ciklusu i imaju maksimalnu taktnu frekvenciju od više stotina MHz.

Za polaznu osnovu u razvoju novog 8051 mikrokontrolera, koji je implementiran metodom standardnih ćelija, uzet je *Register transfer level* (RTL) opis [8] koji je prevashodno namenjen implementaciji na FPGA. Polazno rešenje sadrži osnovne perifernijske jedinice:

- komunikacioni modul - Asynchronous Universal Receiver/Transmitter (UART),
- kola tajmera/brojača
- digitalne ulazno/izlazne portove.

Da bi se ugradio u SoC [3], [7], originalni RTL opis kola je značajno izmenjen. Glavne promene se odnose na:

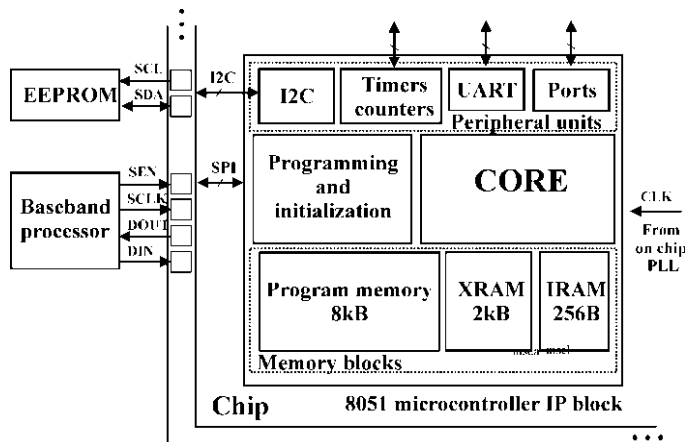
- dodavanje novih perifernijskih jedinica,
- zamenu memorijskih blokova,
- implementaciju novih metoda za programiranje i inicijalizaciju čipa.

Globalni plan novog 8051 mikrokontrolera je prikazan na Slici 2. Sastoji se od jezgra, memorijskih blokova, perifernijskih jedinica i bloka za programiranje i inicijalizaciju programskog kôda.

Ugradnja u SoC zahteva tri digitalna ulazno/izlazna paralelna porta, tri kola tajmera/brojača i nekoliko komunikacionih modula. U odnosu na rešenje [8], pored postojećeg UART bloka, implementirani su i ugrađeni u MCU novi komunikacioni moduli:

- Inter-integrated circuit (I2C) bloka i
- Serial protocol interface (SPI) bloka.

8051 mikrokontroler ima odvojene memorije za podatke i programski kôd. Programaska memorija je kapaciteta 8 kB. Pored nje, koriste se još i interna memorija za podatke – *Internal RAM* (IRAM) kapaciteta 256 B i eksterna memorija *External RAM* (XRAM), koja je kapaciteta 2 kB. Mikrokontroler poseduje još i skup specijalnih funkcijskih registara (*Special function register* -SFR) koji se realizuju D flip-flopovima.



Sl. 2. Globalna šema IP bloka mikrokontrolera

U cilju implementiranja čipa metodom standardnih ćelija, u mikrokontroler su ugrađeni novi SRAM blokovi. Naime, umesto ROM memorije, koja se koristi za smeštanje programskog kôda u početnoj (FPGA) verziji mikrokontrolera, nova verzija koristi SRAM memoriju, koja je napravljena od dva ASIC bloka kapaciteta po 4 kB. Memorijski blokovi za podatke – IRAM i XRAM sačinjeni su takođe od ASIC SRAM blokova. Umesto spoljašnje XRAM memorije, nova XRAM memorija je integrisana na čipu. U početnoj verziji IRAM se implementira od D flip-flova, dok je IRAM u novoj arhitekturi realizovan ASIC blokom, što značajno smanjuje površinu čipa i potrošnju.

Da bi se dalje smanjila cena fabrikacije SoC čipa, odlučeno je da IP blok mikrokontrolera ne koristi integrisanu EEPROM memoriju za trajno čuvanje programskog kôda. Umesto toga, koristi integrisanu SRAM memoriju i jedan

spoljašnji EEPROM čip, koji je povezan sa mikrokontrolerom preko I2C serijske magistrale.

U cilju implementacije novih metoda za programiranje i inicijalizaciju čipa, kreiran je novi blok za programiranje i inicijalizaciju programskog kôda (*Programming and initialization block- PIB*) koji je prikazan na Slici 2.

Blok PIB upravlja operacijom programiranja i inicijalizacije programske SRAM memorije iz spoljašnje EEPROM memorije. Svaki put nakon resetovanja, kada se kôd čita kroz serijski I2C interfejs i smešta u SRAM programsku memoriju, programska SRAM se kompletno inicijalizuje sadržajem EEPROM-a. MCU prihvata programski kôd kroz SPI interfejs i smešta programski kôd u obe memorije - integrisanu programsku SRAM memoriju i eksterni EEPROM čip.

Jezgro (CORE) obavlja operacije pribavljanja, dekodiranja i izvršavanja instrukcija. Sastoji se iz skupa logičkih blokova, aritmetičko-logičke jedinice (ALU) i SFR registara. Jedan od parametara, koji karakteriše brzinu mikrokontrolera jeste broj taktova po instrukciji (*Clocks per instruction* ili CPI faktor). Za optimizovani 8051 mikrokontroler CPI je jednak jednoj jednobajtnoj instrukciji koja se izvršava u dva takta ciklusa.

4. METODE OPTIMIZACIJE DINAMIČKE POTROŠNJE I REZULTATI IMPLEMENTACIJE

Nakon opisanih izmena u arhitekturi MCU-a koje se sprovede u cilju ugradnje IP bloka u ASIC kolo, funkcija mikrokontrolera je u potpunosti ostala očuvana u smi u da ispunjava osnovne projektne specifikacije čipa u koji se MCU ugrađuje. Međutim, sa stanovišta potrošnje mikrokontroler nije optimizovan. Problem prvo predstavlja uvećana dinamička potrošnja, koja nastaje disipacijom stabla taktog signala i podblokova jezgra.

Dalje modifikacije RTL opisa MCU-a su sprovedene na nivou kola i utiču na smanjenje dinamičke komponente snage disipacije. Postupak projektovanja za malu dinamičku potrošnju prikazan je na Sl. 3. Postupak projektovanja sastoji se od zadavanja specifikacija, postupka opisivanja kola na RTL nivou, postupaka sinteze i implementacije layout-a kola.

MCU specifications		Low power techniques	
Embedded software development	Hardware development		
		RTL core	RTL peripherals
RTL level verification		Optimization of combinatorial logic blocks	
Synthesis			
Implementation			
Design verification			

Sl. 3. Koraci u postupku projektovanja kola

Korišćene su sledeće tehnike projektovanja za malu potrošnju tokom RTL opisivanja i sinteze kola:

- gejtovanje signala takta [9],
- gejtovanje magistrala podataka,
- podela kontrolne logike na više manjih blokova i
- optimizacija kombinacionih logičkih blokova tokom postupka sinteze kola.

Mikrokontroler je implementiran korišćenjem dva tehnološka procesa:

- AMIS 350 nm [10] i

- Synopsys 90 nm [11]

Procesi koriste različite napone napajanja; u tehnologiji 350 nm koristi se napon od 3,3 V dok proces 90 nm koristi napon od 1,2 V. S obzirom da je 350 nm tehnologija najstarija, površina koju kolo zauzima je očekivano najveća a maksimalna taktna frekvencija je najmanja. Rezultati implementacije dobijeni u procesu 90 nm su značajno povoljniji.

Korišćeni su alati za projektovanje različitih proizvođača. Za tehnološki proces 350 nm korišćeni su Cadence alati za projekovanje, dok je za proces 90nm korišćen Synopsys. U oba rešenja, potrošnja se određuje nakon implementacije layout-a i sprovedenog postupka logičke verifikacije. Rezultati vezani za procenu potrošnje su precizni jer su dobijeni na osnovu konkretnog rasporeda ćelija i veza. Na kraju postupka implementacije *layout-a*, izdvojena je netlista standardnih ćelija i određene su vrednosti kašnjenja na svim vezama. Vrednosti kašnjenja se dobijaju na osnovu parazitskih kapacitivnosti i otpornosti veza, kao i modela potrošnje ćelija, koje su definisane u tehnološkim bibliotekama.

Netlista ćelija i vrednosti kašnjenja na vezama su neophodne za postupak logičke provere. Pored njih, koristi se još i mašinski programski kôd, dobijen kompajliranjem asemblerskog 8051 programa. Programski kôd i ulazni signali mikrokontrolera su sastavni delovi *Testbench* programa za testiranje. Testbench program simulira rad mikrokontrolera tokom izvršavanja različitih programa i tada se snima kompletna promena logičkih stanja na svim vezama *layout-a*. Kompletna aktivnost kola bitna za određivanje statičke i dinamičke potrošnje snima se u *Value charge dump* (VCD) fajl.

Nakon simulacije rada kola, VCD fajl se učitava u alat za implementaciju layout-a, koji generiše precizne rezultate o potrošnji za sve ćelije i memorijske blokove. Rezultati statičke i dinamičke potrošnje se onda grupišu za pojedine blokove.

Vrednost dinamičke komponente snage, za MCU jezgro koje je implementirano u 350 nm procesu, iznosi 7,88 mW pri frekvenciji takta od 4,194 MHz. Statička snaga je zanemarljivo mala u odnosu na dinamičku snagu. Kada se primene tehnike za smanjenje dinamičke snage, koje se zasnivaju na optimizaciji arhitekture i gejtovanju taktog signala, ukupna snaga se smanjuje na 3,930 mW. Ušteda u dinamičkoj potrošnji iznosi čak 50,1%.

Dobijene su informacije o energetsom budžetu kola i identifikovane su komponente sa uvećanom potrošnjom koje su ponovo optimizovane.

Korišćena su tri testna programa (TP). TP1 se sastoji od raznovrsnih asemblerskih instrukcija koje uključuju aritmetičke, logičke instrukcije, instrukcije prenosa podataka i grananja. TP2 se sastoji iz NOP instrukcija, dok TP3 sadrži aritmetičke instrukcije. Sprovedena analiza snage je pokazala da se tokom izvršavanja programa TP1 samo 10,7 % snage troši na operacije u ALU jedinici, a čak 89,3% u kombinacionim blokovima za dekodiranje instrukcija i za prenos podataka između ALU, registara i memorija. Maksimalna potrošnja je u primeru programa TP3 gde ALU jedinica troši 20,4% ukupne energije.

Simulacije kola su potvrdile značaj sprovedenih optimizacija:

- stvaranje posebnih magistrala SFR registara umesto korišćenja magistrala opšte namene,
- implementacije nove kontrolne logike koja sprečava nepotrebne promene stanja na magistralama podataka i adresnim magistralama koje imaju značajno kapacitivno opterećenje
- podele kontrolne logike na manje blokove.

Promenom tehnološkog procesa iz 350 nm u 90 nm pojavio se problem velike struje curenja. U 90 nm implementaciji, u primenama koje ne zahtevaju veliku količinu obrađenih podataka, statička snaga je dominantna nad dinamičkom snagom. Na primer, ukupna potrošnja kola iznosi 0,6286 mW na frekvenciji od 4,194 MHz. Statička snaga iznosi 0,3712 mW i čini 59,1% ukupne snage. Rezultati se odnose na jezgro mikrokontrolera i ne obuhvataju potrošnju RAM memorija.

Upoređeni su rezultati upotrebe tehnika za optimizaciju dinamičke snage kola. Rezultati su dobijeni korišćenjem dva procesa 350 nm i 90 nm. Simulirana dinamička snaga neoptimizovanog 90 nm rešenja je 0,5064 mW na taktnoj frekvenciji od 4,194MHz. Dinamička snaga optimizovanog rešenja iznosi 0,2574 mW. Dakle, u procesu 90 nm ostvaruje se smanjenje dinamičke snage od 49,2%. Ovaj rezultat je vrlo blizak vrednosti 50,1%, koja se dobija za 350 nm proces i ukazuje da se sa skaliranjem tehnološkog procesa ne menja stepen uštede u dinamičkoj potrošnji kada se isti optimizacioni postupci primenjuju u različitim procesima.

Promena tehnologije iz 350 nm do 90 nm smanjuje dinamičku snagu od vrednosti 3,930 mW na 0,2574 mW, što je smanjenje od 15,2 puta. S obzirom na to da postoje četiri tehnološka procesa između 350 nm i 90 nm, rezultati se slažu sa zaključkom iz [12] da se dinamička potrošnja približno smanjuje faktorom 0,5 pri promeni jedne generacije tehnološkog procesa. Maksimalna taktna frekvencija kola u 90 nm implementaciji je 60 MHz dok je odgovarajuća vrednost dinamičke potrošnje 7,9 mW.

5. ZAKLJUČAK

U radu je posebno analizirana dinamička potrošnja mikrokontrolera. Postupak optimizacije dinamičke potrošnje je sproveden na nivou arhitekture i na RTL nivou. Koriste se još tehnike gejtovanja taktnog signala i gejtovanja podataka. Jedan od doprinosa rada jeste razmatranje uticaja promene tehnološkog procesa na uštedu energije koja se dobija primenom tehnika za minimizaciju dinamičke snage. U tehnologiji CMOS 350 nm, nakon primene tehnika, ušteda u dinamičkoj potrošnji iznosi 50,1%. Kada se primene isti postupci za kolo implementirano u procesu 90 nm, dobija se ušteda od 49,1%. Može se izvesti zaključak da ušteda dinamičke potrošnje, sračunata u odnosu na potrošnju početnog - neoptimizovanog kola, ne zavisi od odabranog tehnološkog procesa. Osim toga, rezultati iz dva različita tehnološka procesa potvrđuju da se sa promenom jedne generacije procesa dinamička potrošnja smanjuje približno za 50%, što se poklapa sa zaključcima koji se mogu naći i u literaturi.

6. LITERATURA

- [1] J. Borgeson, S. Schauer and H. Diewald „Benchmarking MCU power consumption for ultra-low-power applications,“ Working paper, Texas Instruments, 2012
- [2] K. Mikhaylov and J. Tervonen, „Optimization of microcontroller hardware parameters for Wireless Sensor Network node power consumption and lifetime improvement,“ *Proc. of Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Moscow, Russia, 2010, pp. 1150-1156, IEEE, 2010
- [3] B. Jovanović, M. Damnjanović and P. Petković, „Digital Signal Processing for an Integrated Power Meter,“ *Proc. of 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universitat Ilmenau Germany, Vol. 2, pp.190-195, September 27-30, 2004.
- [4] P. Bipul, A. Agarwal and K. Roy, „Low-Power Design Techniques for Scaled Technologies,“ *Integration, The VLSI Journal*, Vol. 39, Issue 2, pp. 64–89, 2006.
- [5] V. Litovski, „Projektovanje elektroničkih kola,“ Udžbenik, Niš, March, 2000, ISBN 86-7369-015-3
- [6] M. Keating, D. Flynn, R. Aitken, A. Gibbons, K. Shi, „Low Power Methodology Manual, Springer, 2007.
- [7] LIME MICROSYSTEMS, <http://www.limemicro.com/products/field-programmable-rf-ics-lms7002m/>
- [8] A. Voggeneder, T51 MCU project (2012), <http://opencores.com/project,t51>
- [9] L. Benini, P. Siegel and G. D. Micheli, „Automatic Synthesis of Gated Clocks for Power Reduction in Sequential Circuits,“ *IEEE Design and Test of Computers*, Vol. 11, No. 4, pp. 32-40, 1994
- [10] AMIS, 350nm Standard cell technology library, 1998.
- [11] Synopsys, Synopsys 90nm Generic Library for Teaching IC Design, 2009
- [12] M. Hempstead, G. Y. Wei, D. Brooks, „Architecture and Circuits Techniques for Low Throughput, Energy-Constrained Systems Across Technology Generations,“ *Proc. of Int. Conference on Compilers, Architecture, and Synthesis for Embedded Systems (CASES 06)*, Oct. 23-25, 2006, pp. 368-378, IEEE, 2006

Abstract – Advanced methods for digital circuit design, based on modern nanoscale technologies, are applied to a novel SoC microcontroller design with the industry standard 8051 instruction set.

MINIMIZATION OF MICROCONTROLLER IP BLOCK DYNAMIC POWER CONSUMPTION

Borisav Jovanović, Predrag Petković, Milunka Damnjanović, Vančo Litovski

NOVI METOD ZA DETEKCIJU DOGAĐAJA U NEINVAZIVNOM MONITORINGU POTROŠNJE

Srđan Đorđević, Marko Dimitrijević, *Elektronski fakultet u Nišu*
Dejan Stevanović, *Inovacioni centar naprednih tehnologija, Niš*
Slobodan Bojanić, *Universidad Politécnica de Madrid, Španija*

Sadržaj – *Neinvazivni monitoring potrošnje električnih uređaja (NILM) evidentira potrošnju pojedinih uređaja u stambenom objektu na osnovu merenja dobijenih sa jednog senzora. U ovom radu predlaže se novi metod za detekciju događaja u NILM sistemima. Značajna osobina predloženog metoda je da se zasniva isključivo na podacima dobijenim od strane naprednog brojila. Navedeni su eksperimentalni rezultati koji demonstriraju efikasnost predloženog postupka u evidentiranju rada malih nelinearnih potrošača.*

1. UVOD

Za razliku od klasičnih brojila kod kojih se očitavnje potrošnje obavlja manuelno jedanput mesečno kod naprednih brojila se profil potrošnje potrošača obračunava i šalje u znatno kraćim vremenskim intervalima koji se mere delovima jednog sata. Dosadašnja praksa pokazuje da su tehnološke novine u naprednim brojilima u mnogo većoj meri koristile pružaocima usluga nego potrošačima. Korisnici najčešće nisu pokazivali interes za informacije kojima se može doprineti smanjenju potrošnje električne energije.

Da bi se potrošačima omogućilo efikasno upravljanje potrošnjom neophodno je pružiti im daleko više informacija od onih koje se dobijaju uz standardni račun za utrošenu električnu energiju. Rešenje ovog problema se najčešće traži u primeni postupaka za monitoring potrošnje električnih uređaja od kojih su najzastupljeniji metodi za neinvazivni monitoring potrošnje (Non-Intrusive Load Monitoring - NILM). Za realizaciju ovih metoda dovoljan je samo jedan merni uređaj na nivou domaćinstva. Ukoliko se informacije koje pruža NILM prezentuju na adekvatan način one mogu značajno da doprinesu aktivnom učešću korisnika u uštedi električne energije. Koristeći informacije koje daje ovaj sistem i napredno brojilo može se kreirati vizuelni prikaz utroška energije po pojedinim uređajima u domaćinstvu kao i prikaz utrošene električne energije po danima. Prema nekim istraživanjima ušteda koje se može ostvariti ukoliko se korisnicima dostavi ovakav vizuelni prikaz potrošnje je u opsegu od 5 do 15% po domaćinstvu.

NILM sistemi se pored svoje osnovne namene mogu koristiti i za kontrolu ispravnosti električnih uređaja koristeći činjenicu da se vrednosti elektroenergetskih parametara u pojedinim vremenskim intervalima mogu dovesti u vezu sa određenim potrošačima.

Predmet ovog rada su dva ključna koraka u svakom NILM sistemu, ekstrakcija parametara i klasifikacija uređaja. Predložen je novi metod za detekciju događaja uključenja ili isključenja uređaja koji se zasniva na istovremenom merenju tri veličine: aktivne, reaktivne i distorzion snage. Poznato je da metodi za detekciju događaja, koji primenjuju više različitih merenja istovremeno, takozvane klasterne, daju dobre rezultate [1-3].

Prilikom razmatranja efikasnosti predloženog postupka poseban akcenat je stavljen na detekciji malih nelinearnih potrošača iz dva razloga. Prvi razlog je činjenica da se potrošači iz ove kategorije najteže registruju postojećim NILM metodama. Drugi razlog je sve veća zastupljenost malih nelinearnih potrošača u domaćinstvima. Iako svaki od ovih uređaja ima zanemaru potrošnju električne energije njihov udeo u ukupnoj potrošnji nije više zanemaru imajući u vidu njihovu brojnost i raznovrsnost.

Rad je organizovan na sledeći način. Drugo poglavlje daje opis NILM sistema sa akcentom na statičkim NILM metodama. U trećem poglavlju je dat kratak opis predloženog metoda za detekciju događaja u NILM sistemu. Rezultati merenja prikazani su u četvrtom poglavlju.

2. SISTEM ZA NEINVAZIVNI MONITORING POTROŠNJE UREĐAJA

Realizacija NILM sistema se sastoji iz tri faze: akvizicije podataka, ekstrakcije parametara i klasifikacije uređaja. Prvi korak u realizaciji je akvizicija podataka koja se obavlja u naprednim brojilima ili specijalizovanim meračima ukoliko je neophodno obezbediti veću brzinu odmeravanja podataka. U sledećoj fazi se na osnovu prikupljenih podataka obavlja izdvajanje odgovarajućih veličina koje služe za karakterizaciju potrošača. Sastavni deo ovog stepena NILM sistema je je detekcija događaja kojom se evidentira da je neki od uređaja priključen ili isključen sa električne mreže. Tokom poslednje faze u realizaciji NILM sistema obavlja se klasifikacija uređaja pri čemu se najčešće primenjuju neuronske mreže sa nadgledanim obučavanjem.

Da bi se realizovala klasifikacija uređaja neophodno je unapred definisati skup veličina koje služe za karakterizaciju električnih aparata. Termin koji se koristi za ove veličine u NILM metodama je potpis uređaja (signature). Postoje dve osnovne kategorije potpisa uređaja: stacionarni i tranzijentni.

Stacionarni potpisi su karakteristike stacionarnih stanja u radu uređaja priključenih na električnu mrežu. Neke od veličina koje su korišćene kao stacionarni potpisi su: aktivna i reaktivna snaga, amplituda i srednja vrednost struje ili napona, harmonici struje, šum napona. Najšire korišćeni elektroenergetski parametar u NILM sistemima su aktivna i reaktivna snaga. Osnovni razlog ove činjenice je jednostavna hardverska realizacija sistema s obzirom da je za merne podatke iz kojih se sračunava srednja vrednost snage dovoljna niska frekvencija odmeravanja.

Tranzijentni potpisi predstavljaju karakteristike kratkotrajnih fluktuacija struja ili napona prouzrokovanih uključenjem uređaja. Primena tranzijentnih potpisa u monitoringu potrošnje uređaja zasniva se na činjenici da skup komponenata od koji je sastavljen bilo koji uređaj direktno određuje vremensku zavisnost struje u prelaznom režimu. Tranzijentni metodi imaju veću tačnost u odnosu na

stacionarne metode jer je količina informacija koja se dobija iz tranzijenata daleko veća od one koju daju stacionarni elektroenergetski parametri. Kompromis koji se pravi prilikom opredeljenja za metode zasnovane na analizi prelaznih stanja je cena jer podaci koje daje napredno brojiilo nisu dovoljni za realizaciju ovih postupaka već je neophodna ugradnja dodatnih uređaja. Jedan od značajnih problema ovih metoda predstavlja pouzdanost detekcije isključenja uređaja koja je nezadovoljavajuća za razliku od detekcije uključenja potrošača.

Određeni parametri elektroenergetske mreže (potpisi uređaja) mogu imati približno jednake vrednosti za više različitih uređaja što može značajno da oteža klasifikaciju uređaja. Sledi da efikasnost određenog NILM metoda u velikoj meri zavisi od tipa uređaja čiji se rad nadzire. Rešenje ovog problema se najčešće traži u istovremenoj primeni više različitih potpisa uređaja [4]. Ovaj pristup zahteva uvođenje dodatne procedure kojom se iz skupa mernih podataka izdvaja parametar na osnovu čije će se vrednosti realizovati klasifikacija uređaja. Cena uvođenja dodatnih procedura je povećanje složenosti metoda što posebno može doći do izražaja kada je broj potpisa uređaja koji se istovremeno prate veliki.

Najstariji metod za neinvazivni monitoring potrošnje električnih uređaja, koji je publikovao Hart u svom pionirskom radu [5], zasniva se na praćenju srednjih vrednosti aktivne i reaktivne snage. Prema proceduri koja je predložena u ovom radu najpre se evidentiraju skokovite promene aktivne i reaktivne snage uz primenu algoritama za detekciju ivica. Klasifikacija uređaja se obavlja mapiranjem priraštaja snaga u dvodimenzionalnu P-Q ravan gde se obavlja poređenje sa dvodimenzionalnim potpisima pojedinih uređaja.

Najveći problem u realizaciji ovog postupak predstavljaju moguća preklapanja dvodimenzionalnih potpisa uređaja u PQ ravni odnosno situacija kada su vrednosti aktivne i reaktivne snage za dva različita potrošača približno iste. Ovaj problem posebno dolazi do izražaja kod monitoringa potrošnje industrijskih postrojenja ili objekata sa velikim brojem različitih uređaja. Drugi značajan problem ovog metoda je definisanje vremenskog intervala u toku kojeg traje prelazni režim prouzrokovan priključenjem nekog od potrošača na mrežu. Otežavajuća okolnost je činjenica da vreme potrebno da se uspostavi stacionarno stanje nakon nekog događaja značajno varira zavisno od tipa uređaja koji je uključen ili isključen. Ukoliko je vreme potrebno da se uspostavi stacionarno stanje pogrešno procenjeno dobiće se netačne vrednosti za stacionarnu vrednost aktivne i reaktivne snage.

Polazeći od Hart-ovog algoritma zasnovanog na stepenastim priraštajima stacionarnih snaga razvijeno je više metoda koje uz dva postojeća elektroenergetska parametra, aktivne i reaktivne snage, uvode dodatne parametre radi prevazilaženja problema sa preklapanjem potpisa uređaja [1],[6],[7].

2.1. Detekcija događaja

Trenutak uključenja ili isključenja uređaja ili u opštem slučaju promena režima rada uređaja naziva se događaj. Ukoliko merenja na elektroenergetskoj mreži ukazuju na promene stacionarnih vrednosti parametara to nedvosmisleno

pokazuje da je određeni potrošač priključen na mrežu. Detekcija događaja nije obavezan korak u realizaciji NILM sistema. Procedura klasifikacije uređaja u NILM metodima koji nisu zasnovani na detekciji događaja realizuje se analizom svih dostupnih odmeraka snage. Posledica ove činjenice je manja efikasnost ovih NILM metoda u odnosu na metode koji su zasnovani na detekciji događaja.

Efikasnost procedura za detekciju događaja zavisi od vremenske zavisnosti snage prilikom korišćenja električnog uređaja. Električni uređaji se prema ovom kriterijumu mogu klasifikovati u sledeće četiri kategorije [5]: uređaje koji mogu biti u stanju uključeno-isključeno, uređaje koji su stalno uključeni, uređaje čiji se rad može modelirati konačnim automatom, uređaje kod kojih se snaga kontinualno menja.

Postoje dva pristupa u detekciji događaja, detekcija ivica i probabilistički pristup. Probabilistički pristup tretira događaj uključanja ili isključenja električnih uređaja kao statističku veličinu. Evidentiranje ovih događaja obavlja se na osnovu vrednosti odnosa uslovnih verovatnoća (Generalized likelihood ratio).

Metodi za detekciju događaja se zavisno od veličina koje se analiziraju mogu klasifikovati u stacionarne i tranzijentne. Realizacija metoda zasnovanih na analizi prelaznih stanja je znatno kompleksnija u odnosu na metode koji analiziraju stacionarna stanja. Pri izboru metoda za detekciju događaja neophodno je razmotriti da li bi cena NILM uređaja prevazišla ostvarenu dugoročnu uštedu u potrošnji električne energije.

Radi poboljšanja efikasnosti postupaka za detekciju događaja često se primenjuje više merenja različitih vreličina istovremeno. Rezultati ovih merenja se uobičajeno nazivaju klasteri. Metod koji su predložili Laughman i ostali [1, 2] primenjuje trodimenzionalni potpis uređaja u trodimenzionalnom prostoru čije su ose: priraštaj aktivne snage, priraštaj reaktivne snage i viši harmonik struje. Viši harmonici struje se dobijaju primenom kratkotrajne Furijeove transformacije (Short-Time Fourier Transform) koja se koristi za harmonijsku analizu nestacionarnih signala. Jedan od postupaka koji takođe primenjuje klasteru u detekciji događaja predložio Leeb [3]. Ovaj metod zasniva se na analizi tranzijenata.

3. NOVI METOD ZA DETEKCIJU DOGAĐAJA U NILM SISTEMIMA

Uporedo sa razvojem tehnologija energetske elektronike značajno je povećan broj nelinearnih potrošača električne energije. Struja koja protiče kroz nelinearne potrošače nema sinusoidalni talasni oblik što praktično znači da pored osnovnog harmonika sadrži i više harmonijske komponente. Usled uvođenja viših harmonijskih komponenata struje u elektroenergetsku mrežu mogu se javiti i izobličenja napona.

Nastale promene u strukturi potrošača nameću potrebu da se preispita efikasnost NILM metoda koji su predloženi u vreme kada je profil potrošača u elektroenergetskoj mreži bio drugačiji. Imajući u vidu sve veće prisustvo nelinearnih potrošača u domaćinstvima logično se nameće potreba da se harmonijska izobličenja u većoj meri iskoriste za monitoringa potrošnje uređaja.

Nadovezujući se na istraživanja koja imaju za cilj usavršavanje stacionarnog neinvazivnog monitoringa potrošnje uređaja mi smo u ovom radu razmotrili jedan novi

pristup. Predloženi metod predstavlja jedan u nizu NILM metoda koji polaze od Hart-ovog rešenja da se za monitoring potrošnje uređaja koriste priraštaji aktivne i reaktivne snage. Osnovna ideja predloženog NILM metoda je da se za detekciju rada uređaja primenjuju tri elektroenergetska parametra: aktivna, reaktivna i distorziona snaga. Ovo praktično znači da su pojedini potrošači okarakterisani u trodimenzionalnom prostoru čije su ose priraštaji aktivne, reaktivne i distorzionne snage. Ideja da se primeni trodimenzionalni potpis uređaja u NILM sistemu nije nova, ali je očekivana prednost predloženog postupka u odnosu na metode koji su do sada publikovani jednostavnost realizacije. Ova tvrdnja se zasniva na činjenici da se snaga izobličenja može odrediti bez dodatne merne opreme.

Usled prisustva nelinearnih potrošača proračun aktivne i reaktivne snage se komplikuje jer je neophodno uzeti u obzir više harmonijske komponente struja i napona. Aktivna i reaktivna snaga se u slučaju harmonijskih izobličenja mogu izraziti u funkciji snaga odnosno fazora pojedinih harmonika na sledeći način:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \approx \sum_{h=1}^M V_{RMS h} I_{RMS h} \cos(\theta_h) \quad (1)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \approx \sum_{h=1}^M V_{RMS h} I_{RMS h} \sin(\theta_h) \quad (2)$$

Gde su: P_h i Q_h aktivna i reaktivna snaga h -tog harmonika, $V_{RMS h}$ i $I_{RMS h}$ efektivna vrednost napona i struje h -tog harmonika, θ_h fazna razlika napona i struje h -tog harmonika.

Prividna snaga koja predstavlja proizvod efektivnih vrednosti napona i struje se takođe može izraziti u funkciji od efektivnih vrednosti pojedinih harmonika na sledeći način:

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \approx \sqrt{\left(\sum_{h=1}^M V_{RMS h}^2 \right) \cdot \left(\sum_{h=1}^M I_{RMS h}^2 \right)} \quad (3)$$

Za razliku od linearnih sistema kod kojih je kvadrat prividne snage jednak zbiru kvadrata aktivne i reaktivne snage u nelinearnim sistemima nije moguće uspostaviti relaciju koja bi sadržala samo ove tri veličine. Da bi rešio ovaj problem Baudeanu je polazeći od definicija aktivne, reaktivne i prividne snage uveo pojam distorzionne snage [7] koja je prouzrokovana harmonijskim izobličenjima:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (4)$$

Očigledno je da se snaga izobličenja može jednostavno izračunati na osnovu podataka koje daje bilo koji savremeni merač potrošnje električne energije. Harmonijska izobličenja napona se najčešće mogu zanemariti ukoliko se razmatra rad uređaja u domaćinstvu. Snaga izobličenja se u tom slučaju svodi na takozvanu strujnu distorzionu snagu:

$$D = V_{RMS1} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{RMS h}^2} \quad (5)$$

Događaj uključenja ili isključenja uređaja praćen je skokovitim promenama snage izobličenja kao i u slučaju aktivne i reaktivne snage. Za razliku od izmerenih priraštaja aktivne i reaktivne snage koje se mogu direktno dovesti u vezu sa promenom režima rada određenog potrošača vrednosti priraštaja snage izobličenja se moraju dodatno obraditi. Polazeći od pojednostavljenog izraza za snagu izobličenja (5) može se izvesti relacija koja povezuje nastali priraštaj snage sa određenim potrošačem:

$$D_P^2 = \left| D_2^2 - D_1^2 \right| \quad (6)$$

Gde su: D_2 i D_1 izmerene vrednosti ukupne snage izobličenja pre i nakon uključenja uređaja respektivno, D_P snaga izobličenja pojedinačnog potrošača koji je promenio režim rada.

4. REZULTATI MERENJA

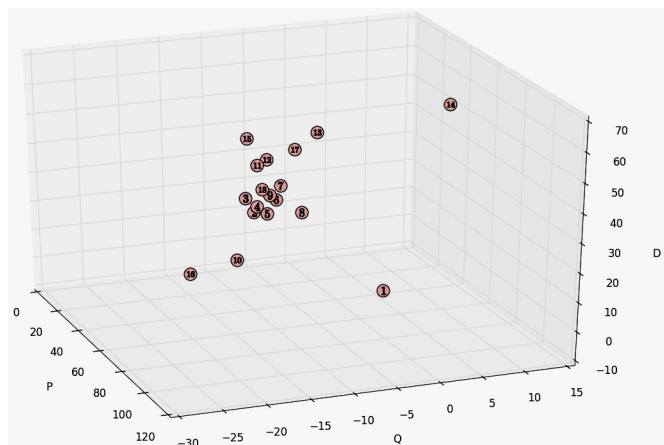
Merenja elektroenergetskih parametara sprovedena su na mernoj grupi koja ispunjava standarde IEC 62052-22 (proizvod firme EWG iz Niša). Ova merna grupa meri aktivnu i reaktivnu snagu kao i efektivne vrednosti struja i napona. Snaga izobličenja se mora sračunati.

Tabela I prikazuje skup uređaja koji su korišćeni za potrebe merenja. Vrednosti aktivne, reaktivne i distorzionne snage kada se određeni uređaj priključi na napajanje navedene su uz naziv uređaja [8,9]. Na osnovu prikazanih vrednosti snaga jasno se vidi da su za potrebe merenja odabrani mali nelinearni potrošači čija aktivna snaga ne prelazi 100 W.

Tabela 1: Rezultati merenja

	Load	P (W)	Q (VAR)	D (VAR)
1	Philips75W monitor	73,48	0,69	2,64
2	CFL lamp 18W	11,33	-5,80	11,99
3	EL 20W CFL tube	13,86	-7,15	18,34
4	ES 15W CFL bulb	12,10	-5,51	14,34
5	ES 9W CFL bulb	7,58	-3,64	9,58
6	LED Bulb 8W	9,70	-2,84	15,01
7	LED lamp 10W	12,89	-2,74	21,00
8	LED Bulb 6W	5,10	0,96	7,78
9	REF 10W	10,81	-3,75	17,30
10	CRT HM903 monitor	77,84	-17,11	20,94
11	Dell E2310H monitor	23,33	-7,06	32,86
12	BENQ G2220 monitor	20,13	-5,46	33,32
13	SAMSUNG 943N monitor	32,75	-1,24	45,22
14	DELL-Optiplex360 PC	61,09	10,24	59,37
15	LED32 Arielli ON	27,36	-8,87	43,77
16	LG 32LE5300 monitor	95,61	-24,86	24,82
17	CRT TV set	31,44	-3,73	39,56

Slika 1 prikazuje raspored odabarane grupe potrošača u trodimenzionalnom prostoru čije su ose aktivna, reaktivna i snaga izobličenja. Sa slike se jasno može uočiti da su trodimenzionalni potpisi grupe uređaja, koji su navdeni u tabeli 1, u dovoljnoj meri razdvojeni čime su stvoreni uslovi da se efikasno obavi klasifikacija uređaja. Ova procedura daje značajna poboljšanja u odnosu na Hart-ijev metod koji koristi dvodimenzionalni potpis uređaja u PQ ravni [10].



Sl. 1. Trodimenzionalni potpisi grupe nelinearnih potrošača male snage

5. ZAKLJUČAK

Značajna karakteristika predloženog NILM metoda za detekciju događaja je da koristi merenja tri veličine, takozvani trodimenzionalni klastering. Za razliku od svih do sada publikovanih klastering postupaka za detekciju događaja postupak koji je opisan u radu ne koristi tranzijentne parametre.

Rezultati merenja na grupi malih nelinearnih potrošača pokazuju da je relativno jednostavno razdvojiti pojedinačne potrošače u trodimenzionalnom prostoru čije su ose aktivna, reaktivna i distorziona snaga. Hardverski zahtevi za realizaciju predloženog NILM metoda su minimalni s obzirom da se svi potrebni podaci mogu dobiti od naprednog brojila i nije potrebno ulaganje u dodatnu opremu za akviziciju podataka.

6. LITERATURA

- [1] C. Laughman, D. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, „Advanced Nonintrusive Monitoring of Electric Loads,“ IEEE Power and Energy, pp. 56-63, 2003.
- [2] C. Laughman, D. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, „Power signature analysis,“ Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 1, no. 2, pp. 56 - 63, 2003.

- [3] S. Leeb, S. Shaw, J. Kirtley, „Transient event detection in spectral envelope estimates for nonintrusive load monitoring,“ Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 3, pp. 1200 -1210, Jul 1995.
- [4] J. Liang, S. Kendall, J. Cheng, „Load Signature Study Part II: Disaggregation Framework, Simulation, and Applications,“ IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 561-569, April 2010.
- [5] G. Hart, „Nonintrusive appliance load monitoring,“ IEEE Proc., vol 80, pp. 1870-1891, 1992.
- [6] H.-h. Chang, C.-l. Lin, and J.-k. Lee, „Load identification in nonintrusive load monitoring using steady-state and turn-on transient energy algorithms,“ 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, pp. 27-32, April 2010.
- [7] F. Sultanem, „Using appliance signatures for monitoring residential loads at meter panel level,“ IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1380-1385, 1991.
- [8] C. I. Budeanu, „Reactive and Fictitious Powers,“ Rumanian National Institute, No. 2, 1927.
- [9] D. Stevanović, P. Petković, „Sistem za detekciju monofaznih potrošača koji unose harmonijska izobličenja,“ Zbornik LVIII konferencije ETRAN, jun 2014.
- [10] D. Stevanović, P. Petković, „Unapređenje sistema za registrovanje potrošnje električne energije,“ Zbornik LVII konferencije ETRAN, jun 2013.
- [11] S. Djordjević, S. Bojanić, M. Dimitrijević, „Smart Meter Privacy by Suppression of Low Power Frequency Components,“ X Symposium on Industrial Electronics INDEL 2014, Banja Luka, pp. 285-289, novembar 2014.
- [12] S. Djordjević, S. Bojanić, M. Dimitrijević, D. Stevanović, „Monitoring potrošnje električne energije zasnovan na kontinualnom praćenju aktivne i snage izobličenja,“ Zbornik LIX konferencije ETRAN, EL 2.3, jun 2015.

Abstract – Non-intrusive load monitoring (NILM) determines the status of electrical loads inside residential buildings from measurements made at the utility service entry. In this paper, we propose the novel event detection method for nonintrusive load monitoring systems based on the capabilities of current smart meters. The experimental results demonstrate the efficiency of the proposed procedure with respect to the small non-linear loads.

THE NOVEL EVENT DETECTION METHOD FOR NONINTRUSIVE LOAD MONITORING

Srdan Đorđević, Slobodan Bojanić,
Marko Dimitrijević, Dejan Stevanović

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF MICROCONTROLLERS

Maja Popovic, RT-RK Banjaluka

Marius Graneas, Silicon Labs Oslo

Donn Morrison, NTNU Trondheim

Branko Dokic, ETF Banjaluka

Abstract – *Energy efficiency in microcontrollers has played an important role in modern digital systems for years. With the increased need for longer battery life and increased complexity of functionalities offered, it becomes crucial to lower energy consumption as much as possible. Studies show that largest amount of energy in embedded systems gets consumed by the memory hierarchy system. Therefore there has been a lot of research pressure in the area of caching techniques with the attempt to reduce energy requirements and thus make battery life longer. A technique called Tight Loop Cache, believed as the most promising when power optimization is concerned, was chosen to be implemented and evaluated. TLC is different from conventional caching techniques because it does not include tagging of cache lines nor valid bits which makes it more attractive and easy to incorporate into a working system.*

The technique was implemented both in software (Python) and hardware (Verilog). This paper focuses only on the hardware implementation of the system and its results. Post implementation power reports showed that the use of TLC of 64B can bring around 25% of power savings into a system working on 10 MHz and synthesized with FPGA fiber.

1. INTRODUCTION

There has always been conflict between low cost, high performance and low power consumption specifications in modern digital systems. MCUs are by far the best candidates to build systems targeting these applications mainly because they are self-contained. Low power consumption not only brings energy savings, but it also improves system reliability as a whole by reducing heat dissipation. This way components have longer life expectancy because their temperature does not change rapidly, they operate on a stable temperature and therefore there is no need for large cooling systems.

In most digital systems, memory system consumes great part of the overall power consumption and this is why recently a lot of effort has been given to memory hierarchy design in a sense it consumes as little power as possible. Instruction memory access is one of the crucial points where these design modifications can be considered. The reason lays down in the fact that in a typical RISC ISA there are usually four times more instruction than data memory accesses [1]. Moreover, data is most commonly stored in SRAM whereas programs are stored in flash memory whose access infers much more energy consumption. These are all the reasons why it is believed that reducing instruction fetch energy consumption in systems like this would bring a great deal of overall energy consumption reduction.

Embedded application programs usually consist of small number of loops executed many times. It comes natural the thought it would be very efficient to read those instructions from a small buffer (small cache) and thus reduce energy consumption. Most common approaches that involve caching hierarchies put this buffer between CPU and main memory which usually infers time penalties whenever there is a cache miss. Other schemes involve accessing main memory in the same cycle if there is a miss but with the penalty of longer cycle time.

This paper briefly explains only the main principles of the work performed while the author was doing her Master Thesis at Norwegian University for Science and Technology in Trondheim, Oslo in cooperation with Silicon Labs. More details about implementation and results can be found in the Master thesis itself [5].

2. TIGHT LOOP CACHE

Tight Loop Cache, a technique proposed in [2] and chosen to be implemented in this project, consisted of a small direct map memory array and a loop cache controller. The advantage of using loop cache was double: it did not contain tag nor valid bit for each data instance. On the other hand, there was no timing penalty if there is a cache miss since the Controller had the early notion whether next fetch is going to be a hit or a miss. Based on this information, the core accessed either the loop cache or the main instruction memory.

General principle laid down on the detection of the so called sbb instruction (short backward branch) which, when encountered, indicated that a loop was executed for the second time, i.e. the moment when loop cache started to be filled. Next detection of the same sbb instruction indicated the data was already in the loop cache and could be read from there. Short backward branch instruction was any kind of branching instruction, both conditional and unconditional, that had the format as shown in Figure 2.1.

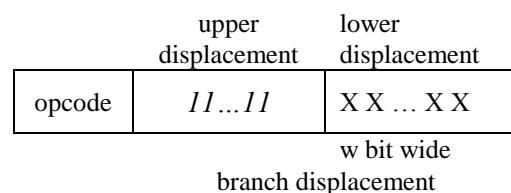


Figure 2.1 - sbb instruction format

Upper displacement containing all ones suggested that the branching was going to be backwards (end of the loop

is encountered) whereas the lower displacement field determined how long the backward jump was going to be (how many instructions the loop consisted of). Lower part of the displacement field was w -bit wide which was directly connected to the size of loop cache, i. e. cache could not contain more than 2^w instructions (in case of an architecture where each memory location contained only one instruction and program counter was incremented by 1 to access next instruction).

This made sure that the loop size could not be larger than the cache size. As mentioned earlier, tight loop cache was direct mapped (contained no address tags), only accessed by index field which was w bits wide. When a loop was smaller than 2^w instructions, only part of the loop cache was used and loop start did not have to be aligned to any particular address as in the case of many other techniques. Figure 2.1 shows how loop cache was organized and accessed in a case of $n=2^w$ entries, each entry containing 2 bytes (the last bit of the instruction address was neglected).

Loop Cache Controller was designed as a state machine with three states: IDLE, FILL and ACTIVE. Initially, the Controller was set to be in the IDLE mode all the time until it had been detected that there was an sbb instruction in the instruction stream. If the controller determined that there was an sbb instruction (information is received from the decoder) and that the branch was taken (information received from a branch status signal from the core), this meant there was a loop encountered and that it was going to be executed for the second time which made Controller move to FILL state.

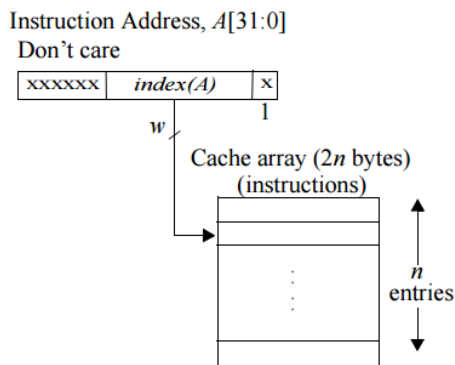


Figure 2.1 – Loop cache organization and access [2]

The sbb instruction that forced the Controller to enter FILL state was called triggering sbb instruction. In the FILL state, instructions were still read from the main instruction memory, but at the same time cache was filled with the loop instruction stream. This state continued until there was no other change of flow (cof), i.e. no other branch or jump instruction (the program execution was sequential within the loop itself).

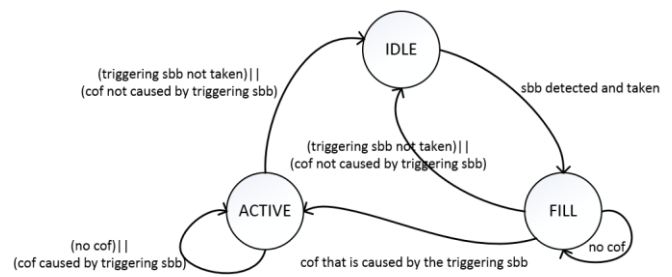


Figure 2.2 – Loop cache controller state machine

Controller went back to IDLE state in case it encountered a non-sequential stream in the loop sequence which was not caused by the triggering sbb (some other branching/jumping instruction inside the loop itself) or if it determined that triggering sbb was not taken. Finally, if the triggering sbb was taken again, the Controller entered ACTIVE state and started reading instructions from the cache. It stayed in the ACTIVE state as long as the loop within itself remained sequential and as long as the triggering sbb, when encountered, was taken (the loop was going to be executed again). In any other case, the Controller went back to IDLE state. There was no way for Controller to migrate from ACTIVE state back to FILL state which was logical considering possible scenarios.

The most important piece of information for the Controller to determine whether next instruction was a hit or a miss was to know when triggering sbb was fetched, executed and whether the cof was caused by the triggering sbb or some other instruction. The mechanism that made this possible was implemented as the Loop Counter mechanism which is shown in the Figure 2.3.

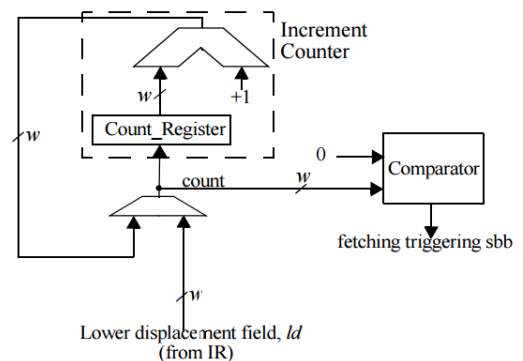


Figure 2.3 – Design of the loop counter [2]

The Controller was initially in IDLE state and stayed there until sbb was detected in the decode stage when its lower displacement field got loaded into the Count Register of the Increment Counter. This displacement gave the information of how many sequential instructions needed to be executed before sbb was fetched again. After the ld field was saved and later on determined that sbb was taken as well, the Controller entered FILL state. While in this state, on each sequential instruction in the execute stage, Increment Counter was incremented by one. By the time Counter reached zero, the Controller knew that the triggering sbb was being fetched.

If the sbb was taken, the Controller entered ACTIVE state and the Increment Register was loaded with the ld field of triggering sbb again. This meant that the execution of the loop started from the beginning again and when the counter reached zero again, the same process was repeated. Using this mechanism, the Controller knew when a cof is caused by triggering sbb by examining the value in the Increment Register.

The original technique of using tight loop cache and loop controller, proposed in [2] and briefly explained here, was implemented both in software and hardware with slight modifications in author's Master Thesis. This report will only present some of the results and implementationh details about the hardware solution.

3. HARDWARE IMPLEMENTATION

Project was dealing with Silicon Labs EFM32 MCUs which are based either on ARM Cortex-M0+, ARM Cortex-M3 or ARM Cortex-M4 and are used together with low power peripherals to address any low power application (communications, alarm and security systems, control systems, industrial sensors, medical solutions, car and traffic control systems ...) This section shows how TLC system was built by integrating additional hardware modules around Cortex-M0 core delivered by ARM as an obfuscated verilog code. Both Loop Cache Controller, Loop Cache itself and other auxiliary modules were designed in Verilog by the author.

The system was implemented as an AHB bus system (communication bus used by ARM, more details about it can be found in [3]) that contained one master: the processor core, two slaves: main instruction memory and the cache memory and a decoder (Controller) to decide which slave to access. The system was not a typical master-slave system since the nature of the communication between the Instruction Memory and the core is based on a continuous communication, the instruction memory was never written to (HWRITE was set low all the time) and therefore was ready to give data whenever the processor made a request (HREADY was high all the time). Another thing that was specific for this system was the period when the Controller was in the FILL state: both slaves were accessed at the same time: main memory was read from and that same data was written into the cache. Controller was also making decision which memory would output instructions into the core by controlling the multiplexer. So, this system had more differences than similarities to a typical AHB master slave system and in the case of need of adding more slaves to the system they would need to have their own decoder and multiplexer of course and respect the principle of continuous communication between the memory system and the core.

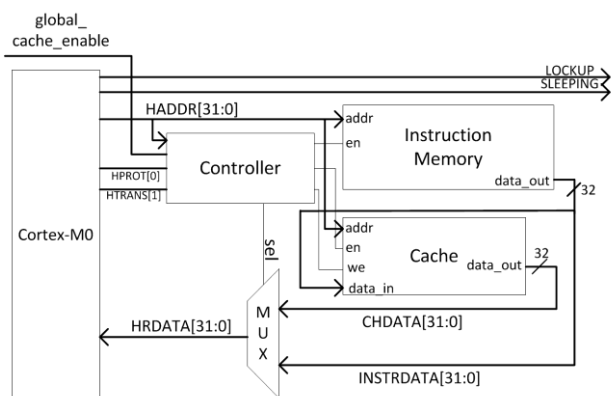


Figure 3.1– Introducing Loop cache into the core system

As it can be seen from Figure 3.1, there were three new components added to the initial core-memory system: the Loop Cache Controller, Loop Cache and the multiplexer and the implementation of all of them will be explained in next sections.

3.1. Loop Cache Controller

As it was explained in Chapter 2, the purpose of the controller was to determine when the program execution entered a loop, fill in the cache with the loop instructions and finally from the third iteration of the loop read the instructions from the cache, of course if it is the same loop that is being executed all the time. Two approaches of loop detection were discussed: the one from Chapter 2, the original loop detection principle whereas the second approach was explained in the software implementation of the system in [5]. These two approaches are shown in Figure 3.2 where only differences between them are shown, i.e. input signals.



Figure 3.2 – Two different Loop Cache Controller implementations and their interfaces

The first principle, which is going to be called *the decode* principle, would have to have the instruction code as input and originally, as proposed in the paper, a status flag from the core which would give the information about the branch status: if the branch was taken or not taken. Since Cortex-M0 had no branch status signal as it would be case if Cortex-M3 was used, the second input would have been the flags from the core (in the case of Cortex-M0 those are last four bits of the APSR register: negative, zero, carry and overflow flags). More details about the ARM Cortex-M0 can be found in [3] and [4] whereas details of importance to this project can be found in [5]. The Controller would perform decoding of the instruction, if a potential branch would have been decoded it would check status of the corresponding flag and determine whether to branch or not. The next step would be to calculate the branching offset and initiate counter register from Figure 2.3 with that value. The rest of the system would behave as described in Chapter 2.

The second principle, called *address compare* would use only address of the instruction to be fetched next, make a delayed copy of the address, compare those two and determine whether there was a backward branch or not. This principle is explained in details in [5].

If Cortex-M3 was used in the project it would have made more sense to use the Decode Controller with the branch status flag as input. In the case of Cortex-M0 there

was no real advantage of using this principle because the decoding logic of loop detection would have to be complicated and completely redundant since decoding is already done within the processor itself (but its results are unfortunately unavailable). Since whole software implementation in Python was done using the second principle, it was more convenient to use this approach in hardware as well. The timing differences between two implementations are shown in Figure 3.3 and it can be seen that decode approach would have the advantage of detecting a loop one clock cycle before but with a far more complicated and redundant logic whereas the address compare approach would be one cycle late. This one cycle delay cannot create great damage only if care is taken that the signal main/cache which controls where data should be read from was set and reset at particular rising clock edges as shown in Figure 3.3.

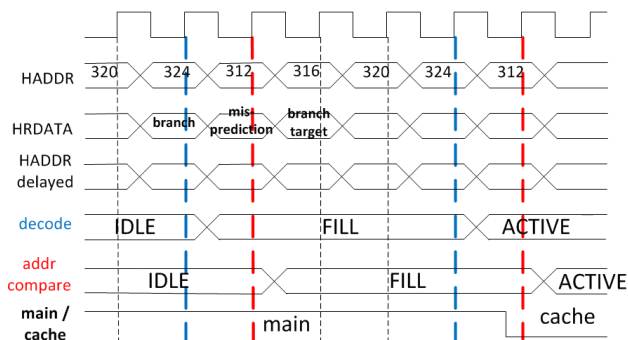


Figure 3.3 – Timing comparison between two different controller implementations

As it can be seen in Figure 3.3, for the address compare implementation, the Controller changes its states from IDLE to ACTIVE and from FILL to ACTIVE on the next rising edge after a branch target address was sampled (address 312 in Figure 3.3). The way this was really happening when simulating the system itself is shown in Figure 3.4 where it can be seen how the cache is behaving correctly and according to AHB transfer rules with an address and a data phase.

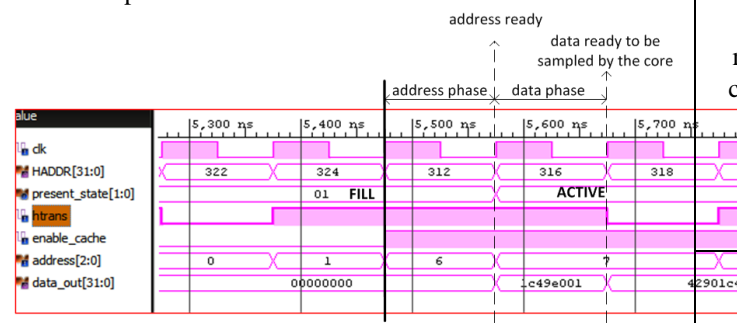


Figure 3.4 – Chosen controller implementation and its state switching and control signal toggling

Apart from address bus as input shown in Figure 3.1, the Controller had HTRANS[1] and HPROT[0] inputs which were indicating that instruction transaction needed to be performed [3]. It was very important that the signal main/cache toggled before that clock edge (not synchronous to the state change) so that proper memory could have been

used as source. This is also illustrated in Figure 3.5 where critical signal changes are shown in red.

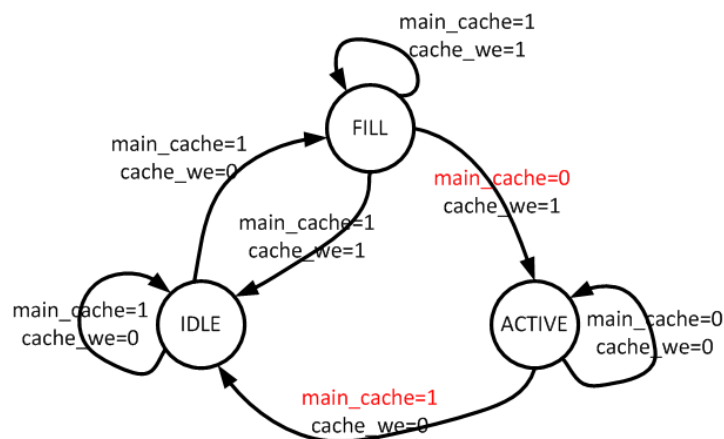


Figure 3.5 – Controller State Machine with output control signals

The signal main_cache and its values shown in red indicate that the signal value had to be changed as soon as a certain condition was encountered, it could not wait for the state machine to change its state. As it can be noticed, the final version of Controller had only two output control signals: cache write enable (cache_we) and a signal that was enabling output of either main memory or the cache, depending on the state of the controller (main_cache).

Signal descriptions and their values depending on the state of the Controller are shown in Table 3.1 (values shown in red are the critical ones, the ones that change before the state changes).

Table 3.1 – Controller output signals

Output signal	Description	IDLE	FILL	ACTIVE
main cache	Decides whether data from the address now present on the address bus should be read from cache or from instruction memory	1	1	0
cache we	Indicates that the data from the address currently on the bus should be written into the cache (on the next clock rising edge)	0	1	0

Table 3.2 shows how input enable signal of the instruction memory was depending on the global_cache_enable signal controlled by the user and main_cache output signal from the Controller. Input enabling signal of the cache memory was created just by inverting this signal.

Table 3.2 – Instruction Memory Enable signal generation

Global Cache Enable (A)	Main Cache (from Controller) (B)	Instruction Memory Enable (C)
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

$$C = (\bar{A} + AB)$$

Definitive enable signal was created of course by multiplying this signal by HTRANS[1] signal of the AHB bus which was used to initiate a transaction.

3.2. Loop Cache

As it can be seen from Figure 3.1, HTRANS[1] was used as input into the cache as well although it was already used to create enable signal which could be maybe then disputed to be redundant. This signal is one cycle delayed within the cache itself (it is called htrans_a inside cache) in order to perform correct write since the address the cache is writing data in is also when cycle delayed (address_a). The writing process is shown in Figure 3.6. In the case simulated, address bus of the loop cache was 3b wide (8 locations each containing 4B) and those were HADDR[4:2] bits. Least significant 2 bits from the address bus were completely neglected in the whole system since both memories are word addressable.

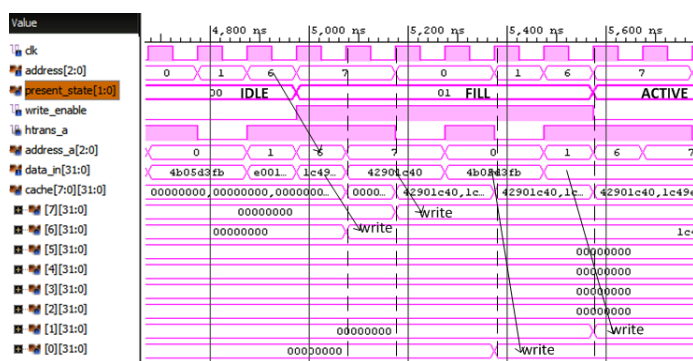


Figure 3.6- Process of filling the Loop Cache

Figure 3.6 shows how cache writing process was performed and clearly illustrates one of the benefit of this implementation of the loop cache where instructions did not need to be aligned to any starting address whereas they still remained consecutive (first location to be written into was 6, the second one was 7, third was 0 and the last one was 1).

Address_a was only a one cycle delayed version of address signal and at first it was created within the cache module itself but later on it was noticed that there was a signal within loop cache controller module that was containing the previous address already. If a part of that signal (lower n bits if n is the width of the address buds of the cache) was taken from there already, some hardware savings could be gained.

4. TESTING SETUP AND RESULTS

After the system was built, it was necessary to simulate its behaviour and prove it was working correctly which was done using VIVADO simulator. The design had to work properly both after implementation and after place and route of course, which was proven by behavioural, post synthesis and post implementation simulations.

As it was mentioned, it was possible to measure power both after synthesis and after implementation, without toggling information, with toggling information for some signals or with complete toggling information for all nodes. Testing setups were using Instruction Memory of size 32KB as in the case of Zero Gecko whereas different cache sizes (16B, 32B and 64B) and programs with different loop sizes (8 instructions, 16 instructions, 24 instructions, 32 instructions and 40 instructions) were used. Not all the results will be presented here. More details can be found in [5]. Table 4.1 shows power reports for the case of Instruction Memory of size 32KB and the cache size of 64B. Next to each power number there is a level of confidence stated: low for a report with default toggle rate and high when using a switching activity file obtained from corresponding simulation.

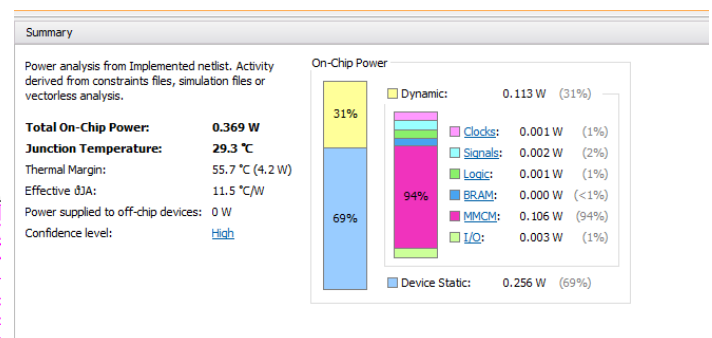


Figure 4.1- Complete power report, VIVADO (32KB Instruction Memory, 64B cache, loop size 8, cache enabled)

Table 4.1 shows that, as expected, when having no information about the toggle rate and assuming default toggle rate for each signal, the power results get worse than in the case of knowing the exact toggle rates.

Table 4.1 – Dynamic power reports after synthesis and after implementation using different toggling information (32KB Instruction Memory, 64B cache, loop size 8)

Instruction Memory (32KB)		1	2	3	4	5	6
no cache	power [mW] confidence	104 low	103 low	100 high	117 low	115 low	114 high
with cache	power [mW] confidence	108 low	107 low	106 high	116 low	114 low	113 high

Table 4.2 – Power report generation details for different measurement configurations

Config	Power report generation details
1	post synthesis power report with default toggle rate for all nodes
2	post synthesis power report with exact toggle rate for global_enable signal
3	post synthesis power report with proper .saif file as input
4	post implementation power report with default toggle rate for all nodes
5	post implementation power report with exact toggle rate for global_enable signal
6	post implementation power report with proper .saif file as input

The results also show that exact power consumption can be known only after place and route is performed and that a lot of dynamic power consumption (in this case around 12% and 7%, depending on global enable signal value) gets consumed by the clock tree and wiring itself. Complete power report (with both static and dynamic power numbers), Figure 4.1, shows that most of the power consumption (around 69%) belongs to static power consumption which is reasonable considering that Zynq-7000 AP SoCs use 28nm High-K Metal Gate (HKMG) technology. It is well known that by lowering process node technology, leakage power becomes a dominant contributor to the overall power consumption. Therefore it becomes reasonable why a non-conventional process had to be used at these gate sizes. High-K Metal Gate (HKMG) process is a process where the capacitance of the gate oxide gets increased by using a dielectric with a higher κ than the one of a SiO_2 that is normally used as a gate oxide.

But even with a sophisticated process like this, static power still dominates the overall power consumption and not much can be done to reduce it. That is why all the results in the following results will refer to dynamic power consumption only since the static one was fixed: 256mW.

Having a look at the results from Table 4.1, it can be seen that in the case of enabling usage of loop cache there was a dynamic power saving of 1mW compared to the case when no cache was added into the system. Considering the overall power consumption of 114mW this saving of less than 1% was not something to be too much proud of. On the other hand, these results show the consumption of the entire system (with the core itself of course) so it was necessary to separate the consumption of the core from the consumption of the memory system alone. This was performed by synthesizing the core alone (with no Instruction Memory, no cache memory but with the rest of the system). The post implementation power report is shown in Figure 4.2.

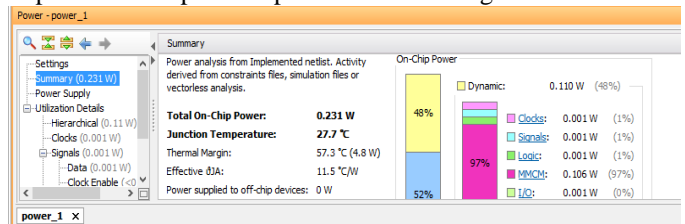


Figure 4.2 - Power report of the system with no memory hierarchy

Comparing this result of dynamic power consumption of 110mW with no memory hierarchy with 114mW using only Instruction Memory and 113mW when enabling use of cache, it is easy to conclude that memory system itself consumed either 3mW or 4mW depending if the cache was enabled or not. Saving of 1mW when enabling usage of cache now becomes 25% which is a result that cannot be neglected. Although utility reports showed that Instruction Memory was built from BRAM blocks and cache memory merely from flip flops (LUTs), there was no notion of the power ratio between a read from a BRAM and a read from a flip flop. This is why writes and reads numbers can help getting the feeling about real power consumption if the hardware was synthesized as an ASIC and not from FPGA fibre.

More information about the system setup and measurements performed as well as details of the software implementation can be found in [5].

5. CONCLUSION

It was proven that the principle can be integrated within a system that uses ARM Cortex-M0 which does not offer any advanced information, such as branch status of the instructions in different pipeline stages. This leads to a conclusion that the technique could be easily integrated into any modern system. Excessive simulation of the hardware implementation showed the principle can be successfully applied to any modern MCU system. Power optimization

techniques of VIVADO synthesis and place and route tools were exploited to their maximum and showed that the use of the technique could bring up to 25% energy savings.

Some of these issues were mentioned at the end of last Chapter, such as ratio of power of memory access to a bit RAM and a register bit. In the technology available at Silicon Labs, this ratio goes as far as 1:10 which would definitely bring more savings since this ratio in the FPGA fibre is believed to go as close to 1:1.

Main conclusion that can be made from all the results discussed is that the initial system hardware implementation was not set in a best possible way to achieve correct power saving numbers: FPGAs are usually used only to build prototypes and prove principles of operation. This was successfully performed: a working design that is using a small cache to store instructions from small loops was built and even brought around 25% power savings into the memory hierarchy system.

6. REFERENCES

- [1] D.A. Petterson, J.L. Hennessy, „Computer Organisation and Design“, 5th edition, Morgan Kaufman, 2014
- [2] L. H. Lee, B. Moyer, J. Arends, “ Instruction Fetch Energy Reduction Using Loop Caches For Embedded Applications with Small Tight Loops ”, Low Power Electronics and Design, 1999. Proceedings, 1999. International Symposium on IEEE, 1999
- [3] „AMBA 3 AHB Lite Protocol Specification“, ARM, 2010, available at www.arm.com
- [4] „ARM Cortex-M0 Design Start“,ARM, 2010
- [5] M. Popovic, „Improving the energy efficiency of a microcontroller instruction fetch using tight loop cache“, NTNU, 2015

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

620.9(082)
621.311(082)

НАУЧНО-стручни симпозијум Енергетска ефикасност ENEF 2015
(Бања Лука ; 2015)

Zbornik radova / Naučno-stručni simpozijum Energetska
efikasnost ENEF 2015, Banja Luka, 25-26. septembar 2015. ;
[organizatori Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci, Savez
energetičara Republike Srpske, Banja Luka ; uređivački odbor Branko
Dokić, Čedomir Zeljković, Bojan Erceg ; glavni urednik Branko Dokić ;
odgovorni urednik Čedomir Zeljković]. - Banja Luka : Elektrotehnički
fakultet, 2013 ([s. l. : s. n.]). - 142 str. : ilustr. ; 30 cm

Tekst štampan dvostubačno. - Tiraž 60. - Bibliografija uz svaki rad. -
Abstracts.

ISBN 978-99955-46-23-6
1. Електротехнички факултет (Бања Лука)

COBISS.RS-ID 5455384

Elektrotehnički fakultet Univerzitet u Banjoj Luci



**Patre 5
78 000 Banja Luka
Republika Srpska**

**Telefon: +387 (0)51 - 221 - 820
Dekanat: +387 (0)51 - 221 - 824
Fax: +387 (0)51 - 221 - 408**

**Web: www.enef.etfbl.net
E-mail: enef@etfbl.net**

