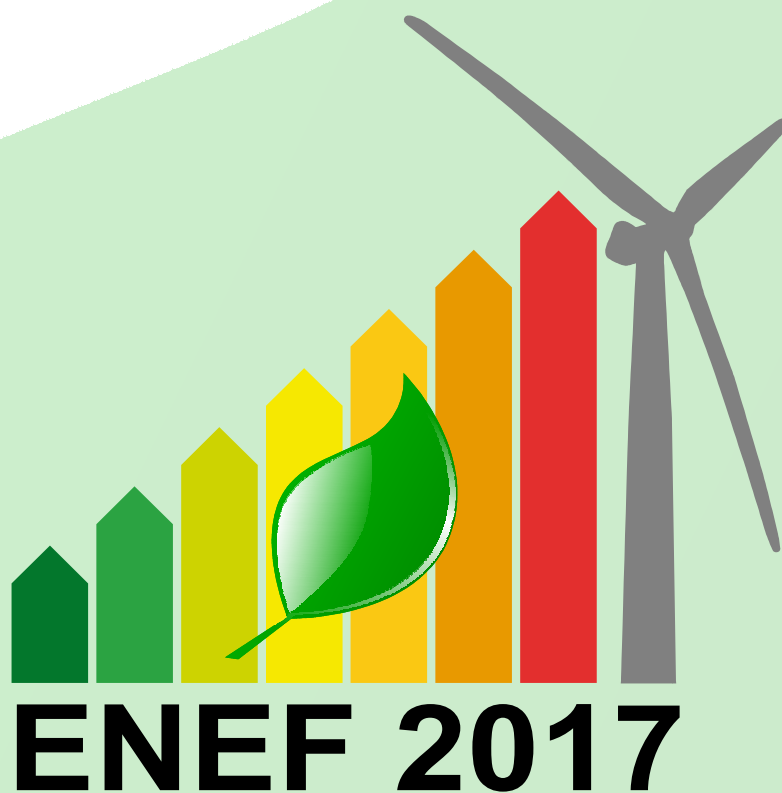


Simpozijum Energetska efikasnost

Banja Luka, Bosna i Hercegovina
3-4. novembar 2017. godine

Zbornik radova



Organizatori



**Univerzitet u Banjoj Luci
Elektrotehnički fakultet**



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI

**Naučno-stručni simpozijum
Energetska efikasnost
ENEF 2017**

ZBORNİK RADOVA

Uređivački odbor

Branko Blanuša, Petar Matić, Čedomir Zeljković, Bojan Erceg

Glavni urednik

Branko Blanuša

Odgovorni urednik

Čedomir Zeljković

ISBN: 978-99955-46-27-4

Dekan Elektrotehničkog fakulteta

Prof. dr Branko Blanuša

Prodekan za NIR Elektrotehničkog fakulteta

Prof. dr Gordana Gardašević

Predsjednik Programskog odbora

Prof. dr Petar Matić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Članovi Programskog odbora

Prof. dr Branko Dokić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Prof. dr Branko Blanuša, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Prof. dr Zdravko Milovanović, Mašinski fakultet Banja Luka

Prof. dr Petar Gvero, Mašinski fakultet Banja Luka

Prof. dr Nikola Rajaković, Elektrotehnički fakultet Beograd

Prof. dr Predrag Petković, Elektronski fakultet Niš

Prof. dr Vladimir Katić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad

Prof. dr Tatjana Pešić-Brđanin, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Doc. dr Čedomir Zeljković, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Doc. dr Saša Čvoro, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Banja Luka

Doc. dr Darija Gajić, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Banja Luka

Dr Mladen Knežić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Dragoljub Davidović, Savez energetičara RS, Banja Luka

Predsjednik Organizacionog odbora

Doc. dr Čedomir Zeljković, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Članovi Organizacionog odbora

Prof. dr Petar Matić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Prof. dr Tatjana Pešić-Brđanin, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Radomir Šobot, Savez energetičara RS, Banja Luka

Milan Gvozderac, Udruženje inženjera elektrotehnike Republike Srpske

Bojan Erceg, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Đorđe Lekić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Predrag Mršić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Bojan Knežević, Mašinski fakultet Banja Luka

Aleksandar Janković, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Banja Luka

Vanja Todorović, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Jovica Bulović, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Brankica Oparnica, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Blagajnik

Milosava Radonjić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Web: enef.etfbl.net

Email: enef@etf.unibl.org

PREDGOVOR

Simpozijum „Energetska efikasnost – ENEF“ je naučno-stručni skup multidisciplinarnog karaktera kojeg organizuju Elektrotehnički, Mašinski i Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, a uz suorganizatorstvo Saveza energetičara Republike Srpske.

Prvi Simpozijum ENEF održan je u novembru 2013. godine, i od tada se održava svake druge (neparne) godine. Na prvom Simpozijumu učešće je uzelo oko 30 učesnika iz regiona i izloženo je 16 naučnih i stručnih radova. Simpozijum je po drugi put održan u jesen 2015. godine, kada je u njegovom radu učestvovalo 60 učesnika, kada su održana tri predavanja po pozivu i izložen je 21 recenzirani rad. Tada su, takođe, održane prezentacije o aktuelnim dešavanjima u regulatornom okviru vezano za energetska efikasnost u Republici Srpskoj, te su predstavljena razna tehnička rješenja koje nude odgovarajući proizvođači opreme.

Ove godine održan je treći Simpozijum, uz značajno povećavanje interesa naučne i stručne javnosti. Učešće je uzelo oko 100 učesnika, koji su izložili 26 recenziranih radova u tematskim oblastima, 4 predavanja po pozivu, te tri prezentacije vezane za stanje u regulatornim okvirima Republike Srpske i primjeni savremenih tehnologija u praksi. Održane su i dvije panelne sesije uz pokroviteljstvo UNDP-ja i njemačkog GIZ-a.

Simpozijum bilježi stalni rast interesovanja, i od ove godine je svrstan u kategoriju konferencija sa nacionalnim značajem Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske.

Uspjeh konferencije zavisi prvenstveno od njenih učesnika. U ime Programskog odbora zahvaljujem svima koji su doprinijeli uspješnoj realizaciji ENEF-a, autorima radova, predavačima po pozivu, sponzorima, predstavnicima lokalnih zajednica i uprave na republičkom nivou, te svim učesnicima koji su svojim pitanjima i diskusijom podigli nivo Vašeg i našeg naučno-stručnog skupa.

Do 2019. godine i četvrtog izdanja simpozijuma Energetska efikasnost - ENEF!

Predsjednik Programskog odbora
Prof. dr Petar Matić

Organizatori



Univerzitet u Banjoj Luci



Elektrotehnički fakultet



Mašinski fakultet



Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet



Savez energetičara Republike Srpske, Banja Luka

Vodeći partneri



*Empowered lives.
Resilient nations.*

Razvojni program Ujedinjenih nacija
(United Nations Development Programme - UNDP)



Implemented by **giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Njemačko društvo za međunarodnu saradnju
(Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH – GIZ)

Sadržaj ovog materijala ne odražava nužno stavove Razvojnog programa Ujedinjenih nacija (UNDP) i Njemačkog društva za međunarodnu saradnju (GIZ)

Sponzori



Фонд за заштиту животне средине
и енергетску ефикасност Републике Српске

Environmental Protection and Energy
Efficiency Fund of the Republic of Srpska




Fond za zaštitu životne sredine i energetska efikasnost Republike Srpske

Life Is On

Schneider
Electric

Schneider Electric

 **ЕЛЕКТРОКРАЈИНА**
www.elektrokrajina.com



ZP Elektrokrajina, a.d. Banja Luka



Centar za razvoj i podršku



УДРУЖЕЊЕ ИНЖЕЊЕРА
ЕЛЕКТРОТЕХНИКЕ
РЕПУБЛИКЕ СРПСКЕ

Udruženje inženjera Republike Srpske

Partner



Savez opština i gradova Republike Srpske

**Naučno-stručni simpozijum
Energetska efikasnost
ENEf 2017**

**Banja Luka
Republika Srpska, BiH
3-4. novembar 2017.**



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017
3 - 4. novembar, Banja Luka

Sesije Simpozijuma

Sesija P1

Predsjedavajući: Petar Matić, Petar Gvero, Darija Gajić

Sesija A1

Predsjedavajući: Ljubomir Mišćević, Darija Gajić

Sesija E1

Predsjedavajući: Branko Blanuša

Sesija E2

Predsjedavajući: Željko Đurišić, Slobodan Lubura

Sesija M1

Predsjedavajući: Vinko Babić

Sadržaj

Sesija P1

Maja Todorović

SISTEM ENERGETSKE CERTIFIKACIJE ZGRADA U SRBIJI I USAGLAŠENOST SA ZAHTEVIMA EPBD	2
---	----------

Sesija A1

Darija Gajić, Darko Todorović, Nermina Zagora

REPRESENTATIVNI FAKTORI OBLIKA STAMBENIH KUĆA I ZGRADA BOSNE I HERCEGOVINE ZA ODREĐIVANJE REFERENTNIH ENERGETSKIH RAZREDA	9
--	----------

Aleksandar Janković, Darija Gajić, Biljana Antunović, Saša Čvoro, Mladen Slijepčević

ISPITIVANJE TOPLOTNE IZOLOVANOSTI NOVOIZGRAĐENOG OBJEKTA UPRAVE POLICIJE DISTRIKTA BRČKO	15
---	-----------

Malina Čvoro, Ena Hadžić

ANALIZA UTICAJA PROMJENE SAOBRAĆAJNIH PRIORITETA I NAVIKA NA ODRŽIVOST GRADSKO SREDINE, NA PRIMJERIMA LJUBLJANE I BANJA LUKE	21
---	-----------

Malina Čvoro, Slađana Janković

MOGUĆNOSTI PRIMJENE AKTIVNIH SOLARNIH SISTEMA U JEDNOPORODIČNOM STANOVANJU – ANALIZA REGIONA	26
---	-----------

Aleksandra Đukić, Jelena Đekić, Petar Mitković

TERMALNI KOMFOR NA GRADSKOM TRGU GRAĐENOM U DRUGOJ POLOVINI 20. VEKA: NA PRIMERU NIŠA I LESKOVCA	31
---	-----------

Saša Čvoro

POPREČNO PRIRODNO PROVJETRAVANJE I ENERGETSKI EFIKASNA I ODRŽIVA GRADNJA	37
---	-----------

Sesija E1

Radenko Marjanović i Petar Matić

ANALIZA OSTVARENOG POVEĆAVANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI POGONA PUMPNOG POSTROJENJA SA FREKVENCIJSKOM REGULACIJOM	44
---	-----------

Vladimir Popović, Miloš Kukić, Đura Oros, Roberto Varga i Darko Marčetić

OPTIMALNO UPRAVLJANJE ASINHRONOM MAŠINOM U POGONU ELEKTRIČNIH VOZILA	49
---	-----------

Petar Matić, Marko Gecić, Darko Marčetić, Vladimir Popović i Đura Oros

MATEMATIČKI MODEL VISOKOBRZINSKOG SINHRONOG MOTORA SA PERMANENTNIM MAGNETIMA SA UVAŽENIM GUBICIMA U GVOŽĐU	56
---	-----------

Darko Marčetić, Marko Gecić, Petar Matić

ANALIZA MOGUĆNOSTI MINIMIZACIJE GUBITAKA SINHRONOG MOTORA SA STALNIM MAGNETIMA NA ROTORU POGODNOG ZA PRIMENU U UREĐAJIMA ŠIROKE POTROŠNJE	63
--	-----------

Marko Šinik, Leposava Ristić, Milan Bebić, Saša Štatkić, Dragan Jevtić, Neša Rašić i Bogdan Brković

PRIMENA AKTIVNIH ISPRAVLJAČA U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA VISOKE ENERGETSKE EFIKASNOSTI	69
--	-----------

Bojan Erceg, Branko Blanuša, Đorđe Lekić

SIMULACIONI MODEL TROFAZNOG MATRIČNOG PRETVARAČA	77
---	-----------

Sesija E2

Atila Juhas, Platon Sovilj, Vladimir Vujičić	
SOFTVERSKA I HARDVERSKA PODRŠKA TROFAZNYM MERENJIMA U ED MREŽI	84
Miloš Daković, Budimir Lutovac, Tomislav Šekara	
RAZDVAJANJE POTROŠAČA ZASNOVANO NA NEINVAZIVNOM PRAĆENJU POTROŠNJE	90
Dejan Ivić, Darko Šošić, Predrag Stefanov	
PRIMJENA DC PORTOVA PRI ZATVARANJU PETLJI U DISTRIBUTIVNYM MREŽAMA	94
Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg	
METOD ZA ODREĐIVANJE UTICAJA PREPREKA NA GODIŠNJU PROIZVODNJU FOTONAPONSKIH SISTEMA	100
Danijela Vuković, Jovan Šetrajčić, Siniša Vučenović	
UTICAJ TANKIH PREVLAKA NA POVEĆANJE EFIKASNOSTI FOTONAPONSKE KONVERZIJE	106
Ernad Šabanović, Marko Ikić, Slobodan Lubura, Milomir Šoja	
INTEGRISANI FOTONAPONSKI SISTEMI	110
Milan Paripović	
OPTIMIZACIJA ODRŽAVANJA NAPAJANJA TELEKOMA UVOĐENJEM NOVIH METODA I MJERENJA	115

Sesija M1

Zdravko Milovanović, Svetlana Dumonjčić-Milovanović, Aleksandar Milašinović, Darko Knežević i Jovan Škundrić	
RAZVOJ TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU KORISNYH OBLIKA ENERGIJE – ČISTE TEHNOLOGIJE I ODRŽIVI RAZVOJ	122
Zdravko Milovanović, Momir Samardžić, Vinko Babić i Svetlana Dumonjčić-Milovanović	
ENERGETSKA EFIKASNOST TERMOENERGETSKYH POSTROJENJA – FAZE I METODOLOGIJA REALIZACIJE IZRADE STUDIJE NA PRIMJERU RITE UGLJEVIK INSTALISANE SNAGE 300 MW	134
Vinko Babić i Zdravko Milovanović	
BIOMASA KAO ZAMJENA ZA FOSILNA GORIVA U SISTEMIMA DALJINSKOG GRIJANJA	148
Zdravko Milovanović, Momir Samardžić, Darko Knežević, Aleksandar Milašinović, Svetlana Dumonjčić-Milovanović	
ENERGETSKA EFIKASNOST TERMOENERGETSKYH POSTROJENJA – REZULTATI OPTIMIZACIJE NA PRIMJERU RITE UGLJEVIK INSTALISANE SNAGE 300 MW	154
Zdravko Milovanović	
NEKA RAZMIŠLJANJA O PLANIRANJU OPTIMALNOG KORIŠĆENJA OBNOVLJIVYH IZVORA ENERGIJE SA SOCIJALNOG I ASPEKTA ODRŽIVOG RAZVOJA – OBJEKTIVNO VREDNOVANJE I SOCIJALNI ASPEKT	168
Slađana Janković, Marija Lukač, Petar Gvero	
BANJALUKA KAO PAMETNI GRAD DO 2040-TE	179
Goran Jankeš, Nikola Tanasić, Mirjana Stamenić, Tomislav Simonović, Nikola Petković, Aleksandar Nikolić, Marko Radosavljević, Miloš Saleta	
ANALIZA MOGUĆNOSTI UNAPREĐENJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI KOD TOPLANA I INDUSTRIJSKYH KOTLARNICA NA UGALJ	185



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017
3 - 4. novembar, Banja Luka

Sesija P1

Sesija P1

Maja Todorović

SISTEM ENERGETSKE CERTIFIKACIJE ZGRADA U SRBIJI I USAGLAŠENOST

SA ZAHTEVIMA EPBD2

Sistem energetske sertifikacije zgrada u Srbiji i usaglašenost sa zahtevima EPBD

Maja Todorović

Univerzitet u Beogradu, Mašinski Fakultet, Beograd, Republika Srbija

mtodorovic@mas.bg.ac.rs

Sažetak— U okviru rada biće predstavljen koncept sistema energetske sertifikacije zgrada u Republici Srbiji, kroz važeći zakonski okvir. Biće reči o izgledu, sadržaju i uslovima izdavanja energetskih pasoša za zgrade, obavezi primene, kao i vrstama pasoša i energetskim razredima. Biće dat i kratak prikaz sistema obuke eksperata koji učestvuju u procesu energetske sertifikacije, kao i u izradi elaborata energetske efikasnosti u fazi projektovanja. Takođe, biće reči o proceduri izdavanja sertifikata, cenama na tržištu, kontroli kvaliteta i Centralnom registru energetskih pasoša CREP. Poseban deo rada odnosiće se na pregled nedostataka sistema u smislu neusaglašenosti za zahtevima Direktive 2010/31/EU, kao i predloženih rešenja za unapređenja postojećeg sistema.

Ključne reči—energetska sertifikacija zgrada; obrasci energetskih pasoša; procedura izdavanja; centralni registar; usaglašenost sa zahtevima Direktive 2010/31/EU

I. UVOD

Potrošnja energije u zgradama u Srbiji je bila u stalnom porastu tokom poslednje dekade, tako da zauzima najveći deo u ukupnoj bruto finalnoj potrošnji energije (BFPE). Ukupna finalna potrošnja energije dostigla je 8.19 Mtoe u 2013 godini [1] u sledećim sektorima potrošnje: u domaćinstvima, komercijalnom sektoru, zgradama javne namene, industriji i transportu. Prema sektorima potrošnje, najviše finalne energije se trošilo u sektoru domaćinstava 36%, zatim industrije 29%, pa u sektoru saobraćaja 23%, dok su ostali sektori učestvovali sa 12%. U periodu pre ekonomske i finansijske krize, ukupna finalna potrošnja energije rasla je tokom 6 do 7 godina tako da je premašila rast bruto društvenog proizvoda. U 2009. godini, pod uticajem ekonomske krize, došlo je do pada potrošnje od 20 % u poređenju sa 2005. godinom, ali su zahtevi za energijom ponovo porasli nakon oporavka. Izražen rast energetske potrošnje bio je podstaknut rastom u transportu i industriji, dok je porast potrošnje finalne energije u sektoru zgradarstva uslovljen rastom životnog standarda (u smislu povećanja korišćenja kućnih aparata, kao i individualnih uređaja za klimatizaciju, posebno u letnjem periodu). Maksimum u potrošnji finalne energije dostignut je 2011. godine (preko 9 Mtoe), nakon čega se beleži smanjenje potrošnje na godišnjem nivou, i to najviše u sektoru industije[1].

U tom kontekstu, sektor zgradarstva pruža značajnu priliku za postizanje energetskih ušteda. Prema procenama Vlade Republike Srbije [5], veliki potencijal raspoloživih mera

unapređenja energetske efikasnosti (EE) leži upravo u građevinskom fondu. Prema statističkim podacima iz 2010. godine, na zadovoljenje toplotnih potreba u zgradama troši se 61% od ukupne potrošnje u ovom sektoru [2]. Prema tome, najveći potencijal za uštedu energije povezan je sa poboljšanjem termičke zaštite zgrada, kako bi se smanjili toplotni gubici. U stambenom sektoru, najveći deo građevinskog fonda je izgrađen pre više od 30 godina [2]. Prosečna potrošnja toplotne energije, koja kreće se oko 170 kWh/m², u poređenju sa 70-130 kWh/m² u zemljama zapadne Evrope [2], ukazuje na značajnu mogućnost rekonstrukcije postojećih objekata i uvođenje mera poboljšanja energetske efikasnosti. Isto tako, projekti unapređenja EE, koji su u skorije vreme izvedeni u javnom sektoru u Republici Srbiji, pretežno u školama i bolnicama, pokazuju uštede koje se kreću u granicama od 30% do 40%, sa atraktivnim periodima povraćaj investicija [2]-[4].

II. ZAKONODAVNI OKVIR

Srpsko – Nemačka saradnja u oblasti Energetske Efikasnosti ustanovljena je kroz projekat “Energetska efikasnost zgrada u Srbiji”, kroz podršku GIZ-a Ministarstvima nadležnim za poslove građevinarstva i energetike. U skladu sa članom 20 Ugovora o osnivanju Energetske Zajednice [6], Republika Srbija se obavezala da uvede u nacionalno zakonodavstvo Evropske Direktive na polju energetske efikasnosti i korišćenja obnovljivih izvora energije. jedan od važnih koraka u institucionalizaciji energetske efikasnosti načinjen je usvajanjem Zakona o planiranju i izgradnje u novembru 2009. godine. Njegova primena, upravljana od strane Ministarstva nadležnog za poslove građevinarstva, podrazumevala je objavljivanje odgovarajućih podzakonskih akata. Na osnovu člana 201 Zakona o planiranju i izgradnji (Službeni Glasnik RS broj 72/09, 81/09 – korekcija, 64/10 i 24/11), izrađeni su Pravilnici, kojima se daetljinije uređuju postupci unapređenja energetske efikasnosti zgrada (Službeni Glasnik RS broj 61/11 i 69/12). U okviru novih pravilnika, ustanovljeni su Sertifikati o energetskim svojstvima zgrada. Pravilnik o energetskoj efikasnosti zgrada [7] bliže propisuje zahteve energetskih svojstava novih i postojećih zgrada i uvodi metodologiju proračuna termičkih karakteristika zgrada. Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada [8] bliže uređuje proces izdavanja energetskih sertifikata za zgrade, način izdavanja i sadržaj sertifikata, kao i energetske razrede za stambene i nestambene zgrade, nove i postojeće.

Na osnovu člana 5 Pravilnika o energetske efikasnosti zgrada, energetska efikasnost je postignuta ukoliko potrošnja energije po kvadratnom metru ne prelazi dozvoljenu granicu, uz ostvarivanje minimalnih zahteva komfora. Dodatni zahtevi koji su postavljani ovim Pravilnikom odnose se na:

- termičku zaštitu zgrada, kroz ograničenje maksimalnih vrednosti koeficijenta prolaženja toplote elemenata u sastavu termičkog omotača zgrade (tabela I),
- maksimalno dozvoljene vrednosti specifične godišnje energije za grejanje (tabela II),
- minimalne tehničke zahteve za tehničke sisteme u zgradama (grejanje, hlađenje, ventilaciju, pripremu sanitarne tople vode, osvetljenje).

TABELA I. ZAHTEVI TERMIČKE ZAŠTITE

Opis elementa	Postojeće zgrade U_{max} [W/(m ² ·K)]	Nove zgrade U_{max} [W/(m ² ·K)]
<i>Elementi u kontaktu sa spoljašnjim vazduhom</i>		
1. Spoljni zid	0,40	0,30
2. Zid na dilataciji	0,50	0,35
3. Zidovi i međuspratne konstrukcije između različitih grejanih prostorija	0,90	0,90
4. Ravan krov iznad grejanog prostora	0,20	0,15
5. Ravan krov	0,40	0,30
6. Kosi krov	0,20	0,15
7. Kosi krov iznad negrejanog prostora	0,40	0,30
8. Međuspratna konstrukcija iznad otvorenog prolaza	0,30	0,20
9. Prozori, balkonska vrata grejanih prostorija	1,50	1,50
10. Stakleni krovovi	1,50	1,50
11. Spoljna vrata	1,60	1,60
12. Izlozi	1,80	1,80
13. Staklene prizme	1,60	1,60
<i>Unutrašnje pregradne konstrukcije</i>		
14. Zid prema grejanom stepeništu	0,90	0,90
15. Zid prema negrejanim prostorima	0,55	0,40
16. Međuspratna konstrukcija ispod negrejanog prostora	0,40	0,30
17. Međuspratna konstrukcija iznad negrejanog prostora	0,40	0,30
<i>Konstrukcije u tlu (ukopane, ili delimično ukopane)</i>		
18. Zid u tlu	0,50	0,35
19. Pod na tlu	0,40	0,30
20. Ukopana međuspratna konstrukcija	0,50	0,40

Kategorizacija zgrada prema nameni je definisana u pomenutim pravilnicima, a u skladu sa Direktivom o energetskim svojstvima zgrada (*engl. Energy Performance in Buildings Directive*, skr. EPBD, Aneks 1), tako da postoje dve kategorije stambenih zgrada (jednoporodične kuće i zgrade sa

dva i više stanova), kao i šest kategorija nestambenih zgrada: upravne i poslovne zgrade, zgrade namenjene obrazovanju i kulturnim delatnostima, zgrade namenjene zdravstvu i socijalnoj zaštiti, zgrade namenjene trgovini, turizmu i ugostiteljstvu, zgrade namenjene sportu i rekreaciji, zgrade namenjene funkcionisanju saobraćaja, zgrade pošta i telekomunikacionih centara i zgrade sudova, kazneno-popravnih ustanova. kao posebna kategorija zgrada definišu se zgrade druge namene koje koriste energiju, u kojim se uslovi održavanja termičkog komfora razlikuju (grejanje na niže temperature), kao i režimi korišćenja; za ovu posebnu kategoriju ne određuje se energetska razred, već se samo vrši provera ispunjenja uslova termičke zaštite zgrade.

TABELA II. DOZVOLJENA GODIŠNJA POTROŠNJA FINALNE ENERGIJE

Kategorija zgrade	Nove zgrade [kWh/m ² a]	Postojeće zgrade [kWh/m ² a]
1. Stambene zgrade sa jednim stanom	65	75
2. Stambene zgrade sa dva ili više stanova	60	70
3. Upravne i poslovne zgrade	55	65
4. Zgrade namenjene obrazovanju	65	75
5. Zgrade namenjene zdravstvu i socijalnoj zaštiti	100	120
6. Zgrade namenjene turizmu i ugostiteljstvu	90	100
7. Zgrade namenjene sportu i rekreaciji	80	90
8. Zgrade namenjene trgovini i uslužnim delatnostima	70	80
9. Zgrade za druge namene koje koriste energiju uključujući i mešovite namene	/	/

U skladu sa pravilnicima, svaka nova zgrada mora biti projektovana i izvedena na način da se ne prekorači maksimalno dozvoljena godišnja finalna energija za grejanje, koja je propisana i odgovara energetskom razredu "C". Ovaj zahtev se odnosi na sve kategorije novih zgrada, kao i na postojeće nakon obimnije obnove ili energetske sanacije. indikator na osnovu koga se određuje energetska razred zgrade, u prelaznom periodu, jeste specifična godišnja potrebna energija za grejanje, dok će, nakon usvajanja nacionalnog softvera za proračun, biti računata ukupna godišnja primarna energija, koja će biti korišćena kao indikator.

III. ENERGETSKA SERTIFIKACIJA ZGRADA

A. Procedura izdavanja energetske pasoša

Proces energetske sertifikacije zgrada u Srbiji započeo je 30 septembra 2012. godine, kada su stupili na snagu Pravilnici o energetske efikasnosti zgrada [7], [8].

Organizacije, ovlašćene od strane Ministarstva nadležnog za poslove građevinarstva, mogu sprovesti proces energetske sertifikacije, što uključuje: sprovođenje energetske pregleda zgrade, podnošenje izveštaja o obavljenom energetskom pregledu, proračune energetskih svojstava u skladu sa metodologijom propisanom u Pravilniku i izdavanje

sertifikata o energetskim svojstvima zgrada (u daljem tekstu: energetskog pasoša). Energetski pasoš potpisuje licencirani inženjer iz ovlaštene organizacije i ovlaštena osoba iz organizacije.

Energetski pasoš je obavezan za sve nove zgrade, kao i za postojeće nakon rekonstrukcije, obimnije obnove ili energetske sanacije. Energetski pasoš nije obavezan u delu prometa nekretnina (kupoprodaja i iznajmljivanje).

Energetski pasoš sadrži:

- Informaciju o zgradi: adresu, broj katastarske parcele, godinu izgradnje/rekonstrukcije, itd.
- informaciju o potrebnoj energiji (energetski razred),
- informaciju o primenjenim konstruktivnim elementima i tehničkim sistemima u zgradi (uključujući i izvore energije koji se koriste),
- informaciju o energetskim potrebama i emisiji CO₂,
- listu preporuka za samnjenje energetske potrošnje i uštede novca.

Energetskim pasošom se zgradi dodeljuje energetski razred od A+ (najefikasniji) do G (najneefikasniji) i ima važnost 10 godina.

Zgrade koje se izuzimaju iz sistema sertifikacije su:

- verski objekti,
- privremeni objekti koji se koriste kraće od 2 godine,
- zgrade sa ukupnom korisnom površinom manjom od 50 kvadratnih metara,
- industrijski objekti, radionice i poljoprivredna dobra koja ne koriste energiju za održavanje uslova komfora,
- vikendice i objekti koji se koriste manje od 25% tokom godine,
- zgrade koje se ne greju i zgrade koje se greju na temperature ispod 12°C.

Postoje 3 različita tipa (obrasca) energetskog pasoša (slike u nastavku):

- za stambene zgrade,
- za nestambene zgrade,
- za ostale zgrade koje koriste energiju.

Energetski pasoši za stambene i nestambene zgrade se sastoje od 5 strana, dok energetski pasoš za ostale zgrade ima 3 strane. Na sl. 1 prikazana je prva strana energetskog pasoša za stambene zgrade.

Sadržaj energetskog pasoša za stambene i nestambene zgrade:

- 1. Strana:** Opšte informacije o zgradi, energetski razred, potpisi osoba koje su odgovorne za izdavanje energetskog pasoša, broj i datum izdavanja i period važenja;

- 2. Strana:** Informacije o lokaciji i klimatski podaci, primenjenim konstruktivnim elementima i tehničkim sistemima (uključujući izvore energije koji se koriste);
- 3. Strana:** Informacije o režimu korišćenja, energetskim potrebama i emisiji CO₂ (uz mogućnost unosa podataka o izmerenoj potrošnji energije – za postojeće zgrade);
- 4. Strana:** Lista preporuka za unapređenje energetske efikasnosti;
- 5. Strana:** Lista korišćenih tehničkih pojmova i jedinica.

фотографија зграде (једна могућност)	ЗГРАДА	<input type="checkbox"/> нова <input checked="" type="checkbox"/> постојећа
	Категорија зграде	1. Зграда са једним станом 2. Зграда са више станова
	Место, адреса: Катастарска парцела: Власник/инвеститор/правни заступник:	
	Извођач: Година изградње: Година реконструкције/ енергетске санације: Нето површина A_N [m ²]:	
Енергетски пасош за стамбене зграде	Прорачун	$Q_{H,net}$ [%] 45 $Q_{H,net}$ [kWh/(m ² a)] 34
	A+	≤ 15
	A	≤ 25
	B	≤ 50
	C	≤ 100
	D	≤ 150
	E	≤ 200
	F	≤ 250
	G	> 250
Пољаци о лицу које је издало енергетски пасош		
Овлашћена организација: Потпис овлашћеног лица и печат организације: (потпис) М.П.		
Одговорни инжењер: Потпис и печат одговорног инжењера ЕЕ : (потпис) М.П.		
Број пасоша: Датум издавања/рок важења:		

Sl. 1. Izgled prve strane energetskog pasoša za stambene zgrade

Sadržaj energetskog pasoša za ostale zgrade koje koriste energiju:

- 1. Strana:** Opšte informacije o zgradi, potpisi osoba koje su odgovorne za izdavanje energetskog pasoša, broj i datum izdavanja i period važenja;
- 2. Strana:** Informacije o lokaciji i klimatski podaci, primenjenim konstruktivnim elementima (gde se potvrđuje da su U-vrednosti u skladu sa zahtevima Pravilnika);
- 3. Strana:** Lista korišćenih tehničkih pojmova i jedinica.

Glavni indikator, na osnovu koga se određuje energetski razred zgrade, jeste teoretska/izračunata finalna energija za grejanje. Finalna energija za grejanje, kao specifična vrednost, uzeta je kao indikator za određivanje energetskog razreda (u kWh/m² godišnje). Primarna energija za potrebe grejanja i

emisija CO₂ se takođe računaju, a ti podaci se daju na trećoj strani energetskog pasoša.

Energetski pasoš izdaje se nakon obavljenog energetskog pregleda i finalnog ocenjivanja ispunjenja zahteva vezanih za energetska svojstva zgrade. Sastavni je deo dokumentacije koja se prilaže za dobijanje upotrebne dozvole.

U skladu sa Pravilnikom o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada, energetski pregled zgrade obuhvata: Analizu arhitektonsko-građevinskih karakteristika zgrade, odnosno analizu toplotnih karakteristika termičkog omotača zgrade; Analizu energetskih svojstava sistema grejanja; Analizu sistema automatske regulacije sistema grejanja u zgradi; Merenja za utvrđivanje energetskog stanja i/ili svojstava, kada se do podataka ne može doći na drugi način.

B. Cene energetskih pasoša

Postoji širok opseg cena energetskih pasoša u Srbiji. Visoka stopa nezaposlenosti i nestabilno poslovno okruženje svakako utiču na obaranje cene. Ne postoji zvanični cenovnik (na nivou države ili Inženjerske komore), kojim se utvrđuju cene u procesu izdavanja energetskog pasoša. U nastavku je dat cenovnik jedne od ovlašćenih organizacija za izdavanje energetskih pasoša [12].

TABELA III. CENE IZDAVANJA ENERGETSKOG PASOŠA

Cena po jedinici, sa PDV-om (Euro/m ²)		
Ukupna bruto površina (m ²)	Stambene zgrade	Nestambene zgrade
<200	0.18	0.25
200 - 800	0.15	0.20
800 – 2000	0.12	0.18
>2000	0.1	0.15

IV. OBUKA EKSPERATA

A. Program obuke

Energetske pasoše u Srbiji mogu izdavati samo ovlašćene organizacije od strane nadležnog Ministarstva. Energetski pasoš može izdati organizacija koja ima najmanje dva stalno zaposlena inženjera sa licencom odgovornog inženjera za energetska svojstva zgrada [8].

Ministarstvo građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture je ovlastilo Inženjersku komoru Srbije za sprovođenje obuke inženjera iz oblasti energetske efikasnosti zgrada. Organizacija obuke se obavlja pre ispitnog roka, tri puta godišnje. Program obuke se sastoji od 40 nastavnih časova, obuhvata 14 različitih tema i predstavljen je u tabeli IV.

Obuka je obavezna za sve inženjere. Izuzetak su inženjeri sa dugogodišnjim iskustvom i referenc listom u oblasti energetske efikasnosti (min. 10 referenci – projekti i/ili izvođenje radova u svojstvu glavnog odgovornog inženjera), kao i specijalisti iz oblasti EE (diploma ili potvrda Univerziteta o položenim ispitima iz oblasti EE).

TABELA IV. PROGRAM OBUKE

Tematsko poglavlje	Broj časova	Tematsko poglavlje	Broj časova
TC. 1. Pojam energetskog sertifikata, njegova uloga, Zakonska regulativa	2	TC. 10. Efikasnost sistema centralnog grejanja i regulacija	2
TC. 2. Opšti uslovi za postizanje energetske efikasnosti zgrada	2	TC. 11.1. Merenja pri energetskim pregledima	3
TC. 3. Urabnistički parametri za postizanje energetske efikasnosti zgrada	1	TC. 11.2. Merenje utrošene toplote za grejanje	1
TC. 4. Arhitektonski parametri za postizanje energetske efikasnosti zgrada	3	TC. 12. Metodologija proračuna potrebne godišnje energije	2
TC. 5. Uslovi građevinske fizike	3	TC. 13. Elektro energetski sistemi u zgradama – Mere uštede energije	3
TC. 6. Građevinski materijali i sklopovi	1	TC. 14.1. Primer izrade Elaborata EE i Energetskog pasoša postojeće stambene zgrade	2
TC. 7. Pasivni i aktivni solarni sistemi	2	TC. 14.1. Primer izrade Elaborata EE i Energetskog pasoša postojeće stambene zgrade	2
TC. 8. Osnove energetskog bilansiranja zgrade	2	TC. 14.2. Mere za unapređenje energetske efikasnosti zgrada	2
TC. 9.1. Uređaji i oprema sistema grejanja	2	TC. 14.3. Mere za unapređenje energetske efikasnosti sistema grejanja	1
TC. 9.2. Daljinsko snabdevanje toplotom i priprema STV	1	TC. 14.4. Primeri proračuna indikatora energetske efikasnosti zgrada	3

B. Zahtevi za licencirane inženjere

U skladu sa članom 201 Zakona o planiranju i izgradnji Republike Srbije, usvojen je Pravilnik o polaganju stručnog ispita (Službeni Glasnik RS broj 27/2015). Ovaj pravilnik uređuje uslove, program i način polaganja stručnog ispita, u oblasti prostornog i urbanističkog planiranja, izrade tehničke dokumentacije, građenja i energetske efikasnosti i uslove i postupak za izdavanje i oduzimanje licence za odgovornog urbanistu, projektanta, izvođača radova i odgovornog planera.

Minimalni zahtevi za odgovornog inženjera za energetska svojstva zgrada su:

- Master diploma arhitekture, građevine, mašinstva ili elektrotehnike (studijski programi od minimalno 5 godina);
- Radno iskustvo od minimalno 4 godine u projektovanju i/ili izvođenju radova;
- Uspešno završena obuka iz oblasti Energetske efikasnosti zgrada (40 nastavnih časova).

Stručni ispit sastoji se iz pismenog i usmenog dela.

Pismeni deo ispita podrazumeva izradu elaborata energetske efikasnosti zgrade (kao dela tehničke dokumentacije koja se prilaže za izdavanje građevinske dozvole), i izradu EPC. Elaborat Energetske efikasnosti treba da sadrži tehnički opis, proračune i grafičku dokumentaciju za izgradnju. Usmeni deo ispita podrazumeva proveru znanja iz oblasti: poznavanja ključnih zakona, propisa i standarda koji važe u ovoj oblasti, kao i odbranu pismenog dela.

Nakon polaganja stručnog ispita, inženjer može podneti zahtev za izdavanje licence. Uz zahtev za izdavanje licence obavezno se prilaže sledeće:

- 1) Kopija lične karte;
- 2) Kopija diplome o završenim akademskim odnosno strukovnim odnosno drugim ekvivalentnim studijama;
- 3) Kopija uverenja o položenom stručnom ispitu;
- 4) Dokaz o stručnim rezultatima (referenc lista);
- 5) Preporuka najmanje dva lica kojima je izdata odgovarajuća licenca, ili preporuka Komore na predlog nadležnog organa matične sekcije;
- 6) Dokaz o radnom iskustvu (potvrda privrednog društva, o radnom iskustvu na odgovarajućim poslovima).

Postoji samo jedan tip licence za ovlašćenog inženjera za energetska efikasnost zgrada.

V. CENTRALNI REGISTAR ENERGETSKIH PASOŠA

Digitalni registar postoji od 2014/2015 i ustanovljen je kao zvanični Centralni Registar Energetskih Pasoša (u daljem tekstu: CREP). Program je dostupan na srpskom jeziku i ćirilicom pismu.

CREP-om upravlja Republika Srbija – Ministarstvo za građevinarstvo, saobraćaj i infrastrukturu i Ministarstvo rudarstva i energetike. Unos energetskih pasoša vrše licencirani inženjeri zaposleni u ovlašćenim organizacijama. Trenutno postoji 1495 licenciranih inženjera za energetska efikasnost zgrada, i 145 ovlašćenih organizacija (koje imaju najmanje dva stalno zaposlena licencirana inženjera).

Postoje dva nivoa korišćenja CREP-a:

1. **Nivo za posetioce**, koji samo mogu vršiti pregled sledećih podataka:
 - Listu licenciranih inženjera za energetska efikasnost zgrada; Pretraga se može vršiti po imenu, prezimenu ili broju licence;
 - Listu ovlašćenih organizacija (nije potpuna). Pretraga se može vršiti po imenu organizacije, registarskom broju, opštini; dostupni su elektronska adresa i broj telefona organizacije;
 - Listu “pilot energetskih pasoša”. Posetilac može da pregleda samo prve strane energetskih pasoša;
 - Listu unetih energetskih pasoša. Posetilac može vršiti pretragu baze podataka, u cilju pronalazjenja relevantne zgrade. Takođe, posetilac može da pregleda samo prve strane energetskih pasoša.
2. **Nivo za korisnike** (za registrovane licencirane inženjere).

Izdavanje energetskog pasoša može se vršiti i bez unosa u Centralni registar energetskih pasoša, kako ova obaveza nije propisana podzakonskim aktima. Propisano je da ovlašćena organizacija koja izdaje dokument isti dostavi nadležnom ministarstvu u roku od 15 dana od izdavanja.

CREP je povezan (“hot link”) sa Katastrom. Korisnik mora popuniti polje u kome se traži katastarski broj parcele i uneti sve tražene podatke. Uneti podaci se proveravaju i verifikuju preko linka sa Katastrom. Samo u slučaju kada su podaci verifikovani, korisnik može da nastavi rad.

VI. USKLAĐENOST SA ZAHTEVIMA EPBD

A. Poređenje sa zemljama EU

U cilju formiranja pregleda situacije u Srbiji u poređenju sa zemljama Evropske Unije, u pogledu procesa energetske sertifikacije zgrada, analizirano je nekoliko stavki. Poređenje zakonskog okvira u Republici Srbiji i zemljama EU prikazano je u tabelama koje slede [13], [14], [16].

TABELA V. POREĐENJE FORMALNE TRANSPOZICIJE ZAHTEVA EPBD U ZEMLJAMA EU I U REPUBLICI SRBIJI

Zahteva EPBD	EU (28 zemalja)		Srbija
	Da (broj)	Ne (broj)	Da/Ne
Član 11, EPBD			
Primena izdavanja energetskog pasoša za sve kategorije zgrada	28	0	Da
Primena izdavanja energetskog pasoša za sve nove zgrade	28	0	Da
Primena izdavanja energetskog pasoša za zgrade koje se prodaju i iznajmljuju	28	0	Ne
Primena izdavanja energetskog pasoša za zgrade javne namene (>500m ²)	28	0	Ne
Član 17, EPBD			
Javni registar kvalifikovanih i/ili akreditovanih eksperata/kompanija	28	0	Da
Član 18, EPBD			
Nezavisni sistem kontrole	28	0	Ne
Član 27, EPBD			
Kazne za neusaglašenost sa zahtevima	28	0	Ne

TABELA VI. POREĐENJE U POGLEDU KONTROLE KVALITETA

Nezavisna kontrola kvaliteta energetskih pasoša	EU (28 zemalja)		Srbija
	Da (broj)	Ne (broj)	Da/Ne
Nezavisna kontrola kvaliteta energetskih pasoša	28	0	Ne
Kontrola kvaliteta energetskog pasoša u okviru softvera za proračun	11	17	Ne
Kontrola kvaliteta energetskog pasoša u okviru baze podataka	19	9	Ne
Nezavisna kontrola kvalifikovanih eksperata	8	20	Ne
Jednostavna revizija kvaliteta energetskog pasoša	15	13	Ne

B. Pregled nedostataka

Veoma je važno napomenuti da je ostalo otvoreno pitanje dinamike pune implementacije EPBD Direktive 2010/31/EU.

Primarna energija (kWh/m²a) i emisije CO₂ (kg/m²a) se računaju, ali ne utiču na energetske razred zgrade. Na ovaj način, energetske razred zgrade u budućnosti, trebalo bi da bude izražen prema ukupno potrebnoj primarnoj energiji, što je od bitnog značaja za funkcionisanje svih sistema u zgradi. Ovakav potpuni pristup je od izuzetne važnosti, zato što stimuliše primenu efikasnih tehničkih sistema za grejanje, hlađenje, ventilaciju i pripremu sanitarne tople vode, efikasnog osvetljenja i uređaja i dodatno doprinosi široj upotrebi obnovljivih izvora energije. Dominantni nedostaci važećeg sistema energetske sertifikacije zgrada u Republici Srbiji su sledeći:

- Ne postoji obaveza unosa energetske pasoša u centralni digitalni registar (CREP);
- Ne postoji sistem kontrole kvaliteta u procesu izdavanja energetske pasoša;
- Ne postoji obaveza tehničke kontrole dokumentacije koja prethodi izdavanju energetske pasoša;
- Energetske razred u pasošu određuje se samo na osnovu potrebne finalne enerije za grejanje;
- Na energetske razred zgrade ne utiče primenjeni sistem za grejanje, njegova svojstva i efikasnost;
- Primena OIE ne utiče na energetske razred zgrade;
- Ne postoji nacionalni softver, niti odobreni komercijalni softver na nacionalnom nivou, koji se može koristiti u svrhe proračuna u procedurama izrade Elaborata EE i energetske pasoša za zgrade;
- Ne postoje precizne instrukcije za javno izlaganje energetske pasoša u zgradama javne namene.

Prizak potencijalnih rešenja, koja se mogu primeniti, a u skladu sa preporukama koje važe za zemlje EU, dat je u tabeli VII.

TABELA VII. PREPORUKE ZA PROCES ENERGETSKE SERTIFIKACIJE ZGRADA ZA ZEMLJE EU I SRBIJU

Preporuke za zemlje EU	Za Srbiju
Postoji potreba da se stalno vrši poboljšanje šeme energetske sertifikacije zgrada	Da
Postoji potreba da se ojača uloga energetske pasoša u kontekstu nacionalnog zakonodavstva.	Urađeno
Postoji potreba da se uvedu dodatne mere za obezbeđenje kvaliteta u ranim fazama procesa energetske sertifikacije.	Urađeno
Zahteve za kvalifikovane i/ili akreditovane eksperte treba ojačati i uskladiti u svim državama članicama.	Da
Licencirani inženjer koji sprovodi sertifikaciju treba fizički da bude prisutan na licu mesta.	Da
Potrebno je koristiti digitalni alat za proveru kvaliteta podataka u energetske pasošu.	Da
Postoji potreba za daljim sprovođenjem i harmonizacijom načina provere obezbeđenja kvaliteta energetske pasoša .	Da
Postoji potreba za efikasnom upotrebom podataka iz energetske pasoša.	Da
Postoji potreba za nezavisnom procenom efikasnosti šeme energetske sertifikacije.	Da

LITERATURA

- [1] Republika Srbija, Ministarstvo rudarstva i energetike, M. Banjac, B. Ramić, D. Lilić, A. Pantić: Energija u Srbiji, Kosmos d.o.o. Beograd, 2015.
- [2] Šumarac D., Todorović M., Đurović-Petrović M., Trišović N.: Energy Efficiency of Residential Buildings in Serbia, *Thermal Science*, Vol. 14, Suppl.2010, pp. S97-S113.
- [3] Vučićević, B., Turanjanin, V., Bakić, V., Jovanović, M. and Stevanović, Ž.: Experimental and numerical modelling of thermal performance of a residential buildings in Belgrade, *Thermal Science*, Vol. 13, No. 4,2009, pp. 245-252.
- [4] Todorović M., Bajc T: The influence of the regimes of use of building on total building energy consumption, Regional Conference IEEP 2011, Proceedings on CD, Kopaonik, Serbia.
- [5] Republika Srbija, Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine: Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije, Beograd 2013.
- [6] *Treaty establishing the Energy Community*
<https://www.energy-community.org/.../0633975AD6157B9CE053C92FA8C06338.pdf>
- [7] Službeni Glasnik RS br. 61/2011: Regulation on energy efficiency of buildings.
- [8] Službeni Glasnik RS br. 69/2012: Regulation on conditions, content and the way of issuing certificate of energy performances of buildings.
- [9] Official Journal of the European Union L 153: DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), 2010.
- [10] Inženjerska komora Srbije – Baza podataka licenciranih inženjera <http://www.ingkomora.org.rs/clanovi/srclhbas.php?s=1>
- [11] Centralni Registar Energetskih Pasoša <http://www.crep.gov.rs/>
- [12] Nadzorni odbor javnog preduzeća “Gradsko stambeno” – Cenovnik za izdavanje energetske pasoša
- [13] BPIE: Energy Performance Certificates across the EU http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/81/BPIE_Energy_Performance_Certificates_EU_mapping_-_2014.pdf
- [14] International Energy Agency: Energy Performance Certification of Buildings. A policy tool to improve energy efficiency https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/buildings_certification.pdf
- [15] Republika Srbija, Ministarstvo rudarstva i energetike: Drugi nacionalni akcioni plan za energetske efikasnost https://www.energy-community.org/portal/page/portal/ENC_HOME/DOCS/3808275/1ED8E49B21CD20DEE053C92FA8C04013.PDF
- [16] Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) – Book: 2016, <http://www.epbd-ca.eu/ca-outcomes/2011-2015Abstract>

The concept of the System of Buildings Energy Certification in the Republic of Serbia is presented through the legal framework. The paper deals with concept and conditions of issuing Energy Performance Certificate, as well as with types of EPC and energy classes. A brief overview of the training system of experts participating in the energy certification process is given. Also, presented is the procedure for issuing certificates, market prices, quality control and the Central Register of Energy Passports. A special part of the paper deals with a review of system deficiencies in terms of non-compliance with the requirements of Directive 2010/31 / EU.

SYSTEM OF BUILDINGS ENERGY CERTIFICATION IN SERBIA AND COMPLIANCE WITH EPBD REQUIREMENTS

Maja N. Todorović



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017

3 - 4. novembar, Banja Luka

Sesija A1

Sesija A1

Darija Gajić, Darko Todorović, Nermina Zagora

**REPREZENTATIVNI FAKTORI OBLIKA STAMBENIH KUĆA I ZGRADA
BOSNE I HERCEGOVINE ZA ODREĐIVANJE REFERENTNIH ENERGETSKIH RAZREDA9**

Aleksandar Janković, Darija Gajić, Biljana Antunović, Saša Čvoro, Mladen Slijepčević

**ISPITIVANJE TOPLOTNE IZOLOVANOSTI NOVOIZGRAĐENOG OBJEKTA
UPRAVE POLICIJE DISTRIKTA BRČKO15**

Malina Čvoro, Ena Hadžić

**ANALIZA UTICAJA PROMJENE SAOBRAĆAJNIH PRIORITETA I NAVIKA NA
ODRŽIVOST GRADSKO SREDINE, NA PRIMJERIMA LJUBLJANE I BANJA LUKE21**

Malina Čvoro, Slađana Janković

**MOGUĆNOSTI PRIMJENE AKTIVNIH SOLARNIH SISTEMA U JEDNOPORODIČNOM
STANOVANJU – ANALIZA REGIONA26**

Aleksandra Đukić, Jelena Đekić, Petar Mitković

**TERMALNI KOMFOR NA GRADSKOM TRGU GRAĐENOM U DRUGOJ POLOVINI
20. VEKA: NA PRIMERU NIŠA I LESKOVCA31**

Saša Čvoro

POPREČNO PRIRODNO PROVJETRAVANJE I ENERGETSKI EFIKASNA I ODRŽIVA GRADNJA37

Reprezentativni faktori oblika stambenih kuća i zgrada Bosne i Hercegovine za određivanje referentnih energetske razreda

Darija Gajić¹, Darko Todorović², Nermina Zagora³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Institut za urbanizam, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske Banjaluka

³Univerzitet u Sarajevu, Arhitektonski fakultet, Sarajevo, Federacija Bosne i Hercegovine
darija.gajic@aggf.unibl.org, darko.todorovic@iugers.com, nerminaz@af.unsa.ba

Sažetak— Predmetni rad prikazuje reprezentativne faktore oblika (kompaktnosti) stambenih kuća i zgrada Bosne i Hercegovine, parametra koji utiče na potrebnu energiju za grijanje, odnosno na indikator energetske efikasnosti. Faktor oblika utiče na pravilnu postavku potrebne energije za grijanje za dopušteni energetske razred pri certifikovanju zgrada u svim zemljama. U radu su prikazani podaci iz dvogodišnjeg naučno-istraživačkog projekta „Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine“ (2014-2016).

Ključne riječi—faktor oblika, postojeća stambena izgradnja, energetska efikasnost u zgradama

I. UVOD

Mnoštvo strateških dokumenata u Bosni i Hercegovini, sa nivoa entiteta, regiona, i lokalnih zajednica, zaključilo je da se najviše energije, oko 58,44% od ukupne energije, u Bosni i Hercegovini koristi u stambenom sektoru [1]. Pomenute procjene nisu vršene na osnovu indikatora energetske efikasnosti, odnosno potrebne toplotne energije za grijanje [2], nego na osnovu statističkih podataka, energetske bilansa i planova razvoja energetike, na nivou finalne energije i energenata (električne, toplotne, prirodnog gasa, nafte i naftnih derivata, uglja i biomase). Osim što se vodi indikatorom energetske efikasnosti, naučno-istraživački projekat „Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine“ [3] donosi ključne informacije o količini, vrsti/tipu i načinu gradnje, kao i potrebnoj energiji za grijanje stambenih objekata u urbanom i ruralnom području Bosne i Hercegovine. Metodološki okvir istraživanja tipologije stambenih objekata Bosne i Hercegovine je baziran na evropskom internacionalnom istraživačkom projektu „TABULA“^a usklađenim sa direktivama 2002/91/EC i 2006/32/EC i sufinansiranim od strane programa Evropske komisije Intelligent Energy Europe. Projekat „TABULA“, čiji su inicijatori istraživači sa instituta za stanovanje i ekologiju IWU^b iz Darmštata, utvrđuje jedinstveni okvir za klasifikaciju tipologije stambenih objekata u Evropi, sa definisanom metodologijom proračuna energetske karakteristika objekata. Rezultati naučno-istraživačkog projekta su ukazali na zastupljenost postojećih kuća individualnog stanovanja^c, kojih je 97,6% u odnosu na zgrade kolektivnog stanovanja^d (2,4%). Predmetni rad ukazuje na reprezentativni faktor oblika kuća i zgrada prema

reprezentativnim uzorcima tipova/vrsta iz Tipologije, ali i prema količini reprezentativnih uzoraka u tim periodima.

^a. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment

^b. Institut Wohnen und Umwelt GmbH

^c. Individualno stanovanje odnosi se na SFH (Single-Family Houses) – slobodnostojeće kuće i TH (Terraces Houses) – kuće u nizu – skraćenice preuzete iz međunarodnog projekta „TABULA“

^d. Kolektivno stanovanje odnosi se na MFH (Multi-Family Houses) – manje stambene zgrade, AB1 (Apartment Buildings in Urban Blocks) – stambene zgrade u gradskom bloku, AB2 (Apartment Blocks) – stambene lamele i H (High-rise Buildings) – neboderi – skraćenice preuzete iz međunarodnog projekta „TABULA“.

II. ZNAČAJ FAKTORA OBLIKA ZGRADA U ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI U ZGRADAMA

Prema standardu EN 15217 [4] parametri koji imaju uticaj na određivanje visine vrijednosti energetske indikatora za referentni energetske razred u jednoj državi (EP_r) su: klima, vrsta/namjena zgrade, energent, faktor oblika zgrade, ventilacija – brzina izmjene vazduha i nivo osvjjetljenja.

U navedenom standardu faktor oblika nije isto što i odnos kompaktnosti „Sl. 1“, dok je u pravilnicima u BiH i okruženju, varijabla za procjenjivanje kompaktnosti, faktor oblika zgrade. Faktor oblika označen je sa f_0 i predstavlja odnos površine omotača i volumena prostora koji se zagrijava „Sl. 2“.

6.3.2 Impact of building shape

The building shape is characterised by the building shape factor:

$$f = A_E / A_C$$

or the compactness ratio

$$c = A_E / V_C$$

where

A_E is the thermal envelope area, in m²;

A_C is the conditioned area, in m²;

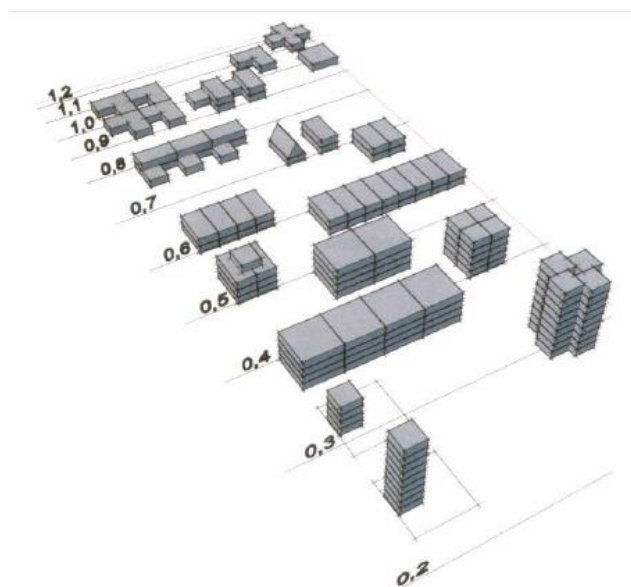
V_C is the conditioned volume, in m³.

Sl. 1. Definicija faktora oblika zgrada i odnosa kompaktnosti u poglavlju 6.3 Izmjene uticaja određenih parametara standarda EN 15217 [4]

5) faktor oblika zgrade $f_0 = A/V_e$ [m^{-1}] je količnik površine omotača grijanog dijela zgrade A [m^2] i zapremine V_e [m^3] grijanog dijela zgrade,

Sl. 2. Definicija faktora oblika zgrada u članu 8. Pravilnika o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada Republike Srpske [5]

Manja površina omotača potrebna za određeni volumen ukazuje na kompaktniju površinu i ima niže zahtjeve za potrošnjom energije za zagrijavanje zgrade. Sa aspekta geometrije, idealnu formu predstavlja lopta, ali sa ograničenjem ortogonalnosti struktura, najbolji oblik je kocka [6]. U literaturi, najčešće srećemo klasifikaciju faktora oblika zgrada prema mogućem grupisanju stambenih jedinica, kada je faktor oblika određen približno, ne uzimajući u obzir moguće postojanje unutrašnjih negrijanih prostora (npr. stepenište, podrum ili tavan) „Sl. 3“. Istraživački radovi o faktoru oblika najčešće se bave formom, posmatraju zgradu kao geometrijski oblik [6], [7], [8], ne analizirajući stvarne zgrade, toplotne zone unutar zgrade i postojanje grijanih i negrijanih prostora.

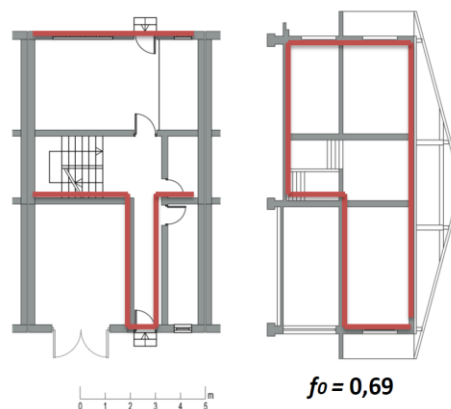


Sl. 3. Približno određivanje faktora oblika ne razmatrajući postojanje negrijanih prostora unutar zgrada prema dijagramu SolarBüro, dr Goretzki [8]

U poređenju sa slobodnostojećom kućom (SFH) puno je bolja povezana gradnja u obliku kuća u nizu (TH) ili stambenih zgrada (MFH, AB1, AB2 i H). Kod njih je površina spoljašnjih zidova dosta manja u odnosu na volumen. Ovakav način gradnje može postići faktor oblika 0,3-0,7. [9]

Naučno-istraživački projekat „Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine“ je ukazao, da iako na izgled kompaktne strukture reprezentativnih kuća u nizu (TH) često imaju dosta negrijanih prostora (garaža, ostave, tavan), te imaju faktor oblika od 0,69 „Sl. 4“.

Ovakav primjer kuće u nizu, da je imao isprojektovane sve grijane prostore unutar kuće, imao bi faktor oblika od 0,50.



Sl. 4. Primjer faktora oblika reprezentativnog uzorka kuće u nizu iz perioda 1961-70 u Tipologiji stambenih zgrada Bosne i Hercegovine [3]

Određivanje adekvatnog reprezentativnog uzorka faktora oblika za svaki tip/vrstu stambenih kuća i zgrada, ukazao bi na pravilnu postavku dopuštene visine potrebne toplotne energije za grijanje, odnosno energetskog indikatora. Pravilna postavka podrazumijeva da većina objekata nakon primjene zahtijevanih energetskih karakteristika propisanih pravilnicima, mogu dostići takođe pravilnikom dopušteni energetski razred.

III. ODREĐIVANJE REPREZENTATIVNIH FAKTORA OBLIKA STAMBENIH KUĆA I ZGRADA U BOSNI I HERCEGOVINI

Pri određivanju reprezentativnog faktora oblika zgrada bitno je sagledati u svakom tipu kolika je uopšte zastupljenost takvih objekata po periodima, sa posebnim osvrtom na posljednji period. U ukupnom broju objekata moramo jasno znati kakve će kompaktnosti (faktora oblika) biti objekti koji se budu obnavljali i kakva je tendencija faktora oblika u gradnji.

A. Zastupljenost kuća i zgrada u Bosni i Hercegovini prema tipu/vrsti i periodu gradnje

Usljed nedostatka podataka o postojećem stambenom fondu Bosne i Hercegovine, bosanskohercegovački ekspertni tim odlučio se za sprovođenje popisa objekata i primjenu statističkih analiza, kao pouzdane osnove za klasifikaciju stambenih objekata na osnovu sličnosti njihovih opštih i specifičnih karakteristika. U periodu juni-septembar 2015. godine statistička agencija je obradila, kompjuterski potpomognutim ličnim anketiranjem (CAPI), 13.044 objekata porodičnog i kolektivnog stanovanja u Bosni i Hercegovini uz procijenjenu mogućnost greške uzorka na +/- 0,92%. U cilju dobijanja što preciznijih podataka o broju stambenih jedinica po opštinama i optimalnog mapiranja zona, polaznih tačaka i kretanja anketara, korišten je model Agencije za statistiku Bosne i Hercegovine (IPSOS BiH) i preliminarni rezultati Popisa stanovništva, domaćinstava i stanova iz 2013. godine. Rezultati popisa stambenih objekata u Bosni i Hercegovini ukazuju na činjenicu da je znatno veći broj objekata individualnog stanovanja u odnosu na kolektivno stanovanje „TABELA I“ i „TABELA II“. Međutim, statistička agencija je ukazala da kada se posmatra broj stambenih jedinica, razlika u

zastupljenosti individualnog je 66,5% u odnosu na 33,5% za kolektivno stanovanje [3].

TABELA I. BROJ STAMBENIH KUĆA U BIH PO TIPOVIMA

Period gradnje	INDIVIDUALNO STANOVANJE	
	SFH	TH
	Slobodnostojeća kuća	Kuća u nizu
do 45.	10.773	1.157
1946-1960.	26.133	1.639
1961-1970.	87.596	7.480
1971-1980.	194.076	9.257
1981-1991.	236.075	5.905
1992-2014.	254.799	6.653
UKUPNO	809.452	32.091
UKUPNO	93,91%	3,72%

TABELA II. BROJ STAMBENIH ZGRADA U BIH PO TIPOVIMA

Period gradnje	KOLEKTIVNO STANOVANJE			
	MFH	AB1	AB2	H
	Manja stambena zgrada	Stambena zgrada u nizu/gradskom bloku	Veliki stambeni blok/stambena lamela	Neboderi
do 45.	450	218		1
1946-1960.	2.462	851	328	9
1961-1970.	3.012	1.429	660	75
1971-1980.	2.203	653	1.419	84
1981-1991.	1.116	88	876	11
1992-2014.	2.725	707	1.040	5
UKUPNO	11.968	3.946	4.323	185
UKUPNO	1,39%	0,46%	0,50%	0,02%

Prilikom popisa 13 044 objekata individualnog i kolektivnog stanovanja u Bosni i Hercegovini, anketari statističke agencije su, prema unaprijed definisanim kriterijumima, evidentirali podatke potrebne za klasifikaciju objekata po tipovima. Obradom prikupljenih podataka, eksperti iz statističke agencije su izvršili procjenu ukupnog broja stambenih objekata i procentualne zastupljenosti pojedinih tipova objekata na nivou BiH.

Rezultati navedene kvantitativne analize, i po ovom kriteriju potvrđuju da individualno stanovanje predstavlja dominantnu formu stanovanja u BiH, „TABELA I” i „TABELA II”, obzirom da ova kategorija objekata, u koju se ubrajaju slobodnostojeće kuće i kuće u nizu, čini čak 97,63% ukupnog stambenog fonda u BiH.

Također, uočava se da je brojčana zastupljenost kuća u nizu znatno manja u poređenju sa slobodnostojećim kućama, „TABELA I” što predstavlja jednu od specifičnosti stambene tipologije u BiH. Nadalje, istraživanje je pokazalo da je procentualna zastupljenost objekata iz kategorije „neboderi“, „TABELA II” najmanja u odnosu na ukupni broj objekata. Obzirom na tehnološke izazove njihove izgradnje, ovi tipovi visokih objekata su građeni najintenzivnije u periodu od 1961-1980 i to isključivo u urbanim područjima.

Izgradnja nebodera je bila podstaknuta tehničkim dostignućima u građevinskom sektoru i predstavljala je odgovor na rastuće potrebe za smještajem većeg broja stanovnika uslijed migracije ruralnog stanovništva prema urbanim centrima. Stoga je i istraživanje pokazalo da je zastupljenost nebodera u ostalim vremenskim periodima gotovo zanemariva.

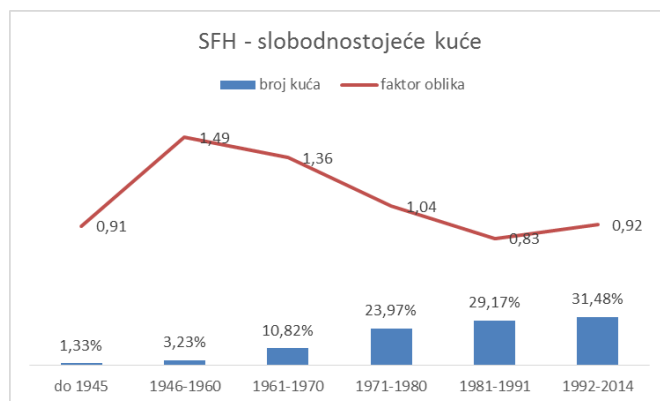
Najdominantniji tip su slobodno-stojeće kuće, kojih je najviše izgrađeno u periodu od 1992-2014 godine (31%), ali je u odnosu na vremensku dužinu perioda, najplodnije razdoblje od 1981. do 1991. godine.

B. Analiza reprezentativnih faktora oblika stambenih kuća i zgrada u Bosni i Hercegovini

Analiza faktora oblika reprezentativnih objekata (kuća i zgrada) u stambenoj izgradnji u Bosni i Hercegovini biće prikazana prema tipovima gradnje (2 tipa individualnog stanovanja i 4 tipa kolektivnog stanovanja). U svakom tipu je grafički predstavljeno prema periodu gradnje količina objekata sa faktorom oblika reprezentativnog uzorka tog perioda.

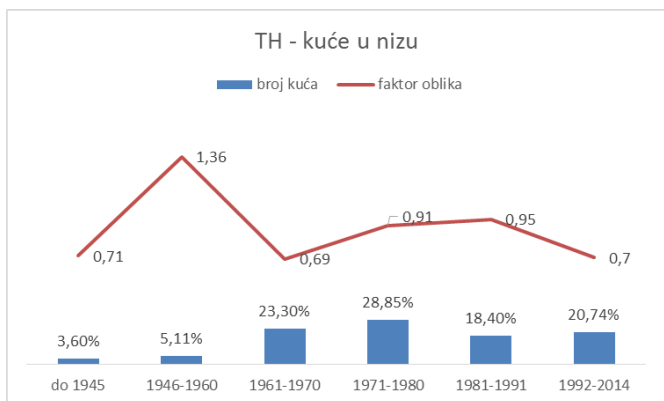
Kod slobodnostojećih kuća faktori oblika ukazuju na visoke vrijednosti u svim periodima gradnje, a do 1981. godine su čak izrazito visoki „Sl. 5“.

Takav odnos ukazuje da su male neto površine kuća u osnovi (oko 72 m² – 8 m x 9 m) sa prizemnom spratnošću, koje se zagrijavaju, odnosno da je površina omotača, koji obuhvata prostor koji se grije, veća od volumena tog prostora. Čak većina reprezentativnih uzoraka ima i negrijanih prostora unutar objekata (garaža, ostava, stepenište) što takođe povećava površinu omotača. Prosjek faktora oblika prema najzastupljenijim periodima (prosjek od 1981-2014) kod slobodnostojećih kuća je oko 0,85. Tipologija je pokazala da su reprezentativni uzorci u osnovi imali manje gabarite i prizemnu spratnost, da su ti uzorci imali samo još jednu grijanu etažu, nad takvom osnovom, faktor oblika bi dostizao i ispod 0,7.



Sl. 5. Faktori oblika i procentualna zastupljenost reprezentativnih uzoraka slobodnostojećih kuća prema periodu gradnje u BiH [3]

Prosjek faktora oblika za kuće u nizu prema najzastupljenijim periodima (1961-2014) je oko 0,80. Za kuće u nizu je karakteristično da zbog bočnih fasadnih zidova koji su između grijanih prostora, mogu imati faktor oblika ispod 0,7 „Sl. 6“, pa čak da se cijeli unutrašnji prostor zagrijava mogli bi dostizati i faktor od 0,5.

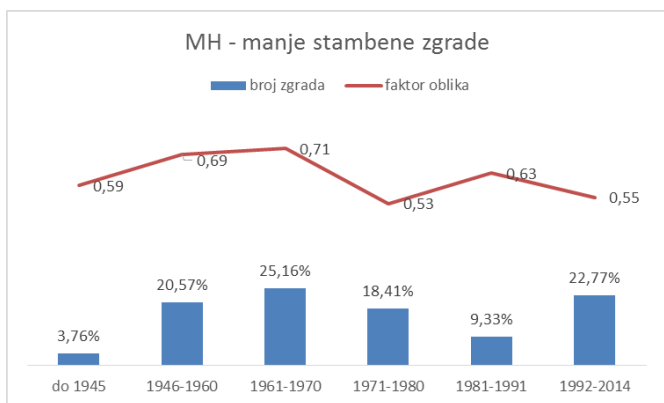


Sl. 6. Faktori oblika i procentualna zastupljenost reprezentativnih uzoraka kuća u nizu prema periodu gradnje u BiH [3]

Kod kolektivnog stanovanja, odnosno manjih stambenih zgrada, stambenih zgrada u nizu, stambenih lamela i nebodera, grupisano je više stambenih jedinica faktor oblika je očekivano niži od 0,7. „Sl. 7“, „Sl. 8“, „Sl. 9“ i „Sl. 10“.

Prosjeak faktora oblika za postojeće manje stambene zgrade prema najzastupljenijim periodima (1946-1980 i 1992-2014) je 0,62, a vidimo da je tendencija nižeg faktora oblika od 0,55 u posljednjem periodu.

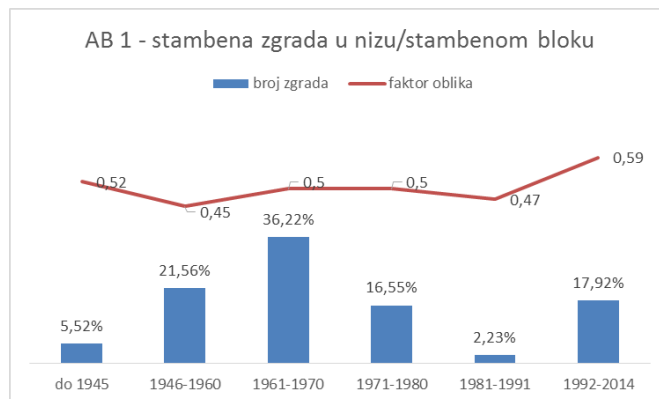
Istraživanja vezana za postojeću gradnju na području Bosne i Hercegovine pokazuju da kod manjih zgrada može biti i niži faktor oblika od 0,40, ako bi unutrašnje stepenište bio grijani prostor i zgrada ne bi imala lomove gabarita na fasadi (npr. lođe i balkone) [2].



Sl. 7. Faktori oblika i procentualna zastupljenost reprezentativnih uzoraka manjih stambenih zgrada prema periodu gradnje u BiH [3]

Kod stambenih zgrada u nizu, „Sl. 8“, koje takođe imaju bočne fasadne zidove prema grijanim prostorima, karakteristično je da su faktori oblika niži od 0,60. Zgrade ovakvog tipa su građene u užem gradskom jezgru i specifično je da iskorištavajući cijelu parcelu, nemaju razučene fasade, te od 1946-1991 imaju faktor oblika i niži od 0,50. U posljednjem periodu (1992-2014) gradnje stambenih zgrada u nizu, postaje prisutno i u širem gradskom jezgru, te zgrade se grade sa smicanjem gabarita i po horizontali i po vertikali, te omotač postaje razućeniji i zato bilježi najviši faktor oblika u

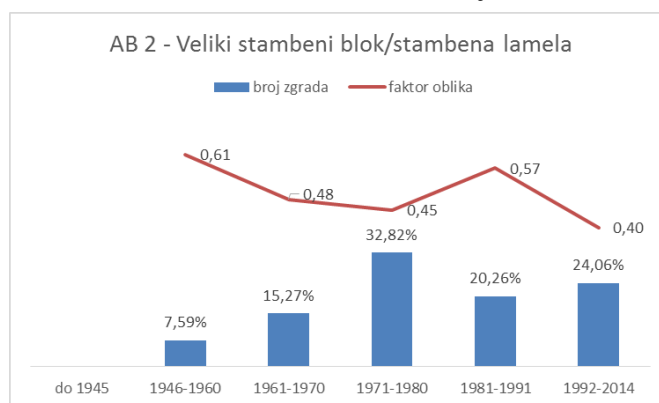
ovom tipu od približno 0,60. Prosjeak faktora oblika za stambene zgrade u nizu prema najzastupljenijim periodima gradnje je 0,50.



Sl. 8. Faktori oblika i procentualna zastupljenost reprezentativnih uzoraka stambenih zgrada u nizu prema periodu gradnje u BiH [3]

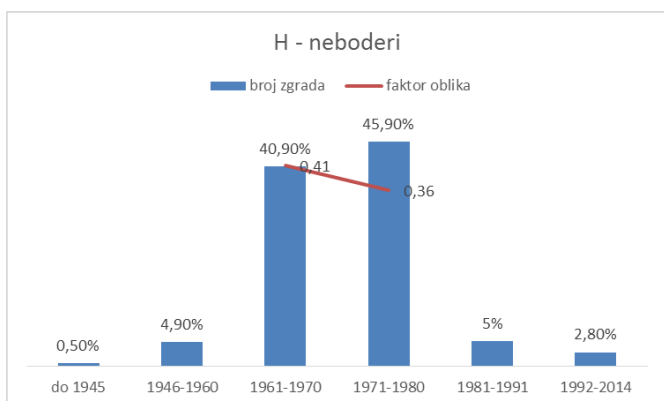
Stambene lamele počinju se graditi nakon Drugog svjetskog rata, te razvojem tehnologija gradnje i društvenim okolnostima raste njihova prisutnost u gradovima „Sl. 9“.

Stambene lamele, takođe kao zgrade u nizu, imaju faktor oblika niži od 0,6, jer posmatrajući lamele one se isto grade u nizovima i npr. jedna središnja lamela ima bočne zidove takođe između dva grijana prostora. Karakteristično kod stambenih lamela je da su one građene na slobodnom prostoru, te su nekad imala i veća smicanja gabarita u horizontalnom smislu nego zgrade u gradskom blokovskom nizu. Posljednji period sa faktorom oblika od 0,40, ukazuje da je tendencija kod stambenih lamela da se što više izgradi parcela, bez smicanja gabarita po horizontali i vertikali. Prosjeak faktora oblika kod stambenih lamela od 1961-2014 je 0,46.



Sl. 9. Faktori oblika i procentualna zastupljenost reprezentativnih uzoraka stambenih lamela prema periodu gradnje u BiH [3]

Neboderi su kategorija koja je najmanje zastupljena u stambenom građevinskom fondu Bosne i Hercegovine. Na „Sl. 10“ je vidno da je gradnja ovakvih struktura bila najprisutnija od 1961-1980. Zbog svoje kompaktnosti i mnoštva stambenih jedinica unutar takve strukture bilježi se i najniži faktor oblika od svih tipova stambene izgradnje.



Sl. 10. Faktori oblika i procentualna zastupljenost reprezentativnih uzoraka nebodera prema periodu gradnje u BiH [3]

Prosjeak faktora oblika za nebodere je 0,38. Razlika faktora oblika od 0,41 do 0,36 govori samo o veličini gabarita, jer je većeg horizontalnog i vertikalnog gabarita neboder sa faktorom oblika od 0,36.

C. Određivanje reprezentativnih faktora oblika za postojeće stambene kuće i zgrade u Bosni i Hercegovini

Analizom reprezentativnih uzoraka faktora oblika svih tipova stambenih kuća i zgrada Bosne i Hercegovine dobijen je prosječni faktor oblika za postojeće kuće i zgrade. Postavka vrijednosti faktora oblika kod novih kuća i zgrada, trebala bi da obiediniti dvije stvari koje do sada nisu razmatrane, da dopusti slobodu u projektovanju kompaktnosti/oblikovanju, a opet da njihovo projektovanje bude energetski efikasna kompaktnost/oblikovanje. Tipologija postojećih stambenih kuća i zgrada, uopšte, ukazuje i na tradiciju u stambenoj gradnji na području Bosne i Hercegovine.

Određivanje adekvatnog faktora oblika za postojeće kuće i zgrade, može se voditi pojedinačnim faktorima prema periodima gradnje, ali pošto se u pravilnicima i standardima mora svesti na jedan reprezentativni faktor oblika tipa zgrade, zbog postavke referentnih energetskih razreda prema tipovima zgrada, trebalo bi se voditi prema reprezentativnim prosječnim faktorima oblika, „TABELA III“ - skraćenice preuzete iz međunarodnog projekta „TABULA“.

Individulano stanovanje odnosi se na SFH (Single-Family Houses) – slobodnostojeće kuće i TH (Terraces Houses) – kuće u nizu.

Kolektivno stanovanje odnosi se na MFH (Multi-Family Houses) – manje stambene zgrade, AB1 (Apartment Buildings in Urban Blocks) – stambene zgrade u gradskom bloku, AB2 (Apartment Blocks) – stambene lamele i H (High-rise Buildings) – neboderi.

TABELA III. PREGLED REPREZENTATIVNIH FAKTORA OBLIKA ZA POSTOJEĆE I NOVE KUĆE I ZGRADE U BOSNI I HERCEGOVINI

faktor oblika	INDIVIDUALNO STANOVANJE			KOLEKTIVNO STANOVANJE		
	SFH	TH	MFH	AB1	AB2	H
do 1945	0,91	0,71	0,59	0,52		
1946-1960.	1,49	1,36	0,69	0,45	0,61	
1961-1970.	1,36	0,69	0,71	0,50	0,48	0,41
1971-1980.	1,04	0,91	0,53	0,50	0,45	0,36
1981-1991.	0,83	0,95	0,63	0,47	0,57	
1992-2014.	0,92		0,55	0,59	0,40	
prosjeak prema zastupljenosti	0,85	0,80	0,62	0,50	0,46	0,38
najniži*	0,70	0,50	0,40	0,40	0,40	0,36

*podrazumijeva najniži faktor oblika zabilježen u istraživanjima u BiH

Za postavku reprezentativnih prosječnih faktora oblika, treba znati da se pri obnovi zgrada može djelimično uticati i na faktor oblika. Dok kod novih stambenih kuća i zgrada reprezentativni faktor oblika bi trebao biti najniži zabilježen faktor oblika iz svih istraživanja koja su ukazivala na faktor oblika.

Faktor oblika postojećih objekata individualnog stanovanja u Bosni i Hercegovini ukazuje da su:

- do 1980. godine male neto površine slobodnostojećih kuća u osnovi koje se zagrijavaju, odnosno da je površina omotača, koji obuhvata prostor koji se grije, veća od volumena tog prostora;

- nakon 1980. godine većina slobodnostojećih kuća je sa dvije grijane etaže, ali grijani prostor nije kompaktan (unutar objekata postoje negrijani prostori – garaže, ostave, tavan);

- kuće u nizu imaju niži faktor oblika od slobodnostojećih kuća, jer dijele dva fasadna zida sa drugim grijanim prostorima;

- većina kuća u nizu je izgrađena nakon 1960. godine i nemaju kompaktan grijani prostor (negrijani prostori - garaže, ostave, tavan) unutar objekta.

Faktor oblika postojećih objekata kolektivnog stanovanja u Bosni i Hercegovini ukazuje da:

- većina tipova postojećih stambenih zgrada imaju negrijana stepeništa;

- manje stambene zgrade imaju najčešću spratnost do 4 etaže, te posjeduju negrijane prostore, kao i razudjenost/smicanja fasade od lođa ili balkona;

- zgrade u blokovskom nizu, kao i stambene lamele imaju bočne fasadne zidove između grijanih prostora, samo su kod stambenih lamela izraženija smicanja gabarita po horizontali i vertikali;

- najveća grupisanja stambenih jedinica, tipa nebodera, čine najkompaktnije zgrade (najniža vrijednost faktora oblika) sa aspekta energetske efikasnosti u zgradama iako u stambenoj izgradnji u Bosni i Hercegovini nakon 1981. godine sve manje je zastupljeno.

IV. ZAKLJUČAK

Reprezentativni faktori oblika sa propisanim energetske karakteristika iz važećih pravilnika, vezanih za energetske efikasnost u zgradama na području Bosne i Hercegovine, su u korelaciji sa pravilnom postavkom referentnih energetske razreda za navedene tipove u stambenoj gradnji.

Istraživanje je pokazalo da se kod postojećih stambenih kuća i zgrada u Bosni i Hercegovini faktor oblika mora tretirati pojedinačno prema 6 tipova (2 tipa individualnog stanovanja – SFH-slobodnostojeće i TH-kuće u nizu i 4 tipa kolektivnog stanovanja – MFH-manje stambene zgrade, AB1-stambene zgrade u nizu, AB2-stambene lamele i H-neboderi). Kod novih kuća i zgrada faktor oblika se može izvesti u 4 tipa prema najnižim zabilježenim faktorima oblika (2 tipa individualnog stanovanja – SFH-slobodnostojeće kuće i TH-kuće u nizu i 2 tipa kolektivnog stanovanja – u 1 tip su objedinjene MH-male stambene zgrade, AB1-stambene zgrade u nizu i AB2-stambene lamele, dok su 1 tip H-neboderi).

Naredna istraživanja bi trebala odrediti adekvatne referentne energetske razrede za postojeće i nove stambene kuće i zgrade prema navedenim faktorima oblika i prema ostalim zahtjevima za energetske karakteristika zgrada, a koji su propisani u važećim pravilnicima na području Bosne i Hercegovine (Republika Srpska, Federacija Bosne i Hercegovine i Distrikt Brčko).

LITERATURA

- [1] Bosnia and Herzegovina First National Energy Efficiency Action Plan 2010-2018., final draft, Sarajevo, 2012.
- [2] D. Gajić, „Energetska optimizacija omotača reprezentativnih uzoraka postojećih stambenih zgrada grada Banjaluka“, Beograd – doktorska disertacija, 2014.
- [3] D. Arnautović-Aksić, Burazor M., Delalić N., Gajić D., Gvero P., Kadrić Dž., Kotur M., Salihović E., Todorović D. i N. Zagora, „Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine“, Sarajevo: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2016.

- [4] EN 15217 Energy performance of buildings -Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings s. Brussels, 2007., pp.13-14.
- [5] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada Republike Srpske, Sl. gl. RS br. 30/15, str. 4.
- [6] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark and M. Zeumer, „Energy Manual: sustainable architecture“, Basel: Birkhäuser, 2008., pp. 85.
- [7] J. Parasonis, A. Keizikas, A. Endriukaiytė and D. Kalibatiene, Architectural Solutions to Increase the Energy Efficiency of Buildings, Journal of Civil Engineering and Management, Volume 18(1), pp. 71–80, Taylor and Francis, 2012.
- [8] D. Gauzin-Muller, „Sustainable architecture and Urbanism: Concepts, Technologies and Examples“, Basel: Birkhäuser, 2002., pp. 49.
- [9] M. Zbašnik-Senegačnik, „Pasivna kuća“, Zagreb: SUN ARH d.o.o., 2009.
- [10] K. Lylykangas, „Shape Factor as an Indicator of Heating Energy Demand“, 15. Internationales Holzbau-Forum 09, http://www.forum-holzbau.ch/pdf/ihf09_Lylykangas.pdf

ABSTRACT

This paper analyses the representative shape factors (compactness ratio) of residential houses and buildings in Bosnia and Herzegovina, a parameter that influences the energy need for heating, or an energy efficiency indicator. The shape factor affects the accurate calculation of the energy need for heating for reference energy class in building certification in all countries. This paper is based on the data from a two-year scientific-research project "Typology of Residential Buildings in Bosnia and Herzegovina" (2014-2016).

THE REPRESENTATIVE COMPACTNESS RATIO OF RESIDENTIAL HOUSES AND BUILDINGS OF BOSNIA AND HERZEGOVINA FOR THE DETERMINATION OF REFERENCE ENERGY CLASSES OF BUILDINGS

Darija Gajic, Darko Todorovic, Nermina Zagora

Ispitivanje toplotne izolovanosti novoizgrađenog objekta uprave Policije Distrikta Brčko

Aleksandar Janković¹, Darija Gajić¹, Biljana Antunović¹, Saša Čvoro¹, Mladen Slijepčević¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
aleksandar.jankovic@aggf.unibl.org, darija.gajic@aggf.unibl.org, biljana.antunovic@aggf.unibl.org, sasa.cvoro@aggf.unibl.org, mladen.slijepcevic@aggf.unibl.org

Sažetak— Ispitivanje toplotne izolovanosti novoizgrađenog objekta policije Distrikta Brčko obavljeno je u cilju provjere ispunjenosti zahtjeva definisanih projektovanim i propisanim uslovima. Mjerenjem koeficijenta prolaza toplote i termografskim pregledom utvrđeno je da vanjski zid po svojim toplotnim karakteristikama na ispitivanim mjernim pozicijama ispunjava propisane zahtjeve i da u omotaču objekta nema toplotnih nepravilnosti, niti povećanih toplotnih gubitaka i odstupanja u odnosu na projektovano stanje.

Ključne riječi—termokamera; koeficijent prolaza toplote; HFM metod; termogram;

I. UVOD

U cilju provjere ispunjenosti zahtjeva definisanih projektovanim i propisanim uslovima izvršeno je ispitivanje toplotne izolovanosti novoizgrađenog objekta policije Distrikta Brčko. Objekat se nalazi u sjeverozapadnom dijelu Brčkog, u naselju Mujkići i udaljen je oko 200 metara od rijeke Save i granice sa Hrvatskom i oko 100 metara od putnog pravca Brčko – Banja Luka (Sl. 1).



Sl. 1. Lokacija novoizgrađenog objekta policije distrikta Brčko

Novi objekat policije distrikta Brčko je slobodnostojeći objekat koji se sastoji od četiri etaže (Sl. 2). Građen je prema visokim standardima energetske efikasnosti sa kvalitetnom toplotnom izolacijom. Objekat posjeduje vlastiti centralni sistem za grijanje, a takođe koristi energiju i iz alternativnih izvora. Kompletan vanjski zid je toplotno izolovan ekspanzibilnim polistirenom EPS ($\lambda=0.040 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), debljine 12 cm. Ostatak vanjskog zida čine dvostruko ostakljeni prozori sa aluminijumskim profilima.



Sl. 2. Jugoistočna i jugozapadna fasada

Ispitivanje toplotnih karakteristika omotača izvršeno je pomoću instrumenta za određivanje koeficijenta prolaza toplote Testo 435-2 i termografskim pregledom objekta termokamerom Testo 885. Određivanje koeficijenta prolaza toplote u realnim uslovima pomoću Testo 435-2 uređaja je izvršeno u skladu sa standardom BAS ISO 9869-1 (2015) [1]. Tehničke karakteristike multifunkcionalnog mjernog instrumenta za određivanje koeficijenta prolaza toplote zida date su u tabeli I.

TABELA I. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE MJERNOG UREĐAJA TESTO 435-2

Testo 435-2 za mjerenje U vrijednosti			
	<i>mjerni opseg</i>	<i>preciznost</i>	<i>rezolucija</i>
Bežična imerziona/penetraciona sonda	-50 do +150 °C	±0.2 °C (-25 do 74.9 °C)	0.1 °C
TC temperaturna sonda za snimanje U-vrijednosti	-20 do +70 °C	±(0.1 Wm ⁻² K ⁻¹ ili 2 % srednje vrijednosti) pri temperaturnoj razlici od 20 °C	0.001 Wm ⁻² K ⁻¹

Termokamera Testo 885 omogućava termovizijsko snimanje objekata registrovanjem emitovanog infracrvenog zračenja u opsegu talasnih dužina od 0.9 do 14 mikrometara. Infracrveno zračenje zavisi od temperature objekta, pa termokamera omogućava i procjenu površinske temperature. Termovizijski pregled objekta izvršen je u skladu sa važećim standardom BAS EN 13187 (2013) [2]. Tehničke karakteristike termokamere Testo 885 su prikazane u tabeli II.

TABELA II. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE TERMOKAMERE TESTO 885

Testo 885 termokamera	
Rezolucija	320 X 240
Termička senzitivnost	30 mK pri 30 °C
Tačnost	±2 % ili 2 °C
Veličina slike	3.1 MP
Temperaturni opseg mjerenja	-20 do 100 °C ili 0 do 350 °C
Radna temperatura (ambijentalni uslovi)	-15 do 50 °C

II. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA PROLAZA TOPLOTE VANJSKOG ZIDA

Vanjski zid, koji čini dio toplotnog omotača objekta koji graniči sa spoljašnjim vazduhom u potpunosti je toplotno izolovan ekspanziranom polistirenom EPS ($\lambda=0.040 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) debljine 12 cm. Površina koju zauzima vanjski zid, oduzimajući površinu koju nose ugrađeni prozori iznosi 2191 m². Površina koju zauzimaju prozori u termičkom omotaču objekta iznosi 665 m² i u pitanju su dvostruko ostakljeni prozori sa aluminijumskim profilima. Četiri vrste prozora su ugrađeni u vanjski zid čija se U-vrijednost kreće između 1.4 i 1.5 Wm⁻²K⁻¹, u zavisnosti od udjela aluminijumskog okvira u površini prozora.

Prema projektnim karakteristikama koeficijent prolaza topline vanjskog zida iznosi 0.300 Wm⁻²K⁻¹, a toplotne karakteristike materijala koji čine ovaj zid su prikazane u tabeli III.

TABELA III. TERMIČKE KARAKTERISTIKE VANJSKOG ZIDA

Naziv materijala	Debljina (cm)	Koeficijent toplotne provodljivosti (W/mK)	Toplotna otpornost (m ² K/W)
Unutrašnji prelaz toplote			0.130
Cementni malter	2	1.4	0.014
AB ploča	20	1.51	0.132
Ekspanzirani polistiren - EPS	12	0.040	3.000
Fasadni malter	1	0.7	0.014
Spoljašnji prelaz toplote			0.040
Koeficijent prolaza toplote zida		U (Wm⁻²K⁻¹)	0.300

U zavisnosti od klimatske zone, važeći Pravilnici propisuju i odgovarajuće maksimalne dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaza toplote za građevinske elemente. Distrikt Brčko prema svojim klimatskim karakteristikama ima srednju mjesečnu temperaturu najhladnijeg mjeseca u godini nižu od 3 °C, pa stoga spada u hladniju klimatsku zonu BiH. Prema važećem Pravilniku u Republici Srpskoj [3], najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaza toplote za vanjske zidove u hladnijoj klimatskoj zoni iznosi 0.300 Wm⁻²K⁻¹. S druge strane, prema važećem Pravilniku u Federaciji BiH [4], najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaza toplote za vanjske zidove u hladnijoj klimatskoj zoni iznosi 0.450 Wm⁻²K⁻¹.

Koeficijent prolaza toplote zida mjereno je na dvije pozicije na vanjskom zidu. Toplotni mostovi i konstruktivni spojevi, kod kojih je dominantan dvodimenzionalni i trodimenzionalni prolaz toplote su izbjegnuti prilikom odabira mjerne tačke. Pored toga, tokom mjerenja senzor za mjerenje temperature spoljašnjeg vazduha nije bio izložen direktnom Sunčevom zračenju i padavinama. Sprovedena su trodnevna kontinualna mjerenja sa petnaestominutnim periodom osrednjavanja, čime je postignuta veća vjerovatnoća dobijanja reprezentativnih vrijednosti. Sa unutrašnje strane zida je postavljen senzor za mjerenje gustine toplotnog fluksa, dok je senzor za mjerenje temperature vazduha izvan prostorije postavljen simetrično sa druge strane zida [5]. U cilju odabira reprezentativne mjerne tačke u skladu sa pomenutim standardom izvršeno je snimanje mjernog mjesta termovizijskom kamerom. Pri tome, nisu uočene nikakve nepravilnosti u temperaturnoj raspodjeli na površini zida koje bi uticale na vjerodostojnost mjerenja (detaljnije u odjeljku III - Termovizijsko snimanje objekta). Tokom čitavog perioda mjerenja razlika između temperature spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha iznosila je više od 10 °C.

Za teže građevinske elemente koji imaju specifičnu toplotu po jediničnoj površini veću od 20 kJ·m⁻²K⁻¹, mjerenje se vrši tokom perioda koji je jednak cjelobrojnom umnošku 24 h. Test se može završiti samo kada trajanje testa duže od 72 h, a vrijednost toplotne otpornosti dobijena na kraju testa ne odstupa za više od ± 5% od vrijednosti dobijene 24 h ranije [6]. Takođe, promjena u akumuliranoj toploti unutar zida treba biti manja od 5% od toplote koja prolazi kroz zid tokom perioda testiranja. Toplotna otpornost dobijena analizom

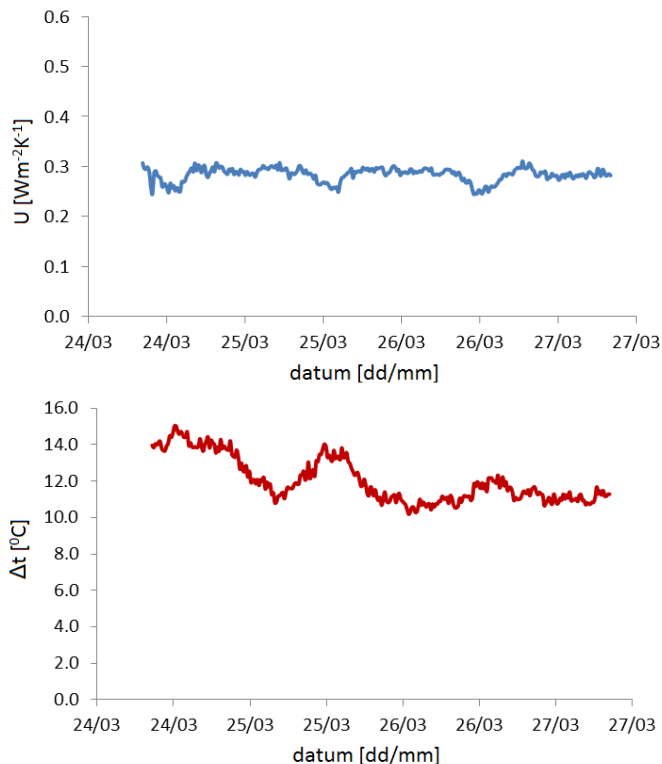
podataka iz prvog dijela mjernog perioda tokom INT (2 x DT / 3) broja dana ne smije odstupati za više od $\pm 5\%$ od vrijednosti dobijene iz posljednjeg dijela mjernog perioda istog trajanja, pri čemu je DT trajanje testa u danima, a INT označava cjelobrojni dio broja [7].

Prva mjerna pozicija nalazi se na sjeverozapadnoj fasadi, (Sl. 3a i 3b). Srednja vrijednost koeficijenta prolaza toplote zida za trodnevni interval mjerenja iznosi $0.296 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, dok prosječna temperaturna razlika između unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha tokom ovog intervala mjerenja iznosi $12.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Druga mjerna pozicija nalazi se na sjeveroistočnoj fasadi. Srednja vrijednost koeficijenta prolaza toplote zida za trodnevni interval mjerenja iznosi $0.284 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, dok prosječna temperaturna razlika između unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha tokom ovog intervala mjerenja iznosi $11.1 \text{ }^\circ\text{C}$.



Sl. 3. a) položaj U-senzora unutar prostorije i b) položaj bežičnog temperaturnog senzora na sjeverozapadnoj fasadi

Vrijednost toplotne otpornosti na kraju mjernog perioda odstupa za $+0.3\%$ (prva mjerna pozicija) i $+2.39\%$ (druga mjerna pozicija) u odnosu na vrijednost dobijenu 24h ranije. Toplotna otpornost dobijena analizom podataka za vremenski period koji obuhvata prva dva dana mjerenja odstupa -1.26% (prva mjerna pozicija) i -3.37% (druga mjerna pozicija) u odnosu na vrijednost dobijenu za vremenski period koji obuhvata posljednja dva dana mjerenja. Grafički prikaz rezultata mjerenja koeficijenta prolaza toplote i odgovarajuće temperaturne razlike između spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha na mjestu poziciji 1 (sjeverozapadna fasada) su prikazani na slici 4.



Sl. 4. a) koeficijent prolaza toplote i b) temperaturna razlika između unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha na prvoj mjestu poziciji

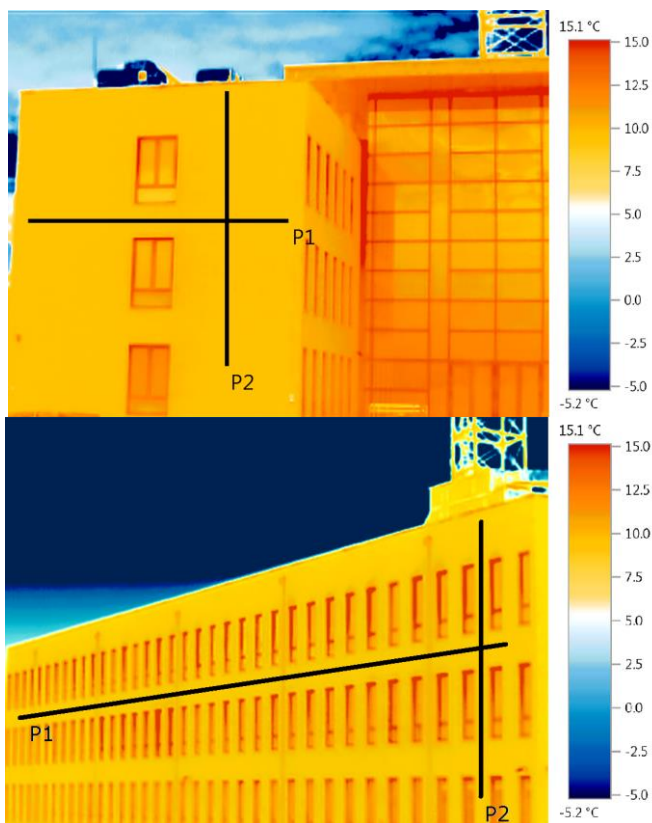
Prema dobijenim rezultatima sa ispitivane dvije mjerne pozicije može se zaključiti da spoljašnji zid po svojim toplotnim karakteristikama i ugrađenoj toplotnoj izolaciji odgovara kako projektovanim, tako i propisanim uslovima oba entitetska Pravilnika. Mjerenjem je utvrđeno da je koeficijent prolaza toplote zida zanemarljivo niži u odnosu na projektnu vrijednost. Njegova izmjerena vrijednost je značajno niža u odnosu na vrijednost koju propisuje Pravilnik o tehničkim zahtjevima za toplotnu zaštitu objekata i racionalnu upotrebu energije u Federaciji BiH ($U=0.450 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) i neznatno niža u odnosu na Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada u Republici Srpskoj ($U=0.300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), na osnovu čega se može zaključiti da je toplotno-izolacioni kvalitet vanjskog zida visok i da su njegove toplotne karakteristike u skladu sa važećim regulativama.

III. TERMORIZIJSKO SNIMANJE OBJEKTA

U cilju ispitivanja stanja omotača objekta i njegove toplotne izolovanosti sprovedeno je termovizijsko snimanje objekta. Kamera kojom je obavljeno termovizijsko snimanje objekta je Thermal imager – Testo 885, a obrada termovizijskih fotografija urađena je u programu Testo IRSof Software. U toku termovizijskog snimanja, na dan 25.03.2016. godine, vremenski uslovi su bili odgovarajući: nije bilo padavina, brzina vjetrova nije prelazila vrijednost od 4 km/h , spoljašnja temperatura vazduha je iznosila $8 \text{ }^\circ\text{C}$, a relativna vlažnost vazduha 60% . Snimanje objekta je obavljeno u toku noći, pa nijedan dio fasade nije bio osunčan, a površina omotača zgrade je bila suva. Snimanje je vršeno tokom perioda, kada je unutrašnjost objekta bila zagrijana, pri čemu

je unutrašnja temperatura vazduha iznosila 21°C. Temperaturna razlika između unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha je bila na potpuno zadovoljavajućem nivou (13 °C).

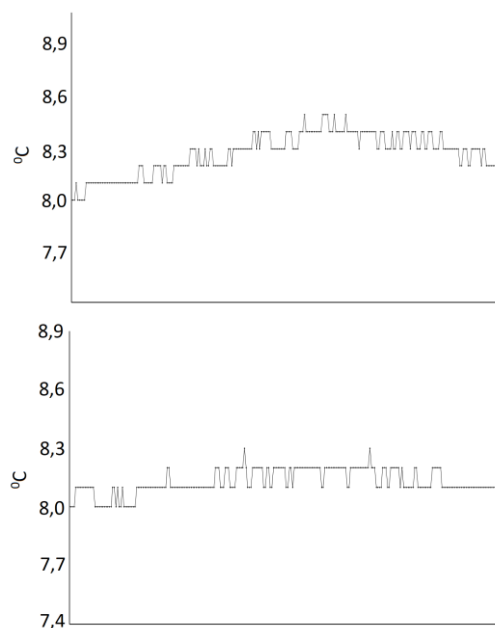
Snimanje je obavljeno u dvije faze: vanjsko snimanje omotača zgrade obavljeno je od 3:00 do 3:45 časa, a snimanje unutrašnjosti zgrade od 3:45 do 4:30 časa. Kolekcija termovizijskih snimaka obuhvata: snimke omotača zgrade slikane spolja i snimke omotača zgrade slikane iz prostorija u kojima je mjereno koeficijenta prolaza toplote. Ukupno je snimljeno oko 40 IC snimaka. U izvještaju su prikazani reprezentativni snimci fasada objekta, na slikama 5a i 5b, a na slikama su prikazani temperaturni profili, na osnovu kojih se mogu izvući zaključci o kvalitetu ugradnje toplotne izolacije i stepenu toplotne izolovanosti objekta.



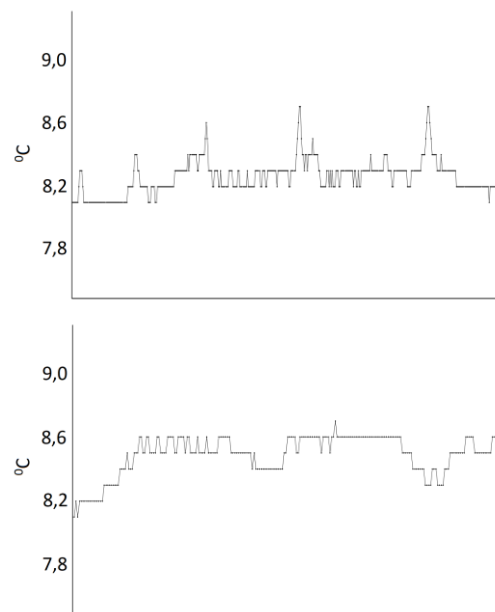
Sl. 5. Termovizijski snimak a) sjeverozapadne i b) jugozapadne fasade (linija P1 označava horizontalni, a linija P2 vertikalni temperaturni profil)

Niske temperature spoljašnje površine omotača na fasadi pri temperaturi spoljašnjeg vazduha od oko 8 °C ukazuju na dobru toplotnu izolovanost objekta (od 8.0 °C do 8.7 °C). Na termogramima je primjetna temperaturna homogenost spoljašnje površine aluminijskih okvira i zastakljenja, što ukazuje na kvalitetnu ugradnju prozora. Takođe, ne javljaju se ni značajnije temperaturne razlike između najtoplijih i najhladnijih tačaka na elementima prozora [8]. Horizontalni temperaturni profil duž prikazane sjeverozapadne i jugozapadne fasade najviše oscilira za 0.3 °C i 0.6 °C, redom, (Sl. 6a i 7a), a vertikalni temperaturni profil za 0.3 °C i 0.6 °C, redom, (Sl. 6b i 7b). Temperaturna uniformnost u horizontalnom i vertikalnom pravcu duž fasada ukazuju na

homogenost strukture spoljašnjeg zida i ujednačenu debljinu toplotne izolacije.



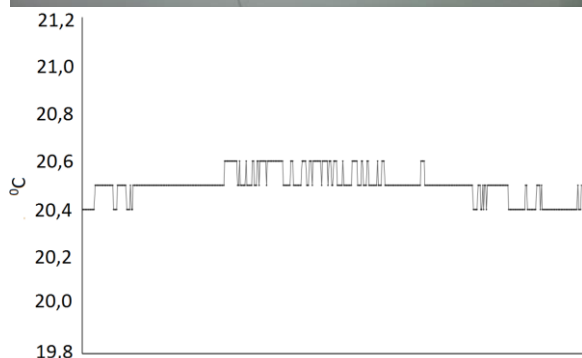
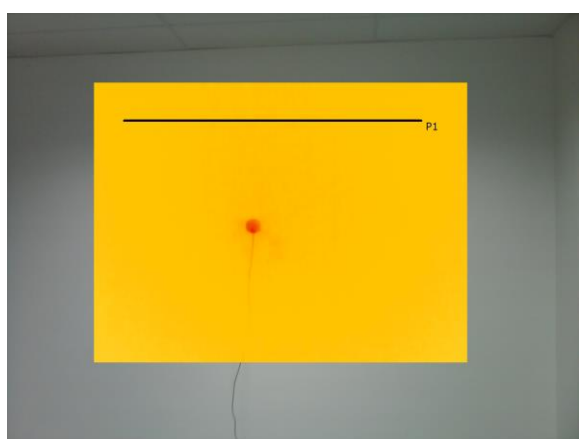
Sl. 6. a) Horizontalni i b) vertikalni temperaturni profil na sjeverozapadnoj fasadi označeni sa linijama P1 i P2 na slici 5a



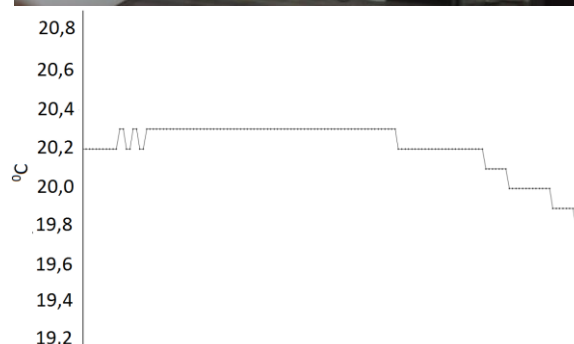
Sl. 7. a) Horizontalni i b) vertikalni temperaturni profil na jugozapadnoj fasadi označeni sa linijama P1 i P2 na slici 5b

Na osnovu horizontalnog temperaturnog gradijenta i slika 8 i 9, može se zaključiti da su U-senzori za određivanje koeficijenta prolaza toplote postavljeni u najbolji mogući položaj, čime je izbjegnuta značajniji uticaj toplotnih mostova i temperaturnih nepravilnosti, a ujedno i omogućeno pravilno određivanje reprezentativnog koeficijenta prolaza toplote

vanjskog zida. Visoke temperature unutrašnje površine vanjskog zida (sjeverozapadni zid – 20.5 °C, jugozapadni zid – 20.2 °C) pri temperaturi unutrašnjeg vazduha od 21 °C ukazuju na dobru toplotnu izolovanost objekta. Horizontalni temperaturni gradijent na unutrašnjoj površini sjeverozapadnog vanjskog zida gotovo da i ne postoji. Temperaturni gradijent na unutrašnjoj površini jugozapadnog vanjskog zida u oblasti između dva prozora je slab i iznosi 0.5 °C, ali prvenstveno zbog toga što element graniči sa prozorima kroz koje se uobičajeno javlja povećan gubitak toplote. Ipak po svojoj vrijednosti ovaj gradijent je mali da bi mogao uticati na mjerenja koeficijenta prolaza toplote na ovoj poziciji. Na osnovu homogenosti temperaturnih polja i postojanja zanemarljivih gradijenata, može se zaključiti da je vanjski zid po svojoj strukturi homogen sa ujednačenom debljinom toplotne izolacije.



Sl. 8. a) Horizontalni i b) vertikalni temperaturni profil na sjeverozapadnoj fasadi označeni sa linijama P1 i P2 na slici 5a



Sl. 9. a) Horizontalni i b) vertikalni temperaturni profil na sjeveroistočnoj fasadi označeni sa linijama P1 i P2 na slici 5a

IV. ZAKLJUČAK

Na osnovu mjerenja koeficijenta prolaza toplote može se zaključiti da vanjski zid po svojim toplotnim karakteristikama na ispitivanim mjernim pozicijama ispunjava zahtjeve propisane kako Pravilnikom o tehničkim zahtjevima za toplotnu zaštitu objekata i racionalnu upotrebu energije (Sl. Novine FBiH, broj 49/09), tako i Pravilnikom o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada (Sl. Glasnik RS, broj 30/15). Takođe, na osnovu istih rezultata može se zaključiti da je debljina ugrađene toplotne izolacije na vanjskom zidu 12 cm koeficijenta toplotne provodljivosti $0.040 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Termovizijski pregled objekta ukazuje da u omotaču objekta nema toplotnih nepravilnosti, niti povećanih toplotnih gubitaka i odstupanja u odnosu na projektovano stanje. Termovizijski snimci pokazuju homogenost strukture vanjskog zida i ujednačenu debljinu toplotne izolacije. Na osnovu snimaka može se zaključiti da je vanjski zid čitavom svojom površinom izolovan toplotnom izolacijom debljine 12 cm koeficijenta toplotne provodljivost $0.040 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, kako je i bilo predviđeno projektantskim zahtjevima, a da su toplotne karakteristike omotača duž čitave površine zadovoljavajuće u pogledu zahtjeva koji su propisani važećim Pravilnicima.

LITERATURA

- [1] BAS ISO 9869-1:2015, Mjerenje "in situ" toplotnog otpora i toplotne provodljivosti - Dio 1: Metoda mjerenja mjeracem toplotnog toka, Međunarodna organizacija za standardizaciju, Ženeva, Švajcarska.
- [2] BAS EN 13187:2013, Kvalitativno otkrivanje toplotnih nepravilnosti u omotaču zgrada – infracrvena metoda. Međunarodna organizacija za standardizaciju, Ženeva, Švajcarska.

- [3] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada u Republici Srpskoj, Službeni Glasnik Republike Srpske, broj 30/15.
- [4] Pravilnik o tehničkim zahtjevima za toplotnu zaštitu objekata i racionalnu upotrebu energije u Federaciji BiH, Službene Novine Federacije BiH, broj 49/09.
- [5] B. Antunović, A. Janković i Lj. Preradović, „Merenje koeficijenta prolaza toplote neprozirnog fasadnog zida i povezanost sa meteorološkim uslovima,“ Tehnika, vol. 70(4), str. 593 – 598, 2015.
- [6] B. Antunović, M. Stanković, A. Janković, D. Gajić, D. Todorović, „Mjerenje koeficijenta prolaza toplote zida u zgradi Rektorata univerziteta u Banjoj Luci,“ Međunarodni naučno-stručni skup Savremena teorija i praksa u graditeljstvu, Zavod za izgradnju a.d., Banja Luka, str. 37-46, 2012.
- [7] A. Janković, B. Antunović, Lj. Preradović, „Alternative Method for On Site Evaluation of Thermal Transmittance,“ FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering, Vol. 15, No 2, 2017, pp. 341 – 351.
- [8] A. Janković, D. Gajić, B. Antunović, „Značaj blower door test-a pri određivanju broja izmjena vazduha na čas,“ Međunarodna naučno-stručna konferencija Savremena teorija i praksa u graditeljstvu, Arhitektonsko-građevinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, 229-236, 2016.

ABSTRACT

Inspection of the thermal insulation of the newly constructed building of the Brčko District Police Department was carried out in order to check the fulfillment of the requirements defined by the projected and prescribed conditions. By measuring the thermal transmittance and thermographic inspection it was determined that the outer wall, according to its thermal characteristics, meets the prescribed requirements and that there are no thermal irregularities in the envelope of the building as well as no increased heat losses and deviations from the projected state.

INSPECTION OF THE THERMAL INSULATION OF THE NEWLY CONSTRUCTED BUILDING OF THE BRČKO DISTRICT POLICE DEPARTMENT

Aleksandar Janković, Darija Gajić, Biljana Antunović, Saša Čvoro, Mladen Slijepčević

Analiza uticaja promjene saobraćajnih prioriteta i navika na održivost gradske sredine, na primjerima Ljubljane i Banja Luke

Malina Čvoro¹ Ena Hadžić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko građevinsko geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
malina.cvoro@aggf.unibl.org, ena.hadzic92@gmail.com

Sažetak – Rast gradskih sredina i migracija stanovništva ka većim gradskim centrima doveli su do povećanja broja putničkih automobila što je negativno uticalo na postojeću saobraćajnu mrežu i ostavilo duboke tragove na životnu sredinu. Veliki udio u ukupnoj potrošnji svjetske energije i emisiji gasova staklene bašte predstavlja saobraćajni sektor. Popularizacija pješačkog i biciklističkog saobraćaja, veća upotreba javnog gradskog prevoza te ograničeno i efikasno korištenje privatnih automobila su samo neke od mjera koje vode ka stvaranju održivog saobraćajnog sektora i održive gradske sredine. Rad se bavi analizom uticaja promjena saobraćajnih prioriteta i navika prepoznatih kod svjetskih i evropskih gradova sa posebnim osvrtom na Ljubljanu, koja prati i postavlja trendove održivog razvoja gradskih sredina. Prepoznavanje Ljubljane i njenih strateških mjera kao primjera dobre prakse, te prepoznavanje potencijala grada Banja Luke, mogu u velikoj mjeri doprinijeti razvoju saobraćajnog sektora Banja Luke na način koji bi težio promjeni saobraćajnih prioriteta i promjeni svakodnevnih navika stanovnika. Za autore ostaje ključno uvjerenje, da će grad na svom putu ka održivoj i prosperitetnoj gradskoj sredini formirati lokalne mjere za stvaranje održivog saobraćajnog sektora, obzirom na udio saobraćaja u ukupnoj potrošnji energije i emisiji štetnih gasova.

Ključne riječi—*održiva sredina 1; saobraćajni prioriteti 2; održivi saobraćajni sektor 3; Ljubljana 4; Banja Luka 5;*

I. UVOD

Grad, gradska naselja nastaju planski i po pravilima, a svojom strukturom iskazuju identitet i posebnost sredine. Gradnjom gradova naselja čovjek je težio da prirodno okruženje prilagodi sebi i svojim potrebama, težio je da ga savlada i ukroti. Da bi gradska sredina neometano funkcionisala i zadovoljavala sve potrebe i zahtjeve svojih korisnika za neophodna je energija, čije neracionalno i nemarno korištenje ostavlja duboke i neizbrisive tragove na životnu sredinu i dovodi u pitanje njen dalji opstanak. [1]

Gradovi koriste oko 75% od ukupne proizvedene energije i emituju oko 60% gasova staklene bašte.[2], a autori u svojoj knjizi „*The Whole Building Handbook*“ navode da

80% od ukupne energije koja se proizvede za zadovoljavanje svjetskih potreba nastaje iz fosilnih goriva, a 80% gasova staklene bašte nastaje kao produkt sagorjevanja istih čiji se negativan uticaj oslikava na životnu sredinu. [3]

Društvo i dalje nastavlja svoj rast i tehnološki razvoj i zahtijeva sve veće potrebe za energijom, pijacom vodom, staništem, što rezultira drastičnim smanjenjem rezervi neobnovljivih izvora energije i negativanim uticajem na životnu sredinu, a da bi se obezbijedio opstanak budućih naraštaja potrebno je: efikasnije i racionalnije koristiti rezerve neobnovljivih izvora energije, smanjiti emisije gasova staklene bašte kao i podsticati upotrebu obnovljivih izvora energije.

Djelovanjem sa aspekta urbanističkog i arhitektonskog planiranja može se dosta doprinijeti smanjenju negativnih uticaja na opstanak životne sredine i povećanju energetske efikasnosti sve u cilju zaštite i održivosti sredine. Planiranjem i gradnjom sredina koje su u skladu sa prirodom i okruženjem formira se zdrava i održiva sredina. World Commission 1987. godine je održivi razvoj definisala kao „kao onaj razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnje generacije ne ugrožavajući mogućnost budućih generacija da zadovolje svoje potrebe“. [4]

Promjena svakodnevnih navika stanovnika, saobraćajnih prioriteta, očuvanje i zaštita zelenih površina, su samo neke od transformacijskih mjera kojima su pojedini gradovi uticali na održivost i čime stvorili zdrave, sigurne i humane sredine, a neki od njih su postali Evropske zelene prestonice (European Green Capital): Najmagen (2018.), Esen (2017.), Ljubljana (2016.), Bristol (2015.), Kopenhagen (2014.), Nant (2013.), Vitoria (2012.), Hamburg (2011.), Štokholm (2010.) i dr. [5]

II. PROMJENA SAOBRAĆAJNIH PRIORITETA U CILJU POVEĆANJA ODRŽIVOSTI

Rast i razvoj urbanih gradskih sredina doveo je do povećanja broja putničkih automobila koju postojeća

saobraćajna infrastruktura, u većini slučajeva, ne može da primi što dovodi do učestalih saobraćajnih kolapsa u gradskim jezgrima i velikom doprinosu saobraćajnog sektora u zagađenju životne sredine. Saobraćajni sektor ima značajan udio u ukupnoj potrošnji energije i emisiji gasova CO₂ i time ostavlja dubok trag na životnu sredinu. Izduvni gasovi iz saobraćajnog sektora čine 23% udjela u ukupnoj emisiji gasova staklene bašte. [6]

Stvaranje održivog saobraćajnog sektora i redukcije izduvnih gasova iz ovog sektora igraju važnu ulogu u daljem toku razvoja našeg društva.

Princip mobilnosti stanovnika gradskih sredina uz ograničeno i efikasnije korištenje privatnih automobila je jedan od ciljeva održivog razvoja u planiranju i upravljanju saobraćajnim sektorom. [7]

Popularizacija pješačkog i biciklističkog saobraćaja, veća upotreba javnog gradskog prevoza umjesto privatnih automobila, smanjenje upotrebe fosilnog goriva i veća upotreba biogasa dobijenog od organskih materijala, afirmacija električnih automobila, formiranje zona bez automobila su samo neke od mjera saobraćajnog sektora čiji se finalni rezultat ogleda u redukciji gasova staklene bašte, a time i u smanjenju negativnog uticaja ovog sektora na životnu sredinu.

Planovi za formiranje zona bez automobila u užim centralnim zonama gradskih sredina i afirmacija pješačkog i biciklističkog saobraćaja postaju sve učestaliji i atraktivniji.

U 2014. godini šest evropskih i svjetskih metropola: Pariz, Oslo, Milano, Dablin, Madrid i Brisel dali su svoje prijedloge kako svoje centralne zone pretvoriti u pješačke zone bez automobila i na taj način smanjiti zagađenje vazduha i emisiju gasova staklene bašte. [8]

Plan za Pariz se ogledao u rekonstrukciji i preuređenju desne obale rijeke Siene u ozelenjenu promenadu i mjesto za aktivan odmor i relaksaciju stanovništva, formiranje 3,3 kilometra dugačke zone bez automobila na obali rijeke Siene u centralnom dijelu grada. [9] Oslo u cilju redukcije zagađenja vada i smanjenja gasova staklene bašte planira zabranu automobila do 2019. godine u centralnoj zoni grada, povećanje biciklističke infrastrukture, te stavljanje fokusa na javni gradski prevoz.

Ideja Milana zasniva se na potpunoj pješačkoj zoni unutar centralne kulturno – istorijske zone, zone oko Piazza della Scala.

Sličnu ideju kao i Oslo o zabrani automobila u užoj centralnoj zoni grada provodi i irski Dablin i time teži da postane jedan od gradova po mjeri pješaka Evrope do 2017. godina. Dablin za cilj ima da 1 od 5 ljudi koristi automobil u centralnom jezgru, da 55% koristi javni gradski prevoz, 15% vozi bicikle, a da je 10% pješaka. [8]

Madridski master plan bazira se na ozelenjavanju, biciklističkim i pješačkim zonama, zabrani automobila u gradskom jezgru. Promjena saobraćajnih prioriteta se ogleda u stavljanju pješaka na prvo mjesto i središte prioriteta, potom javnog gradskog prevoza, bicikla i na posljednjem mjestu automobila. [10]

U cilju redukcije zagađenja i stvaranja zone bez automobila Brisel ima za cilj pretvaranje glavne gradske saobraćajnice sa četiri trake u pješačku promenadu. [8]

Razvoj zona bez automobila i smanjenje automobila predstavlja budućnost svjetskih i evropskih održivih gradova. Od razvoja prvog automobila, krajem 19. vijeka, pa sve do danas automobili su dio čovjekove svakodnevnice i omogućavaju mu „brže“ obavljanje svakodnevnih potreba i aktivnosti. Na ulicama primjetan je sve veći broj automobila što je dovelo do stavljanja automobila ispred čovjeka i za posljedicu ima veće saobraćajne gužve posebno u centralnim gradskim zonama, nezgode, veću potrebu za parking prostorom, zagađenje životne sredine.

Oslo, Madrid, Pariz, Milano, Kopenhagen, Ljubljana i mnogi drugi svjetski i evropski gradovi prepoznali ovaj problem u svojim sredinama i kao jedan od mogućih načina djelovanja izabrali su uvođenje zona bez automobila u centralnim dijelovima grada i tako su dali prioritet pješaku i biciklisti nad automobilom i time smanjili negativan uticaj saobraćajnog sektora na životnu sredinu.

III. „OD LJUBLJANE DO BANJA LUKE“ – KOMPARATIVNA ANALIZA

U Urbanističkom planu grada Banja Luke iz 1975. godine jedan od opštih ciljeva zaštite i unapređenja čovjekove sredine se definiše kroz „planiranje, projektovanje i izgradnja grada treba da ostvari uspostavljanje kreativne harmonije prirodnih i stvorenih vrijednosti u svrhu oblikovanja sredine za čovjeka - formiranje gradskih volumena, perspektiva i ambijenata ispunjenih suncem, zelenilom, čistim vazduhom i vodom prijatnih za ugodan i zdrav boravak ljudi, ...“ . [11] Iz ranijih perioda razvoja grada Banja Luke osjeti se težnja da ona da se razvija i raste u skladu i harmoniji sa prirodom okruženje i da prati trendove na održivom putu razvoja gradskih sredina.

Grad Banja Luka je 2009. godine potpisao „Sporazum gradonačelnika“ i time se obavezao na redukciju CO₂ za 20% do 2020. godine. „Održivi energetske akcioni plan Grada Banja Luke“ predstavlja ključni dokument za održivi razvoj sredine u kome su date smjernice putem kojih će lokalna vlast postići smanjenje emisije gasova staklene bašte za 20% do 2020. godine.

Saobraćajni sektor grada Banja Luke ima veliki udio u ukupnoj emisiji CO₂ sa 10,3 %, od čega najveći udio prouzrokuju privatni automobili. [12]

Prema Akcionom planu energetske efikasnosti grada Banja Luke ukupna potrošnja energije u saobraćajnom sektoru iznosi 204 040,2 MWh/god, a emisija ugljen dioksida iznosi 54 476 t/god. [12]

„Održivi energetske akcioni plan Grada Banja Luke“ iz 2010. godine predviđa niz mjera za saobraćajni sektor kojima bi se redukovala emisija gasova staklene bašte i smanjio njihov negativan uticaj na životnu sredinu. Mjere za smanjenje emisije CO₂ klasifikovane su u dvije grupe:

- tehničke mjere koje se odnose na poboljšanje tehničkih karakteristika vozila i
- organizacione mjere koje se odnose na implemetaciju „čistih“ projekata u cilju zaštite životne sredine i one se odnose na:

upotrebu biodizela u javnom gradskom prevozu putnika;

poboljšanje biciklističkog saobraćaja - izgradnju i rekonstrukciju biciklističke infrastrukture i izgradnja parkinga za bicikle;

vanredna kontrola izduvnih gasova i tehničke ispravnosti vozila u cilju poboljšanja tehničke ispravnosti vozila javnog gradskog oeoza i drugih vozila;

formiranje Centra za automatsko upravljanje i praćenje saobraćaja koji će obezbijediti bolju regulaciju saobraćaja;

formiranje Centra za praćenje vozila javnog gradskog prevoza koji ima za cilj povećanje aktivnosti javnog gradskog prevoza grada Banja Luke i broja putnika javnog gradskog prevoza;

pokretanje kampanje „Eko inspekcija u eko vozilima“- predvodnička uloga gradskih vlasti u cilju razvijanja ekološke svijesti građana. [12]

„Izveštaj o realizaciji Održivog energetskog akcionog plana“ iz 2013. godine pokazao je da od ukupno 7 projekata iz saobraćajnog sektora realizovan je samo jedan, za po jedan projekat je u toku realizacija ili ima kontinuiranu realizaciju, za jedan nedostaju podaci i tri projekta nisu realizovana. [13]

TABELA 1: PRIKAZ REALIZACIJE „ODRŽIVOG AKCIONOG PLANA”

Sektor	Ukupan broj projekata	Realizovano	U toku/kontinuirana realizacija	Nedostupni podaci	Nije realizovano
Transport	7	1	1/1	1	3

TABELA 2: PRIKAZ REALIZACIJE PROJEKATA ZA SAOBRAĆAJNI (TRANSPORTNI) SEKTOR

Red. broj	Naziv projekta	Podsektor	Realizacija
1,	Eko inspekcija u eko vozilima gradska uprava	gradska uprava	nije realizovano
2,	Upotreba bio dizela u eko vozilima	javni prevoz	nedostaju podaci
3,	Formiranje Centra za praćenje vozila javnog gradskog prevoza	javni prevoz	nije realizovano
4,	Formiranje Centra za automatsko upravljanje i praćenje saobraćaja	privatni i komercijalni prevoz	nije realizovano
5,	Poboljšanje biciklističkog saobraćaja	privatni i komercijalni prevoz	realizacija u toku
6,	Promocija ekološki prihvatljivog saobraćaja	privatni i komercijalni prevoz	realizovano
7,	Vanredna kontrola izduvnih gasova i tehničke ispravnosti vozila	kontrola vozila	kontinuirana realizacija

Grad Ljubljana je kao i Banja Luka potpisnik „Sporazuma gradonačelnika“, čime se obavezala da će uticati na smanjenje emisije gasova staklene bašte i povećanje održivosti gradske sredine.

Grad Ljubljana prati, može se reći i postavlja trendove održivog razvoja gradskih sredina. Značajne transformacijske mjere u cilju podsticanja održivosti sredine, posebno one koje uticale na promjene saobraćajnih prioriteta, stavljanje pješaka i bicikla ispred automobila i popularizacija javnog gradskog prevoza doprinijeli su da Ljubljana bude proglašena za Evropsku zelenu prestonicu (European Green Capital) 2016. godine. [14]

Tranformacija mobilnosti i formiranje „zelene dnevne sobe u centru“ za grad Ljubljanu predstavljali su veliki izazov, a održive mjere koje vode ka ispunjavanju ovog izazova tiču se:

- promocija aktivnog života;
- promocija i jačanja svijesti o važnosti promjene saobraćajnih prioriteta održavanjem javnih tribina, okruglih stolova, uličnih akcija;
- formiranja zona bez automobila u centru grada;
- popularizacije biciklističkog saobraćaja i rekonstrukcija i poboljšanje biciklističke infrastrukture (redizajn raskrsnica po mjeri biciklista, pomjeranje zaustavne trake za bicikle u odnosu na automobile, uključivanje zelenog svjetla za bicikliste tri sekunde prije, izgradnja biciklističkih stajališta, i dr.);

- promjene saobraćajnih prioriteta u gradu, povećanje: upotrebe javnog gradskog prevoza za 50%, biciklističkog saobraćaja za 40% i pješaka za 20% i smanjenje automobila za 20% do 2020. godine;
- redizajn Slovenske ceste proširivanje pješačkih i saobraćajnih zona i modifikacija saobraćajnog režima glavne ulice, smanjenje automobila i popularizacija javnog gradskog prevoza čime se utiče na smanjenje gužvi i emisije gasova staklene bašte. [15,16,17].



Sl 1: prikaz redizajna Slovenske ceste u Ljubljani [16]

U periodu od 1994. do 2011. godine broj automobila u gradu Ljubljani je znatno porastao, čak za 25%, što je uticalo na povećanje zagađenosti i zagušenosti gradske sredine. Aktivnim provođenjem mjera za podsticanje održivosti sredine, vidljive su promjene saobraćajnih navika građana Ljubljane, u 2013. godini u poređenju sa 2011. godinom, koje se odnose na smanjenje upotrebe automobila u korist javnog gradskog prevoza, biciklističkog saobraćaja i pješaka.

Poređenjem grada Banja Luke i grada Ljubljane, sa aspekta transformacije saobraćajnog sektora, Banja Luka je uradila znatno manje. Prepoznavanjem Ljubljane kao primjera dobre prakse iz okruženja i ljubljanskih strateških mjera i njihova implemetacija, u skladu sa uslovima lokalne zajednice, može uticati da se Banja Luka pretvori u održivu i zdravu sredinu koja za cilj ima očuvanje budućnosti i lokalne i globalne zajednice.

IV. MOGUĆNOSTI BANJA LUKE

Prostornim planom grada Banja Luke dat je niz mjera koje će doprinijeti razvoju racionalnijeg i efikasnijeg saobraćajnog sektora i mobilnosti građana. Neke od ekonomsko - finasijskih mjera odnose se na :

- kompletiranje putne mreže;
- postizanje odgovarajućeg kvaliteta javnog gradskog prevoza, uvođenjem novih podsistema i poboljšanje svih parametara postojećih linija;
- infrastrukturno opremanje biciklističkih staza i pješačke zone;

dok se neke od organizacionih mjera ili instrumenata za razvoj saobraćajnog sektora ogledaju u :

- program povećanja saobraćajne efikasnosti grada

- izgradnja plana efikasnog i ekonomičkog javnog gradskog i prigradskog prevoza putnika.

U opštim koncepcijama organizacije, uređenja i korištenja prostora Prostornog plana grada Banja Luke predviđa se da: uže urbano jezgro treba tretirati kao atraktivan gradski prostor sa razvijenom mrežom gradskih površina i inkorporiranim prirodnim i kulturnim nasljeđem. Takođe, potrebno je raditi na ozelenjavanju i razvoju mreže gradskih parkova, formiranja prostornih aleja i bulevara sa drvodredima i šetnicama. [18]

Prepoznavanjem i provođenjem ovih smjernica doprinijelo bi se razvoju Banja Luke kao održivog evropskog grada i humane sredine koja živi zajedno sa svojim građanima i zadovoljava sve njihove potrebe.

Banja Luka ima potencijal da prati održivi put Ljubljane i aktivnijim provođenjem mjera može da postane jedna od narednih evropskih zelenih prestonica.

Aktivnim provođenjem mjera koje se odnose na: zaštitu i očuvanje postojećih zelenih površina, formiranja novih zelenih zona na zapuštenim i napuštenim mjestima, promjena saobraćajnih prioriteta građana - PJEŠAK I BICIKLO ispred AUTOMOBILA, popularizacija i modernizacija javnog gradskog, rekonstrukcija i izgradnja saobraćajne infrastrukture, formiranje zona automobila u užem centru grada, smanjenje potrošnje i gubitaka u sektoru zgradarstva, promjena svakodnevnih navika građana, podsticanje korištenja obnovljivih izvora energije, Banja Luka može uticati na redukciju potrošnje energije i emisije gasova staklene bašte, stvoriti održivu i prosperitetnu gradsku sredinu.

U proteklom periodu vidljivi su se pomaci u sa aspekta održivog razvoja saobraćajnog sektora grada Banja Luke: formirana je nultna zona parkiranja u kojoj je zadržavanje putničkih automobila ograničeno na dva sata, radi se na uvođenju sistema iznajmljivanja bicikala, čime bi se Banja Luka približila evropskim prestonicama koje su promovišu održivu mobilnosti, zdrav način života i zaštitu životne sredine. U ljetnim mjesecima vikendom glavna gradska ulica, Ulica kralja Petra I Karađorđevića (na potezu od hotela Palas do Narodnog pozorišta Republike Srpske) pretvarana je u šetaliste.



Sl 2: pomaci u grada Banja Luci sa aspekta saobraćajnih prioriteta, izvor: <https://www.facebook.com/gubanjaluca/>

Kreiranje zone bez automobila u užoj gradskoj zoni i promjena saobraćajnih prioriteta, afirmacija pješačkih i biciklističkih zona i javnog gradskog prevoza uticali bi na smanjenje gužvi u užoj gradskoj zoni, redukciju emisije gasova staklene bašte i formiranje atraktivnog otvorenog gradskog prostora pozitivno utiče na održivu budućnost grada. Kreiranje zone bez automobila u užoj gradskoj zoni i transformacija glavne ulice ozelenjenu promenadu imala bi, takođe, ticaj i na afirmaciju kulturno-istorijskog i turističkog identiteta grada Banja Luke. (slika 3)



Sl 3: „Banjalučka zelena promenada“

V. ZAKLJUČAK

Gradovi predstavljaju veliki udio u ukupnoj potrošnji proizvedene energije, emituju veliku količinu gasova staklene bašte i time ostavljaju dubok trag na životnu sredinu. Redukcija potrošnje energije, smanjenje emisije CO₂, planiranje i gradnja u skladu sa prirodom i okruženjem, podsticanje korištenja obnovljivih izvora energije vode ka stvaranju zdravih, sigurnih i humanih gradskih sredina.

Saobraćajni sektor ima značajan udio u ukupnoj potrošnji energije i emisiji gasova CO₂ ali nudi široku lepezu mjera kojima se može uticati na promjenu saobraćajnih prioriteta i navika, a sve u cilju stvaranja održivog i energetski efikasnog saobraćajnog sektora.

- Uvođenje zona bez automobila;
- promocija i popularizacija biciklističkog saobraćaja uz osavremenjavanje biciklističke infrastrukture;
- afirmacija i modernizacija javnog gradskog prevoza;
- upotreba električnih automobila i biodizela;
- edukovanje građanija o važnosti promjene saobraćajnih prioriteta.

Ovo su samo neke od niza mjera kojima gradska sredina može uticati na smanjenje zagušenosti gradske sredine automobilima, kao i na potrošnju energije i emisije gasova CO₂. Stvaranje održivog saobraćajnog sektora i redukcija izduvnih gasova unutar ovog sektora predstavljaju važan faktor ka razvoju održivih gradskih sredina.

Implementacija mjera u svrhu poboljšanja energetske efikasnosti sredine i smanjenja štetnog uticaja na životnu sredinu, sa aspekta saobraćaja, zahtijeva značajne investicije

(za povećanje biciklističkog saobraćaja u gradu neophodna je rekonstrukcija i izgradnja biciklističke infrastrukture), a pravac kojim će gradska sredina ići ka implementaciji održivih mjera zavisi od ekonomskih mogućnosti te sredine. Edukovanje građana o važnosti promjene saobraćajnih prioriteta u cilju očuvanja životne sredine i uticanje na promjenu njihovih svakodnevnih saobraćajnih navika možda je prvi korak u ovoj transformaciji.

LITERATURA

- [1] Nikezić Zoran, „Građena sredina i arhitektura“, Arhitektonski fakultet u Beogradu, Beograd, 2007.godina
- [2] *** <http://unhabitat.org/urban-themes/energy/>, preuzeto 30.01.2017. godine
- [3] Bokalders Varis, Block Maria „The Whole Building Handbook“ Earthscan publishes in association with the International Institute for Environment and Development 2010. godine
- [4] Pucar Mila, „Bioklimatska arhitektura – zastakljeni prostori i solarni sistemi“, Institut za arhitekturu i urbanizam Srbije, Beograd, 2006. godine
- [5] *** <http://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/winning-cities/>, preuzeto 30.01.2017. godine
- [6] *** <http://www.slocat.net/content/transport-and-climate-change>, preuzeto 30.01.2017. godine
- [7] Jadranka Jović, Đorić Vladimir, „ Izvod iz predavanja – Multimodalna mobilnost“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2016. godina
- [8] Jaffe Eric, „6 Big European Cities With Plans to Go Car-Free“, <http://www.citylab.com/cityfixer/2015/10/6-european-cities-with-plans-to-go-car-free/411439/>, preuzeto 16.12.2016. godine
- [9] O'Sullivan Feargus „Paris Really Is Going to Transform the Seine“ <http://www.citylab.com/cityfixer/2016/09/paris-seine-car-pedestrians-quay-ban/501788/>, preuzeto 30.01.2017. godine
- [10] O'Sullivan Feargus „Madrid's Big Plan to Swear Off Cars“, <http://www.citylab.com/commute/2013/12/madrids-big-plan-swear-cars/7744/> , preuzeto 30.01.2017. godine
- [11] Urbanistički zavod Banja Luka, „Banja Luka – Urbanistički plan“, Banja Luka, 1975. godina
- [12] UNDP BiH, Goran Vukmir, Raduška Cupać, Nikola Arežina „Održivi energetski akcioni plan Grada Banja Luke“, Grad Banjaluka, uz podršku Razvojnog programa Ujedinjenih nacija (UNDP) Bosna i Hercegovina, Banja Luka, novembar 2010. godina
- [13] „Izveštaj o realizaciji Održivog energetskog akcionog plana“, Banja Luka, novembar 2013. godine
- [14] *** <http://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/winning-cities/2016-ljubljana/> , preuzeto 31.01.2017. godine
- [15] *** http://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/wp-content/uploads/2014/07/Ljubljana_2016_Pres-2low.pdf , preuzeto 31.01.2017. godine
- [16] Koželj Janez, Lokar Blaž „The Gradual and Systematic approach in Ljubljana to make cycling part of city's DNA“ 2013. godina, http://velo-city2013.com/wp-content/uploads/20130613_JanezKozelj.pdf , preuzeto 24.01.2017. godine
- [17] Koželj Janez, „Systematic and gradual approach to make Ljubljana cycling friendly city“ 2013. godina, http://www.managenergy.net/lib/documents/1198/original_Ljubljana.compressed.pdf?1412326453 , preuzeto 24.01.2017. godine
- [18] Prostorni plan grada Banja Luke, Banja Luka, mart 2014. godine

Mogućnosti primjene aktivnih solarnih sistema u jednoporodičnom stanovanju

Analiza regiona

Malina Čvoro¹, Slađana Janković²

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko građevinsko geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko građevinsko geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
malina.cvoro@aggf.unibl.org, sladjana.jankovic@aggf.unibl.org

Sažetak— U radu su prikazane osnovne vrste i principi zagrijavanja objekata jednoporodičnog stanovanja pomoću sunčeve energije - aktivnim solarnim sistemima, kao i principi pomoću kojih ovi sistemi doprinose očuvanju potrošnje konvencionalnih oblika energije. Prikazani su načini funkcionisanja, vrste sistema, odabrani primjeri iz prakse kao i potencijal upotrebe ovih sistema u Bosni i Hercegovini, kako bi se ukazalo na mogućnosti njihovog korištenja u oblasti energetske i ekonomske efikasnosti u domenu graditeljstva. Rješenje za probleme nedovoljne zastupljenosti solarnih sistema vidjeli smo u zajedničkom radu različitog strukovnog kadra, na promociji sistema za primjenu obnovljivih izvora energije i predstavljanju njegove realne vrijednosti te široke mogućnosti upotrebe.

Ključne riječi— *Solarna energija, aktivni solarni sistemi, ušteda konvencionalne energije, primjeri prakse, region, budućnost*

I. UVOD

Usljed zabrinutosti za globalno zagrijavanje, klimatske promjene i konstantan rast cijena energenata, u poslednjih nekoliko godina pronalaze se novi načini i razvijaju nove tehnologije, kako bi se solarna energija iskoristila na što više načina. Graditeljstvo je djelatnost koja troši najveću količinu prirodnih resursa, zbog toga je jedan od glavnih ciljeva pronaći alternativna rješenja, koja koriste obnovljive energetske resurse. Obnovljivi izvori energije, kao što su: energija sunca, vjetra, vode, geotermalne mase i biomase koriste se da bi se smanjila potrošnja energetske resursa koji nisu obnovljivi i time povećala energetska efikasnost u graditeljstvu, smanjila emisija CO₂ i drugih štetnih gasova, zaštitila i očuvala životna sredina, itd.

Solarna energija predstavlja najrasprostranjeniji oblik obnovljivog energetske izvora i može da se koristi na više načina. Po načinu na koji se solarna energija sakuplja i distribuiše u domaćinstvima, pravi se glavna podjela na pasivnu i aktivnu primjenu solarne energije, ali i kombinacija ova dva sistema [1]. Pasivno solarno grijanje koristi se sistemima koji apsorbuju toplotnu energiju sunca, akumuliraju je, a zatim, kada temperatura opadne, ta energija se oslobađa iz akumulatora, zagrijavajući okolni prostor [1]. Nedostatak ovog sistema je taj što dolazi do toplotnih gubitaka kada su

vremenski uslovi loši, tj. kada imamo neočekivano niske temperature i veći broj oblačnih dana u kontinuitetu, kada dolazi do nemogućnosti zagrijavanja prostorija. S toga je potrebno imati rezervne, dopunske sisteme grijanja. Za prijem, akumulaciju i distribuciju toplotne energije često se koriste sami prozori, krovovi, zidovi ili podovi zgrade, tako da ugradnja ovakvih sistema praktično ne predstavlja velike dodatne troškove, ako se ugrađuje u nove objekte. Kod objekata kojima se naknadno ugrađuju ovi sistemi, troškovi mogu biti veći, ali uglavnom je period povratka tih investicija relativno kratak. Aktivni solarni sistemi koriste se za zagrijavanje prostorija, ali i za proizvodnju tople vode i električne energije koja služi za osvjetljenje prostorija i napajanje elektro-tehničkih elemenata u objektu sa strujom. Manji solarni sistemi mogu snabdijevati domaćinstvo strujom i toplotom, dok se veći solarni sistemi mogu koristiti za snabdijevanje toplotom čitavih naselja i el.energijom čitavih gradova. Aktivni sistemi su dosta kompleksniji od pasivnih kada je način funkcionisanja u pitanju, ali njihova instalacija i primjena je jednostavna i visoko pouzdana. Kombinovani sistemi koriste dizajn pasivnih sistema, sa nekom od vrsta pasivne solarne fasade i postavljanjem solarnih kolektora i panela u sklopu objekta, kako bi se solarna energija maksimalno iskoristila. Oni takođe predstavljaju i kombinaciju aktivnih solarnih sistema za grijanje sa drugim konvencionalnim načinima grijanja, da bi se upotpunila kompletna potreba jednog domaćinstva za grijanjem.

U radu su detaljno analizirani aktivni solarni sistemi: podjela sistema, način funkcionisanja, potencijal upotrebe u Bosni i Hercegovini i poređenje sa svjetskom praksom.

II. AKTIVNI SOLARNI SISTEMI

Aktivni sistemi koji koriste solarne energije moraju imati dodatne uređaje i izvore energije za pokretanje ventilatora, pumpi i ostale opreme neophodne da bi se solarna energija sakupila, sačuvala i konvertovala u toplotnu ili električnu energiju, za razliku od pasivnih sistema [2]. Aktivni solarni sistemi se dijele prema osnovnoj funkciji, a to su: solarni sistemi za provođenje toplote (zagrijavanje vode i prostorija) i solarni sistemi za proizvodnju električne energije koja se

primjenjuje u objektima različitih funkcija [3]. Solarni sistemi za električno napajanje takođe mogu služiti za zagrijavanje prostorija, zahvaljujući dodatnim instalacijama, pomoću kojih se el. energija transformiše u toplotnu. Sistemi koji se koriste za proizvodnju električne energije funkcionišu zahvaljujući fotonaponskim ćelijama od kojih su izgrađeni solarni paneli, dok se za direktnu akumulaciju toplote koriste solarni kolektori [3]. Dalje u radu predstavljene su razlike solarnih kolektora i panela u funkciji provođenja toplotne energije kroz objekat, tj. u funkciji za zagrijavanje prostiranja i vode u jednoporodičnom stanovanju.

III. PRIMJENA U JEDNORODIČNOM STANOVANJU

U arhitekturi stanovanja, kućama jednoporodičnog tipa, za grijanje prostorija koriste se sistemi sa solarnim kolektorima, sistemi sa solarnim panelima, ali najčešće kombinacija ova dva sistema [2]. Takođe se kombinuju aktivni solarni sistemi za grijanje sa pasivnim principima i sistemima gradnje. Za efikasnost solarnih kolektora i panela bitna je orijentacija i postavljanje prema najvećoj insolaciji. Najveća efikasnost aktivnih solarnih sistema postiže se ako je usmjeren prema jugu [5]. Ukoliko je odstupanje prema jugu veće, dodatna efikasnost sistema postiže se povećanjem panelskog polja. Prihvatljivo odstupanje od orijentacije mjesta za postavljanje prema jugu iznosi +/- 30° [5]. Isto tako optimalan nagib krovne površne odnosno panelskog polja zavisi od namjene solarnog toplotnog sistema i razdoblja kada se najviše koristi. Ljeti je najbolji ugao od 20°, zimi 55°, a optimalni godišnji prosjek je 37° [7]. Zavisno od težnje i zahtjeva investitora solarni kolektori i paneli mogu da se integrišu u oblik (dizajn) kuće, tako da budu u sklopu krova ili fasade, kao sastavni dijelovi njenog omotača i tada djeluju suptilno i ne dominantno.

A. Primjena solarnih kolektora

Postoje 3 različita tipa i tehnologije proizvodnje solarnih kolektora [3]:

- Kolektori sa rezervoarom - prvi oblici prijemnika solarne energije, koji su nastali još 1767. god. Vezani su za istorijski razvoj i danas se gotovo ne upotrebljavaju.
- Ravni (pljosnati) solarni kolektori - njima se mogu dobiti temperature fluida do 100 °C, jednostavne su konstrukcije, jeftiniji i veoma su često u upotrebi.
- Solarni kolektori sa vakumiranim cijevima - sastavljeni su od niza staklenih cijevi iz kojih je izvučen vazduh i čijom osom prolazi taman metalni prijemnik kroz koga protiče radni fluid.

Primjenom aktivnih solarnih sistema za grijanje prostorija, troškovi za toplotnom energijom se smanjuju i do 80%.

Četveročlanom domaćinstvu je, za dobijanje tople sanitarne vode, potrebno 2 solarna kolektora i bojler od 200 litara vode [6]. Ukoliko se kolektori koriste za ispomoc

grijanju, sistem je potrebno dimenzionisati tako da površina kolektora bude oko 20% od ukupne površine koja se grije. Tako npr. za površinu od 100 m² potrebno je 8-10 solarnih kolektora [7]. Površina jednog solarnog kolektora je oko 2m². Približne vrijednosti postavljanja solarnih panela su predstavljene tabelom „TABELA I. ODNOS VELIČINE KUĆE, KOLEKTORA, ZAPREMINE BOJLERA I CIJENE OPREME”.

TABELA I. ODNOS VELIČINE KUĆE, KOLEKTORA, ZAPREMINE BOJLERA I CIJENE OPREME, [7]

Veličina kuće (m ²)	Veličina kuće		
	Površina kolektora (m ²)	Zapremina bojlera (l)	Cijena opreme (euro)
100	16	300	3.720
150	20	500	5.292
200	24	500	5.892
300	32	1.000	8.280

Ono što je važno za primjenu solarnih kolektora, jeste da njihova funkcija ne zavisi od vanjske temperature, nego od stepena insolacije, tako da sistemi mogu biti efikasni i tokom zime. Na sunčanom ljetnom danu, tečnost koja se zagrijala u cijevima obično doseže temperature u iznosu od oko 60-80 °C ili više, dok jedan takav dan zimi dozvoljava temperaturne vrijednosti od oko 50-65 °C [6].

Ovi statistički podaci ukazuju na to da, za razliku od mišljenja mnogih, solarni kolektori rade jednako dobro i tokom zime. Zapravo, kada su vanjske temperature previsoke, to može blago da umanjuje efikasnost solarnih kolektora, jer dolazi do veće refleksije sunčeve insolacije, a što je činjenica koja je veoma važna na polju i solarnih i fotonaponskih panela. Solarni kolektori za proizvodnju toplotne energije u domaćinstvu se mogu koristiti na više načina. Neki investitori upotrebljavaju ih samo za primjenu tople sanitarne vode, dok neki koriste konvencionalne načine grijanja i samo nekoliko solarnih kolektora, kao potporu, da bi uštedjeli 10-20% ukupne potrebne energije za grijanje [8]. Solarnim kolektorima se ne uspije 100% pokriti cjelogodišnja prosječna potreba za toplotnom energijom, s toga se je potrebno rješenje korištenja kompletnog sistema. Kombinacija s plinskom kondenzacijskom tehnologijom dobro je i relativno povoljno rješenje, a kombinacija solarnog grijanja s geotermalnom dizalicom topline još je bolje rješenje, ali i skuplje [9]. Rad više sistema za grijanje treba da bude kompaktilan. Ako ima dovoljno sunčevog zračenja, fluid u solarnom sistemu grijanja zagrijava vodu u jednom od spremnika putem donjeg izmjenjivača toplote. U slučaju pada temperature, uključuje se po potrebi konvencionalni grijač preko drugog kruga koji podržava dodatno zagrijavanje [9].

B. Primjena fotonaponskih panela

Fotonaponski paneli za proizvodnju električne i toplotne energije mogu da funkcionišu kao samostalni fotonaponski paneli i mrežno povezani fotonaponski paneli [1]. Ukoliko su mrežno povezani, to znači da ne moraju biti nezavisni

samostalni objekti, već da nedostatke energije (ukoliko ih ima), mogu nadoknaditi iz mrežnog sistema ili da vrate energiju u sistem ukoliko proizvedu više nego što je potrebno [4]. Sve opcije su moguće i dozvoljene, ali zavise od potreba investitora i njegovih mogućnosti za instaliranje ovakvih sistema. Za zagrijavanje prostorija preko solarnog fotonaponskog panela koristi se sistem sa razvodnim ormarom, izmjenjivačem toplote i grijačem vode koji zagrijava vodu uz pomoć el. energije. Sistem funkcioniše bez gubitaka, jer sva energija koju proizvede fotonaponski panel završi u spoju grijajuće spirale, koja se nalazi u akumulatoru (spremniku) vode.

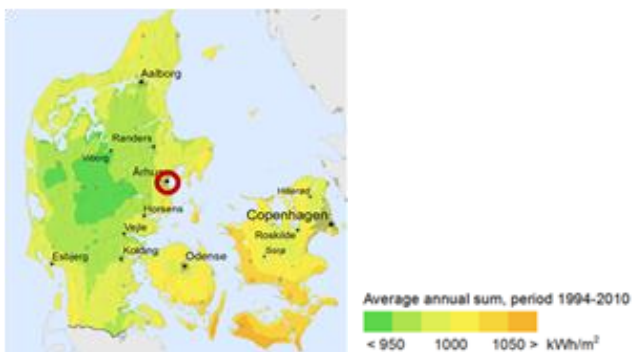
Proračun za broj fotonaponskih panela koji bi služili za zagrijavanje vode i prostorija, prikazan je tabelom „TABELA II. ODNOS KAPACITETA SPREMNIKA, BROJA ČLANOVA DOMAĆINSTVA I BROJA POTREBNIH PANELA”. Za zagrijavanje vode u bojleru od 200 l je potrebno 8 fotonaponskih panela ili 2 kW energije [11]. Isti broj kolektora je potreban za zagrijavanje vode u bojleru (spremniku) od 300 l za kuću od 100 m².

TABELA II. ODNOS KAPACITETA SPREMNIKA, BROJA ČLANOVA DOMAĆINSTVA I BROJA POTREBNIH PANELA, [11]

Kapacitet spremnika tople vode (l)		
	Broj osoba domaćinstva	Snaga i broj panela
100	3	1 kW, 4 kom
125	4	1.5 kW, 6 kom
160	5 до 6	2 kW, 8 kom
200	6 и више	2 kW, 8 kom

IV. PRIMJERI I ISKUSTVA

Najčešći primjeri koji se primjenjuju u praksi su oni sa kombinacijom i panela i kolektora, čime se postižu znatne uštede energije. Kuća Home for Life se nalazi u drugom po veličini gradu Danske, Arhus-u, gdje je insolacija u intervalu od 1 000 – 1 050 kWh/m² godišnje „Sl.1“ [12].



Sl. 1. Intenzitet osunčanosti u Danskoj, [12]

Ekološke karakteristike čine „Home for Life“ kuću prepoznatljivim održivim projektom „Sl.2“, jer kuća je dizajnirana da proizvede više energije nego što troši. Procjenjuje se proizvodnja energije od 9 kWh/ m², i da je potrebno oko 30 godina za kuću da generiše istu količinu energije koja je korišćena za proizvodnju svojih građevinskog materijala i u tom trenutku kuća će se vratiti više prirodi nego što troši [13].

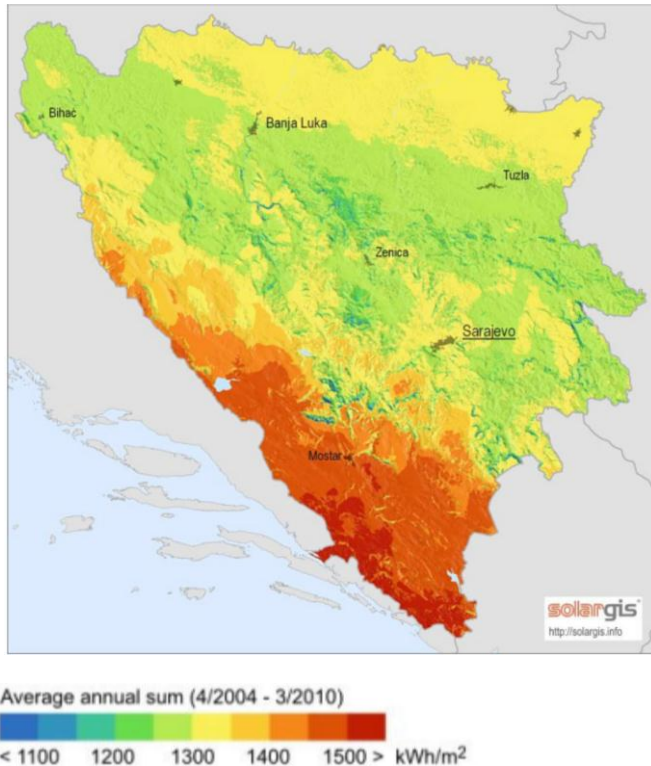
Prikazana energetski efikasna kuća predstavlja nov način gradnje klimatski-neutralne kuće. Ona je zamišljena kao aktivna-pametna kuće i predstavlja rezultat istraživanja i dizajna u razvoju i cilju proizvodnje niskog stepena ugljen-dioksida i primjene solarne energije. Strateško postavljanje solarnih ćelija, solarnih kolektora, fasadnih i krovnih prozora nudi uravnoteženu količinu protoka energije kroz objekat.



Sl. 2. Home for Life, 2009, [13]

V. POTENCIJAL REGIONA

Kako bi smo imali predstavu o tome koliko tačno potencijala imamo, saznajemo koliko je približno solarno zračenje u našoj okolini. Na primjer, južni dijelovi Bosne i Hercegovine imaju klimu sličnu mediteranskoj, dok na sjeveru preovladava kontinentalna klima. Ovo, očigledno, ima veze i sa solarnim zračenjem, jer je na južnim dijelovima ono oko 1600 kWh/m² godišnje, a na sjeveru 1240 kWh/m² [3], što je otprilike prosjek za ovaj region 1300 kWh/m² u godini „Sl.3“. Sledeći važan statistički podatak je broj sunčanih dana u godini, u slučaju Bosne i Hercegovine je to oko 270 dana godišnje [4]. Mada bazirani na prosječnim vrijednostima, ovi podaci mogu biti jako korisni za naša istraživanja. Možemo vršiti procjene o tome koliko je solarna energija primjenljiva u određenim okolnostima. Dok činjenica stoji da svako može iskoristiti potencijal solarne energije, geografske odlike okoline i meteorološke šeme našeg regiona mogu imati uticaja na cjelokupnu djelotvornost s obzirom na cijene. Sunčeva svjetlost se probija u bilo kakvim vremenskim uslovima, ali njena snaga slabi prolaskom kroz oblake, tzv. difuzna svjetlost ili indirektno zračenje.



Sl. 3. Intenzitet osunčanosti u Bosni i Hercegovini, [14]

Mnogo snažnije je direktno zračenje sunčeve svjetlosti koje dopire do zemljine površine bez opstrukcija u vidu oblaka. Ali, čak i na maglom obavijenom mjestu poput Londona, dovoljne količine svjetlosti još uvijek dopiru do površine i mogu se koristiti kao izvor solarne energije. Na osnovu analiziranih podataka insolacije u Danskoj „Sl.1“ i primjera kuće iz Danske „Sl.2“, te broja osunčanih dana, možemo primjetiti da region ima znatno veću insolaciju „Sl.3“ i uslove za primjenu aktivnih solarnih sistema, nego zemlje gdje se oni grade i upotrebljavaju u većem broju. U regionu (Bosna i Hercegovina, Hrvatska i Srbija) su rijetki primjeri izgradnje ovakvih kuća „Sl.4“ i sasvim nedovoljni da bi se moglo reći da smo u razvoju.



Sl. 4. Kuća sa solarnim panelima u Hrvatskoj, Krk, 2013 god. [15]

U ovim zemljama se još uvijek ne primjenjuju dovoljno obnovljivi izvori energije u graditeljstvu, ali se sve više na tome radi. Razlike su velike kada se upoređi odnos iz 2014. i 2016. godine. U 2014. godini na tržištu su preovladavali kineski proizvođači, sa cijenama elemenata većim nego na

svjetskom tržištu. U Bosni i Hercegovini cijena kineskih solarnih panela u 2014. je bila od 0.90 €/W - 1.10 €/W i u Srbiji od 0.80 €/W - 1.00 €/W [16]. Pravi trošak panela, u odnosu na sve poreze, marže i troškove transporta treba da bude u rasponu od € 0.70 €/W ili 20% manje nego što jesu. U 2016. tehnologije za proizvodnju toplotne energije pomoću sunca u domaćinstvima postaju sve lakše dostupne, jer je sve veći broj podsticaja od strane međunarodne zajednice, a i u poslednjih nekoliko godina razvile su se industrije za proizvodnju solarnih kolektora i panela u regionu [16]. U Bosni i Hercegovini je razvijen projekat " Solarne energija kao budućnosti održivog razvoja " koji je podržan od američke agencije za međunarodni razvoj (USAIDA-a), a implementira ga partner u projektu - Mikrokreditna fondacija [15]. Projekat za cilj ima povećanje korišćenja solarnih kolektora kao i drugih alternativnih izvora energije u BiH. Ukupna vrijednost projekta je oko 1.250.000 dolara i finansira se od strane USAIDA- a, pri čemu je učešće partnera, oko 220.000 dolara [15]. Pločaste kolektore proizvodi firma iz BiH, a prema njihovom projektu sistem koji koristi solarne kolektore se otplati za 3-5 godina. Cijena nabavke ovog sistema je oko 4.500 BAM, bez PDV- a i troškova instalacije, i maksimalan produkt je oko 4,5 kW energije [15].

VI. ZAKLJUČAK

Solarne energije predstavlja najveći obnovljivi izvor energije i budućnost za proizvodnju toplotne i električne energije u oblasti graditeljstva. U međunarodnoj praksi se već uveliko upotrebljavaju sistemi koji omogućavaju transformaciju sunčeve energije, kako u objektima jednoporođičnog stanovanja, tako i u objektima drugih namjena. Kroz analizu teme možemo zaključiti da se u međunarodnoj praksi najviše primjenjuju kombinovani aktivni i pasivni sistemi. Pasivni sistemi su obično jeftiniji i jednostavniji, ali su aktivni produktivniji i sigurniji za proizvodnju energije. Skuplja je investicija, ali obzirom da se potrošnja vještačke energije može u potpunosti smanjiti od 20-100% u zavisnosti od sistema - isplativa je. Raznovrsna i veoma obimna ponuda tehnologija i koncepata za primjenu solarne energije u domaćinstvima zasnovana na dokazanim naučnim i praktičnim temeljima, zaslužuje da se u što većem broju počne primjenivati u regionu, koji je trenutno nerazvijen. U skladu sa određenim ciljevima i mogućnostima investitora možemo izgraditi niskoenergetsku kuću, pasivnu kuću, autonomnu kuću, kuću nulte energije, kuću sa energetskim plusom i tako napraviti uštede energije od 10%-100%, ali i njene dobiti. Na osnovu analiza zaključujemo da region posjeduje prirodni klimatski potencijal za primjenu solarne energije, a da principi izgradnje odgovaraju postojećim kulturološkim i tipološkim karakteristikama kuća jednoporođičnog stanovanja. To znači da se sistemi prilagođavaju obliku i tipologiji kuće, a ne obrnuto. Od zastupljenih primjera najviše su zastupljeni objekti jednoporođičnog stanovanja sa solarnim kolektorima za zagrijavanje tople vode. Ovakav sistem košta oko 4.500 BAM, bez PDV- a i troškova instalacije i može se odplatiti za 3-5

godina, po čemu se može zaključiti da je investicija veoma isplativa - maksimalan produkt energije je oko 4,5 kW. Ovakvi sistemi još uvijek nisu našli veću primjenu u našoj praksi radi:

- ekonomske i privredne nerazvijenosti,
- nedostatka investicija,
- velikih ulaganja u ovakve sisteme bez dovoljno subvencija,
- nezastupljenosti podsticaja,
- nedovoljne međunarodne podrške, nedovoljne promocije i menadžmenta za primjenu aktivnih solarnih sistema na državnom nivou,
- skeptičnosti potencijalnih investitora u dokazanost povratka investicije,
- kulturni identitet sredine.

Da bi se pratio trend korišćenja sunčeve energije u razvijenim zemljama za kojima dosta zaostajemo, države regiona, a najviše BiH, moraju donijeti odgovarajuće zakone i subvencijama podsticati ugradnju solarnih kolektora i panela, kao što je praksa u EU. Primjeri i iskustva u BiH koji bi privukli pažnju i drugih investitora, većeg broja korisnika, gotovo i da nisu zastupljeni. Takođe, podataka o načinima primjene aktivnih solarnih sistema, broju objekata, statističkim podacima proizvodnje i potrošnje solarne energije nema. Analizom regiona primjećujemo i da se progres nazire, jer javljaju se pojedinačni proizvođači, projekti sa međunarodnim agencijama, pojedini investitori zainteresovani za primjenu solarne energije, ali sve je to u nedovoljnoj mjeri. Rješenja za ovaj problem ne nalaze se samo u podsticajima od strane vlasti, nego i na zajedničkom radu različitog strukovnog kadra na promociji sistema za primjenu obnovljivih izvora energije i predstavljanju njegove realne vrijednosti i široke mogućnosti upotrebe.

LITERATURA

- [1] Centar za ekologiju i energiju Tuzla, "Uradi sam solarni kolektor", Tuzla 2006, str. 14-33.
- [2] P. Gevorkian, "Alternativ Energy Systems in Building Design", 2008., pp. 27-31.
- [3] Golob R., Gubina A., Podesser E., and Halilčević S., "Balkan Power Center Report: Guidelines for Renewable Energy Sources Technologies", March 10- 11, 2005.
- [4] Пупчевић, М., Петровић, П., Гверо, П., Којић Д, "Обезбјеђење енергетских потреба породичних кућа у руралној средини соларном

енергијом" Зборник радова: Савремена теорија и пракса у градитељству, Бања Лука 2014.

- [5] Dürschner C., "Das Missverständnis von den Mindererträgen von PV-Anlagen im Sommer", solid gGmbH, <http://www.solid.de/>, August 2, 2006.
- [6] C. Maurer, C.h Cappel, E. Tilmann Kuhn, "Progress in building-integrated solar thermal systems", Solar Energy, Volume 154, 15 September 2017, pp. 158-186.
- [7] Y.Tian, Z.Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications", Applied Energy, Volume 104, April 2013, pp. 538-553.
- [8] <http://www.zelenaenergija.org/clanak/orijentacija-i-nagib-solarnih-kolektora/298>, preuzeto 11.09.2017.
- [9] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects", Solar Energy, Volume 85, Issue 8, August 2011, pp. 1580-1608.
- [10] <http://energyinformative.org/solar-panels-cost/>, preuzeto 11.09.2017.
- [11] <https://www.solarpowerauthority.com/how-much-does-it-cost-to-install-solar-on-an-average-us-house/>, preuzeto 11.09.2017.
- [12] <http://www.mappery.com/Solar-Radiation-Map-of-Denmark>, preuzeto 11.09.2017.
- [13] S. Upson, "Denmark's Sentient Solar House", IEEE Spectrum, Aug 2010
- [14] N. Jovančić, Pretvaranje energije sunčevog zračenja u električnu – fotonaponski paneli, Istočno Sarajevo, 2009, str.6.
- [15] <http://www.solarnikolektori.ba/news.aspx?nID=19043>, preuzeto 05.09.2017.
- [16] Enova, Studija izvodljivosti o mogućnostima primjene solarne energije za potrebe dobijanja toplotne i električne energije na području grada Bijeljina, Sarajevo, 2014, str. 98-267.

ABSTRACT

The paper presents the basic types and principles of heating single - dwelling buildings using solar energy - active solar systems, as well as the principles by which these systems contribute to the conservation of conventional energy consumption. The ways of functioning, type of system, selected examples from practice and the potential of using these systems in Bosnia and Herzegovina are presented in order to point out the possibilities of their use in the field of energy and economic efficiency in the domain of construction. The solution for the problems of insufficient representation of solar systems was seen, among other things, in the joint work of various professional staff on the promotion of the system for the application of renewable energy sources and the presentation of its real value and wide possibilities of use.

APPLICATION OF ACTIVE SOLAR SYSTEMS ANALYSIS OF THE REGION

Malina Čvoro¹, Slađana Janković²

Termalni komfor na gradskom trgu građenom u drugoj polovini 20. veka: na primeru Niša i Leskovca

Aleksandra Đukić¹, Jelena Đekić^{2*}, Petar Mitković²

¹Univerzitet u Beogradu, Arhitektonski fakultet, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš, Srbija
adjukic@rcub.bg.ac.rs, *jelena_djuric@gmail.com, petar.mitkovic@gaf.ni.ac.rs

Sažetak—Otvoreni javni gradski prostori su veoma značajani jer se na njima odvijaju svakodnevne aktivnosti i ostvaruju socijalni kontakti stanovnika. Intenzitet korišćenja javnih prostora zavisi od kvaliteta, prvenstveno od komfora. Klimatski uslovi i inkluzivni urbani dizajn utiču na mikroklimatske uslove otvorenih prostora-termalni komfor, a samim tim i na intenzitet korišćenja prostora. U radu se vrši analiza uticaja fizičkih osobina trga na termalni komfor i korišćenje prostora. Za potrebe rada analizirana su dva trga, jedan u Nišu i jedan u Leskovcu, izgrađena u drugoj polovini 20. veka. Metode korišćene u radu uključuju: analizu fizičkih karakteristika prostora, opservaciju i anketiranje korisnika prostora i simulaciju termalnog komfora korišćenjem softvera RayMan. Posmatranje aktivnosti u prostoru i anketiranje korisnika prostora vršeno je u toku letnjih meseci 2016. godine. Rezultati istraživanja pokazuju da termalni komfor otvorenih prostora u velikoj meri zavisi od fizičkih karakteristika prostora kao što su: oblik, dimenzije, materijalizacija, prisustvo zelenila, vrste zelenila, visina objekata po obodu i dr.

Ključne riječi— termalni komfor; gradski trg; urbani dizajn; Niš, Leskovac, Srbija.

I. UVOD

Otvoreni prostori imaju veoma značajnu ulogu u održivosti gradova jer oni prihvataju pešački saobraćaj i različite vrste aktivnosti na otvorenom i doprinose životnosti i vitalnosti gradova. Termalni komfor ili udobnost otvorenih prostora podrazumeva „pozitivne emocionalne reakcije na spoljašnje okruženje (šetalište) u različitim situacijama, uključujući fizičke, socijalne i psihološke reakcije“, dok „osećaj i stepen komfora zavise od okruženja, situacije i pojedinca“ [1]. Klima je najuticajniji faktor koji određuje nivo udobnosti ili komfora otvorenih javnih prostora. Odnos između urbanističkih parametara i termičkog komfora pešaka bio je predmet mnogih studija [2]-[4], kao i uticaj strategija urbanog dizajna na količinu primljenog solarnog zračenja i njegov uticaj na toplotni komfor pešaka [5]. Prethodna istraživanja su pokazala da temperatura vazduha ima najveći uticaj na ukupni termalni komfor pešaka [6]. Međutim često se dešava da se u dizajnu novih i renoviranju postojećih javnih površina ne uzimaju u obzir klimatski faktori. Ovakav pristup za rezultat ima stvaranje prostora koji nisu prijatni za boravak i aktivnosti, već se koriste samo kao tranzitne zone.

Gradski trgovi su otvoreni javni prostori okruženi zgradama i drugim objektima. Njihova funkcija je od davnina okupljanje ljudi i „gradski život“ i shodno tome odražavaju

identitet i kulturnu pozadinu gradova. Levi navodi da je glavna razlika između parka i trga to što „na trgu građani nisu povezani sa manifestacijama prirode, već sa srcem urbane kulture, istorije i sećanja“ [7]. Kako se gradovi u fizičkom smislu sastoje od masa i praznina, trgovi imaju značajnu ulogu u kontekstu odnosa izgrađenog i neizgrađenog prostora.

Fizičke karakteristike trga izgrađenog u drugoj polovini 20. veka su: znatno veća površina trga u odnosu na trgove iz prethodnih perioda (i do pet puta veće površine), heterogenost objekata po obodu trga (u smislu vertikalne i horizontalne regulacije, kao i zbijenosti), materijalizacija je često promenjena zbog promene funkcije (pešački trgovi su transformisani ili planirani kao parking prostori, što je rezultovalo upotrebu asfalta kao podloge) i minimalan procenat zelenila (osim u slučaju kada je trg deo parka) (Sl.1).



Sl. 1. Izgled Trga oslobođenja (danas Trg kralja Milana) u Nišu 1980-ih godina

Da bi trgovi ostvarili svoju funkciju - mesto okupljanja i zadržavanja, mikroklimatski uslovi na trgovima moraju biti prihvatljivi za korisnike.

Srbija pripada podregiji jugoistočne Evrope gde se predviđa veće povećanje temperature u poređenju sa globalnim nivoom. Istraživanja su pokazala da je u prošlom veku i u Srbiji došlo do povećanja temperature i da je u poslednje dve decenije bilo 14 godina sa temperaturama iznad normalnih zabeleženih u periodu od 1960. do 1985. godine. Tri godine su označene kao izrazito toplije, dok je godina 2000. bila je najtoplija u prethodnom veku. Do kraja 21. veka taj porast će biti od 2,2 do 5,1 °C, posebno tokom letnjih

meseci [8], [9]. Prema projekcijama Climate Central-a gradovi sa najvišim predviđenim povećanjem temperature do 2100. su Beograd, Sofija i Skoplje [10]. Stoga je neophodno analizirati postojeće stanje i mogućnosti unapređenja javnih otvorenih prostora, kako bi se oni učinili prijatnijim za boravak u uslovima sve izraženijih klimatskih promena.

Rad se bavi analizom termalnog komfora dva trga izgrađena u drugoj polovini 20. veka, od kojih se jedan nalazi u Nišu, a drugi u Leskovcu. Rad se sastoji od tri dela: analiza fizičkih karakteristika trgova, posmatranje aktivnosti i anketiranje korisnika prostora i simulacija toplotnog komfora.

II. METODOLOGIJA

Ranija istraživanja su pokazala da je temperatura vazduha najuticajniji faktor kada se radi o termalnom komforu otvorenih prostora [11], [12]. Takođe je utvrđeno da je temperatura vazduha iznad travnatih površina niža od temperature iznad popločanih površina, kao i da postoji primetna razlika u temperaturi iznad različitih popločanja. Pored toga, zasenčenje od okolnih objekata i drveća igra značajnu ulogu u poboljšanju mikroklimatskih uslova otvorenih prostora [11], [13]. U letnjim mesecima kada su temperature vazduha više i osunčanost veća, ljudi radije borave u hladu nego na suncu [14], [15]. Odnos dimenzija trga i okolnih objekata, kao i prisustvo visokog zelenila, određuju zasenčenost trga, što je naročito bitno u letnjem periodu kada se otvoreni prostori intenzivno koriste, a vrednosti temperature vazduha i osunčanosti su najviše.

Prvi deo istraživanja obuhvata analizu fizičkih karakteristika dva izabrana trga kao što su: oblik i dimenzije trga, položaj i visina okolnih objekata, prisustvo visokog zelenila i prisustvo travnatih i vodenih površina na trgu.

Parametri koji utiču na termalni komfor mogu se podeliti na objektivna i subjektivna [16]. Klimatski, psihološki (termoregulacija) i lični parametri su objektivni, dok druga grupa psiholoških parametara (preferencija, tolerancija, prihvatljivost, motivacija i adaptacija) spada u subjektivne parametre. Korisnici prostora biraju prostore koji su udobniji za boravak, ali se i prilagođavaju toplotnim uslovima izborom aktivnosti, odeće i sl.

U drugom delu istraživanja fokus je na ličnim parametrima (starost, pol, nivo odeće, aktivnosti korisnika i pozicija na trgu, konzumiranje pića i izlaganje suncu) i subjektivnom doživljaju termalnog komfora. Posmatranje i ispitivanje korisnika vršeno je u julu 2016. godine na izabranim trgovima u Nišu i Leskovcu. Korisnici su ispitivani na odabranim tačkama sa različitim materijalizacijom i različitim stepenom izloženosti suncu i hladu i vegetaciji. Uputnik je obuhvatao šest pitanja vezanih za: starost, pol, toplotni komfor u senci i na suncu, toplotni komfor u različitim tačkama trga. Ispitanicima su ponuđena tri moguća odgovora na skali toplotne senzacije: topli i neprijatni, topli i blago neprijatni i udobni. Istraživanje je takođe obuhvatilo i posmatranje korisnika u pogledu: nivoa odeće, analize potrošnje pića i nivoa aktivnosti korisnika (stajanje, lagano hodanje, umereno hodanje i brzo hodanje).

Pešački toplotni komfor se može razumeti i izračunavanjem fiziološki ekvivalentne temperature (PET) pomoću modela RaiMan [17], [18]. Ovaj model izračunava PET na osnovu šest parametara datih za određeno vreme i lokaciju. Parametri uključuju četiri meteorološka i dva termofiziološka parametra: temperatura vazduha (°C), srednja temperatura vazduha (°C), brzina vetra (ms⁻¹), relativna vlažnost vazduha (%), toplotna otpornost odeće (Clo) i nivo aktivnosti ljudi (V) [18]. Vrednosti prikazane u Tabeli I predstavljaju normalnu osobu koja hoda u letnjoj odeći u simuliranom javnom prostoru. Na osnovu unetih podataka program izračunava parametre prostora koji uključuju: stvarno globalno zračenje, stvarno direktno zračenje, stvarno difuzno zračenje, temperaturu površine, temperaturu vazduha, srednju izračenu temperaturu površine; i parametre koji se odnose na termalni komfor korisnika kao što su: fiziološki ekvivalentna temperatura (PET), standardna efektivna temperatura (SET) i predviđena srednja vrednost (PMV indeks). Vrednosti za PET se kreću od <4°C - veoma hladno, do >40°C - veoma vruće. Neutralnim, toplotno udobnim se smatraju vrednosti od 18-23°C. Simulacija toplotnog komfora i procena varijantnih rešenja već se primenjuje u novim projektima dizajna otvorenih javnih prostora u zemljama sa mediteranskom klimom (Grčka) i korisnici prostora uočavaju efekte ovakvog dizajna [19].

Simulacija termalnog komfora vršena je za dve tačke na Trgu kralja Milana i dve tačke na trgu u Leskovcu. Na Trgu kralja Milana, simulacija je izvršena za tačku koja se nalazi u središtu gradskog trga i izložena je sunčevom zračenju skoro tokom čitavog dana, dok je druga tačka smeštena ispod krošnje drveta i zasenčena od 08:00 do 16:00. Na trgu u Leskovcu tačke su izabrane tako da se jedna nalazi na glavnoj pešačkoj komunikaciji kroz parkovski deo (zelenu površinu u levom delu trga) dok se druga tačka nalazi na popločanoj površini, na parking u ispred nekadašnje robne kuće „Beograd“.

TABELA I. VREDNOSTI KORIŠĆENE ZA SIMULACIJU TERMALNOG KOMFORA [18]

Aktivnost	80 W (hodanje)
Lični podaci	1.75m (visina), 75 kg, 35 godina, muškarac
Izolacija (odeća)	0.5 Clo (letnja odeća)
Koeficijent emisije ljudskog tela	Standardna vrednost 0.97

III. PRIKAZ POSMATRANOG PODRUČJA

Grad Niš se nalazi u Niškoj kotlini, na 43° 19' severne geografske širine i 21° 54' istočne geografske dužine. Centar grada nalazi se na 194 m nadmorske visine. Niš ima umerenu kontinentalnu klimu sa srednjom godišnjom temperaturom od 11,4 °C. Najtopliji mesec je jul, sa srednjom temperaturom od 21,3 °C, a najhladniji je januar sa srednjom temperaturom od 0,2 °C. Grad Niš je treći po veličini grad u Srbiji i regionalni centar južne Srbije. Njegova važnost dodatno se povećava razvojem međunarodnog aerodroma čestim međunarodnim letovima, što doprinosi povećanom broju posetilaca i turista. Leskovac se nalazi na 42°52' severne geografske širine i

21°57' istočne geografske dužine, u središtu leskovačke kotline, dugačke 50 i široke 45 km, koju uokviruju planine Babička gora (1,095 m), Seličevica (903 m) i Kruševica (913 m). Na zapadnom obodu kotline su planine Radan (1,409 m) i Pasjača, a na jugu Čemernik (1,638 m) i Kukavica. Topografski, grad Leskovac karakteriše ravničarski teren koji blago pada ka severoistoku. Nadmorska visina kotline kreće se od 210 do 240 m, a grad leži na oko 230 m n.v. Klima Leskovca je umereno-kontinentalna, karakterišu je umereno topla leta i umereno hladne zime, kao i dva prelazna perioda, proleće i jesen. Prosečna godišnja osunčanost za područje Leskovca iznosi 2,084h, pri čemu je maksimalna osunčanost u julu oko 313 sati, a najmanja osunčanost je u decembru oko 54h.

IV. REZULTATI

A. Poređenje fizičkih karakteristika

Trg u Leskovcu i trg u Nišu sagrađeni su u istom periodu, 1960-ih godina. Oba trga su pravilnog oblika, površine oko 0,9 ha. U Tabeli II dat je uporedni prikaz fizičkih karakteristika ova dva trga.

Trg u Leskovcu

Trg u Leskovcu je originalno izgrađen krajem 1960-ih godina, nakon transformacije tradicionalnog planiranja u principe modernog urbanizma. Tokom narednih 50 godina trg je bio predmet brojnih prilagođavanja i promena funkcije i materijalizacije. Lokacija je narušena neplaniranim intervencijama, nedostatkom održavanja i velikim parking prostorom (Sl. 2). Predmetni trg predstavlja centar Leskovca-fokus svih događaja i susreta, ali ovako uređen prostor nije pogodan za okupljanje ljudi, kulturne manifestacije i sl. što je osnovna funkcija trga.



Sl. 2. Trg – centralna zona u Leskovcu

Severna granica trga je Bulevar oslobođenja. Dijagonalna ulica, koja je presećala područje, 1983. godine je pretvorena u pešačku trasu. Trg je skoro kvadratnog oblika (odnos stranica 1:1.2) uglavnom okružen zgradama koje su izgrađene u modernističkom stilu pre šest decenija. Sa istočne strane to su zgrada nekadašnje robne kuće „Beograd“, poslovni centar i zgrada Sindikata spratnosti P+3 do P+4, dok se sa zapadne strane nalazi poslovna zgrada spratnosti P+1 i hotel spratnosti P+3. Objekti niže spratnosti na istočnoj i zapadnoj strani trga, stvaraju kraće senke i nedovoljnu zasenčenost trga, naročito njegovog centralnog dela, u letnjim mesecima. Sa južne strane trg se oslanja na gradski park.

Površina trga iznosi oko 0,9 ha, od čega zelene površine zauzimaju 0,36 ha (oko 40% površine trga), parking prostor 0,26 ha, a ostatak prostora čine pešačke staze. Pešačke staze popločane su granitnim kockama dok su trotoari popločani behaton pločama. Zelena površina nalazi se na levoj polovini trga, dok na prostoru parkinga nema zelenih površina i visokog zelenila. Visoko zelenilo prisutno je u jugozapadnom delu zelene površine, po južnom obodu trga u okviru parka koji se nadovezuje na trg i u vidu drvoreda duž Bulevara oslobođenja.

TABELA II. UPOREDNI PRIKAZ FIZIČKIH KARAKTERISTIKA TRGOVA

	Trg u Leskovcu	Trg kralja Milana u Nišu
Površina (ha)	~0,9	~0,9
Odnos dimenzija trga	1:1,2	1:2
Udeo zelenih površina (%)	40	30
Materijalizacija	Asfalt, granitne kocke, behaton	Granitne ploče, behaton
Spratnost okolnih objekata	P+3 – P+4	P+1 – P+16

Trg kralja Milana u Nišu

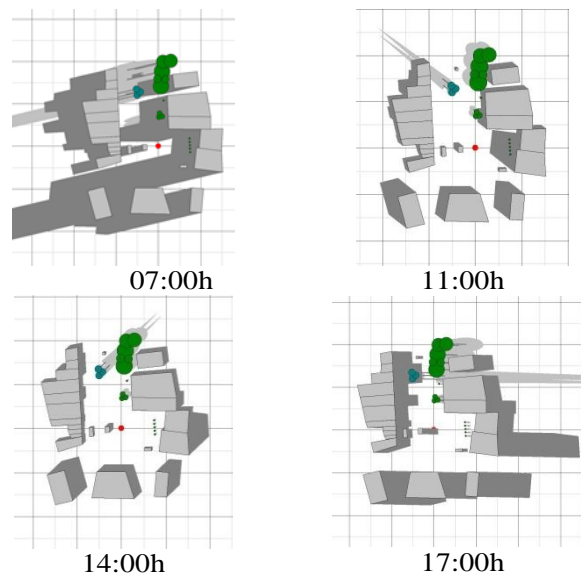
Današnji oblik Trg kralja Milana je počeo da dobija nakon oslobođenja od Turaka 1878. Tada se počinje sa gradnjom spratnih kuća na zapadnoj strani trga, koje su očuvane do danas i zaštićene kao spomenik kulture (Grupa zgrada koje čine nedeljivu celinu na Trgu Oslobođenja, potes od ugla sa Ul. Stanka Paunovića do Keja Živote Đošića). Istočna strana trga rekonstruisana je posle Drugog svetskog rata, 1959-60. godine, kada je uklonjen ostatak starog niza niskih zanatskih radnji i kafana, a potom izgrađen hotel Ambasador i zgrada restorana Central. 1990. godine raspisan je konkurs za uređenje Trga oslobođenja (Trg kralja Milana) i Pobedine ulice. Prva faza izgradnje završena je 1995. godine na osnovu prvonagrađenog rešenja Branislava Jovina i Siniše Temerinskog. Nakon rekonstrukcije 1995. godine Trg kralja Milana dobija potpuno popločan južni deo namenjen pešacima a zadržava se zelena površina prema severu. Kasnijim izmenama, parking na zapadnoj strani (Sl. 3) se ukida i takođe pretvara u pešačku površinu.



Sl. 3. Trg kralja Milana u Nišu

Trg ima oblik latiničnog slova L. Južna granica trga je ulica Vožda Karađorđa-glavni saobraćajni pravac u gradu i nekadašnja robna kuća Beograd. Sa istočne strane se nalazi hotel Ambassador spratnosti P+16 i zgrade javne namene spratnosti P+2 do P+4. Zapadnu granicu trga čini niz zgrada spratnosti P+1 do P+4+Pk. Površina trga iznosi oko 0.9 ha i može se podeliti na dva dela- južni i severni. Južni deo trga sa fontanom i spomenikom, oslanja se na ulicu Vožda Karađorđa i u potpunosti je popločan granitnim pločama prema rešenju iz konkursa. Prema severu se nadovezuje drugi deo trga sa centralno postavljenom zelenom površinom, bočnim pešačkim stazama i zelenom površinom ispred objekata na istočnoj granici trga. Ovaj deo trga izveden je 2009. godine kao druga faza izgradnje prema konkursnom rešenju. Umesto granitnih, primenjene su betonske (behaton) ploče na način koji dopunjuje boje i geometriju ranije izvedenog dela. Zelene površine zauzimaju oko 0.25 ha površine trga, dok je ostala površina trga popločana.

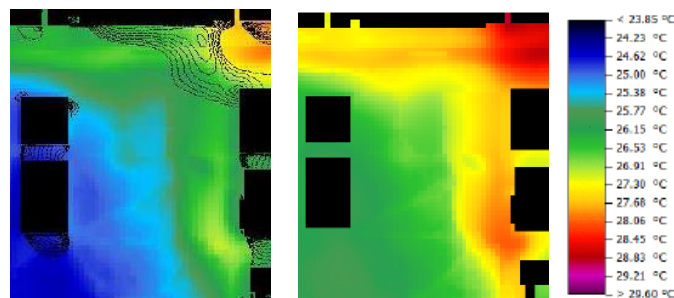
Objekti veće spratnosti i visoko zelenilo nalaze se na istočnoj strani trga i obezbeđuju zasenčenost trga u prepodnevni satima. Na zapadnoj strani trga nalaze se objekti niže spratnosti koji uslovljavaju kraće senke i nedovoljnu zasenčenost trga u popodnevni satima (Sl. 4). Pored toga, u južnom delu trga objekti su postavljeni po kraćim stranama tako da središnji deo trga u popodnevni satima ostaje u potpunosti izložen suncu. Na ovom delu trga nema zelenih površina i visokog zelenila, a popločanje je od mermernih ploča koje su se pokazale kao jedan od najtoplijih materijala u letnjim mesecima [20]. U severnom, izduženom delu trga, objekti su postavljeni po dužoj strani i obezbeđuju dobru zasenčenost pešačkih prostora. Pored toga, velika zelena površina i visoko zelenilo utiču na snižavanje temperature vazduha i poboljšanje mikroklimatskih uslova.



Sl. 4. Projekcija senki na Trgu kralja Milana u 7h, 11h, 14h i 17h

B. Rezultati simulacije

Simulacija termalnog komfora na Trgu kralja Milana vršena je za dve tačke. Jedna tačka se nalazi u središnjem delu trga i izložena suncu u toku celog dana, a druga je na zelenoj površini i u hladu u toku celog dana. Rezultati simulacije pokazuju značajnu razliku u fiziološki ekvivalentnoj temperaturi (PET) za nezasećene i zasećene prostore. Iako vrednosti PET za obe tačke premašuju 41 °C (ekstremni toplotni stres) u periodu od 11:00 do 17:00, vrednosti PET za zasećenu površinu su oko 5-10 °C niže od vrednosti za osunčanu površinu.



Sl. 5. Simulacija temperature na trgu u Leskovcu u 12h i 14h

Simulacija termalnog komfora za trg u Leskovcu daje slične rezultate. Na slici 5 prikazana je simulacija temperature vazduha na trgu u Leskovcu u 12h i 14h (mesec jul 2016.). Temperatura je prikazana bojom, od plave (najniža temperatura) do crvene (najviša temperatura). Razlika u temperaturi između donjeg levog ugla (ozelenjen deo trga) i gornjeg desnog ugla (popločan deo trga) uočljiva je u oba slučaja i dostiže 3°C. Dobijene vrednosti fiziološki ekvivalentne temperature (PET) slične su vrednostima dobijenim za Trg kralja Milana u Nišu. U najtoplijem periodu u toku dana PET vrednosti su više od 40 °C (ekstremni toplotni stres), ali variraju u zavisnosti od zasenčenosti površine - zasećene površine imaju znatno niže vrednosti

PET od osunčanih. Ovi rezultati pokazuju da su zasenčene površine prijatnije za boravak od nezasenčenih površina.

C. Rezultati ankete

Identifikovani tipovi korisnika na trgu u Nišu bili su: deca (do 15 godina starosti), adolescenti (15-25), odrasli (25-65) i stariji / penzioneri (više od 65 godina). Prema istraživanju, bilo je: 10% dece, 22% adolescenata, 43% odraslih i 25% penzionera. Prve dve grupe tolerisale su veću temperaturu na trgu, dok su se odrasli žalili na toplotne uslove, a stariji su tvrdili da nisu u stanju da se suoče sa termičkim uslovima. Tokom ankete, na trgu je bilo 62% žena i 38% muškaraca. Prema rezultatima, žene su se osećale hladnije od muškaraca. Ispitanicima su ponuđena tri moguća odgovora na skali toplotne senzacije: vruće i neudobno, toplo i blago neprijatno i udobno. 54% muškaraca se osećalo vruće i neudobno, 37% toplo i blago neprijatno i 9% udobno. Istovremeno, 49% žena se osećalo vruće i neudobno, 40% toplo i blago neprijatno i 11% udobno. Što se tiče položaja korisnika na trgu, ispitanici su mogli osetiti razliku između popločanih delova trga i travnatih površina ili delova pored reke Nišave. Pored toga delovi trga koji su bili u hladu bili su udobniji od onih koji su bili više izloženi suncu. 75% ispitanika izjavilo je da se osećaju udobnije u hladovini, dok se 15% oseća neprijatno kako na suncu, tako i u senci. Nije bilo značajnih razlika u nivou odeće među korisnicima, iako je primećeno da su stariji uglavnom nosili više odeće i obično nosili cipele umesto sandala. Većina korisnika prve tri grupe (do 65 godina) nosili su bluže sa kratkim rukavima ili bluže bez rukava, kratke pantalone, suknje, haljine, sandale ili patike, dok je 45% grupe starijih nosilo košulje sa dugim rukavima i bluže, haljine, pantalone, prsluke i cipele. Na trgu je prepoznato nekoliko vrsta aktivnosti korisnika: stajanje, polako hodanje, umereno hodanje i brzo hodanje. Samo 6% korisnika je stajalo u hladovini, niko nije stajao na suncu, 20% je hodalo polako, 60% je hodalo umereno, a 14% je brzo hodalo. Većina ljudi koji su hodali umereno pripadali grupi odraslih.

Kao i u slučaju trga u Nišu, identifikovani tipovi korisnika na trgu u Leskovcu bili su: deca (do 15 godina starosti), adolescenti (15-25), odrasli (25-65) i stariji / penzioneri (više od 65 godina); i to: 8% dece, 20% adolescenata, 42% odraslih i 30% penzionera. Deca i adolescenti su tolerisali veću temperaturu na trgu, 60% odraslih se žalilo na toplotne uslove, dok su stariji tvrdili da nisu u stanju da se suoče sa termičkim uslovima. Tokom ankete, na trgu je bilo 56% žena i 44% muškaraca. Prema rezultatima, žene su se uglavnom osećale isto kao i muškaraci. 40% muškaraca se osećalo vruće i neudobno, 36% toplo i blago neprijatno i 24% udobno. Istovremeno, 45% žena se osećalo vruće i neudobno, 40% toplo i blago neprijatno i 15% udobno. Što se tiče nivoa odeće nije bilo značajnih razlika među korisnicima, iako je primećeno da su stariji uglavnom nosili više odeće. 40% grupe starijih nosilo je košulje sa dugim rukavima i bluže, haljine, pantalone, prsluke i cipele, dok su korisnici prve tri grupe (do 65 godina) uglavnom nosili bluže sa kratkim rukavima ili bluže bez rukava, kratke pantalone, suknje, haljine, sandale ili patike. Rezultati su skoro identični sa rezultatima ispitivanja na trgu u Nišu i kada se radi o položaju korisnika na trgu. Ispitanici su mogli osetiti razliku između popločanih delova trga u odnosu na deo trga koji zapravo predstavlja parkovsku

površinu (travnata površina sa visokim rastinjem). Pored toga 80% ispitanika izjavilo je da se osećaju udobnije u hladovini, dok se 10% oseća neprijatno kako na suncu, tako i u senci. Na trgu je prepoznato nekoliko vrsta aktivnosti korisnika: stajanje, polako hodanje, umereno hodanje i brzo hodanje. 10% korisnika je stajalo (najčešće u parkovskom delu) u hladovini, niko nije stajao na suncu, 16% je hodalo polako, 52% je hodalo umereno, a 22% je brzo hodalo. Većina ljudi koji su hodali umereno pripadali grupi odraslih.

V. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Rezultati simulacije pokazuju da termalni komfor u velikoj meri zavisi od zasenčenosti površine. Vrednosti fiziološki ekvivalentne temperature (PET) za zasenčeni prostor znatno niže od vrednosti za nezasenčeni prostor. To znači da su zasenčeni prostori komforniji za boravak u toku leta, što su pokazala i ranija istraživanja. Slične rezultate dalo je i posmatranje aktivnosti korisnika i anketiranje. U letnjem periodu na trgu se zadržava veoma mali procenat ljudi (6%, odn. 10%) i to isključivo na mestima koja su u senci, dok većina prolazi trgovom bez zadržavanja. Takođe, uočena je razlika u termalnom komforu kod korisnika u zavisnosti od materijalizacije partera i prisutnosti visokog rastinja (što je takođe utvrđeno u predhodnim istraživanjima). Iako je temperatura vazduha bila gotovo ista, primećeno je da se korisnici osećaju prijatnije u prostorima koji tangiraju park ili u samom parku, što može da ukazuje na psihološke efekte zelenila na korisnike i na njihov termalni komfor.

Upoređivanjem fizičkih karakteristika dva trga može se zaključiti da oblik i dimenzije trga, orijentacija trga i visina okolnih objekata imaju značajnu ulogu u unapređenju toplotnog komfora otvorenog prostora. Trgovi koji imaju izdužen oblik sa objektima po dužim stranama, imaju bolju zasenčenost. Kod prostora kod kojih su objekti postavljeni po kraćim stranama, kao što južni deo Trga kralja Milana u Nišu, centralni deo trga ostaje nezasenčen skoro u toku celog dana. Analiza senki na Trgu kralja Milana u Nišu pokazuje da visoki objekti na istočnoj strani trga obezbeđuju zasenčenost u prepodnevni satima, dok niski objekti sa zapadne strane ne obezbeđuju dovoljnu zasenčenost prostora u popodnevni satima kada su temperature vazduha više i nezasenčen prostor neprijatan za boravak.

Termalni komfor trgova može se unaprediti podizanjem visine okolnih objekata (kada je to moguće) i natkrivanjem delova trga kako bi se dobila bolja zasenčenost u letnjim mesecima. Pored toga preporučuje se zamena postojećeg popločanja novim „hladnijim“ materijalima, povećanje udela zelenih površina, postavljanje vodenih ogledala u prostoru i sadnja visokog zelenila koje ima višestruku ulogu u poboljšanju termalnog komfora (senčenje, hlađenje putem evapotranspiracije, psihološki efekti).

ZAHVALNICA

Rad je realizovan u okviru istraživačkog projekta: „Prostorni, ekološki, energetski i društveni aspekti razvoja naselja i klimatske promene – međusobni uticaji“ (TP36035), PP 1: „Promena klime kao činilac prostornog razvoja naselja, prirodnog predela i pejzaža“, finansiranog od strane

LITERATURA

- [1] L. Ovstedal, E. Ryeng, "Understanding pedestrian comfort in European cities: How to improve walking conditions," In European Transport Conference, Cambridge, UK, 2002.
- [2] G.S. Golany, "Urban design morphology and thermal performance," *Atmospheric Environment*, vol. 30, no. 3, pp. 455-465, 1996.
- [3] H. Sanaieian, M. Tenpierik, K. Van den Linden, F. M. Seraj, S. M. M. Shemrani, "Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 551-560, 2014.
- [4] E. Jamei, P. Rajagopalan, "Urban growth and pedestrian thermal comfort," In ASA2015: Living and learning: research for a better built environment: Proceedings of the 49th International conference of the Architectural Science Association, University of Melbourne, 2015, pp. 907-918.
- [5] M. Santamouris, ed., *Energy and climate in the urban built environment*, Routledge, 2013.
- [6] T. Stathopoulos, H. Wu, J. Zacharias, "Outdoor human comfort in an urban climate," *Building and Environment*, vol. 39, no. 3, pp. 297-305, 2004.
- [7] B Levy, "Urban Square as the Place of History, Memory, Identity," In : D. Drazic, S. Radisic, M. Simu (eds), *Memory of the City*, Kulturklammer, Belgrade, 2012, pp. 156-173.
- [8] B. Karadžić, A. Mijović, (eds.), *Environment in Serbia: an indicator – based review*, Belgrade, Serbian Environmental Protection Agency, 2007, pp. 45-55.
- [9] A. Djukic, A. Stupar, "Suočavanje sa klimatskim promenama: od evropskih strategija do lokalne realnosti/Facing the Climate Changes: From European Strategies to Local Reality," *Arhitektura i urbanizam*, vol. 32, pp. 35-48, 2011.
- [10] B. Kahn, "This Is How Climate Change Will Shift the World's Cities," *Climate Central*. July 5, 2017
http://www.climatecentral.org/news/global-cities-climate-change-21584?utm_content=buffer12da8&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer (accessed August 1, 2017).
- [11] S. Yilmaz, S. Toy, H. Yilmaz, "Human Thermal Comfort over the Different Land Surfaces during Summer in the City of Erzurum, Turkey," *Atmosfera*, vol. 20, no. 3, pp. 289-297, 2007.
- [12] M. Romero, "Arquitectura Bioclimatica do Espaco Publico", UnB, Brasilia, 2001.
- [13] M. Nikolopoulou, S. Lykoudis, "Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries," *Building and Environment*, vol. 41, pp. 1455-1470, 2006.
- [14] L.Chen, E. Ng, "Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade," *Cities*, vol. 29, pp. 118-125, 2012.
- [15] A. Djukic, M. Vukmirovic, S. Stankovic, "Principles of climate sensitive urban design analysis in identification of suitable urban design proposals. Case study: Central zone of Leskovac competition," *Energy and Buildings*, vol. 115, pp. 23-35, 2016.
- [16] B. Taylor, P. Guthrie, "The first line of defence: Passive design at an urban scale," In *Proceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 2008, pp. 27-29.
- [17] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, "Modeling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model," *PLEA 2006 - 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, 2006.
- [18] M. Taleghani, D. Sailor, G.A. Ban-Weiss, "Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood," *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 2, 2016, 024003.
- [19] M. Tsitoura, M. Michailidou, T.Tsoutsos, "A bioclimatic outdoor design tool in urban open space design," *Energy and Buildings*, vol.153, pp. 368-381, 2017.
- [20] J.Đekić, P.Đekić, M.Dinić-Branković, M.Mitković, "Influence of different pavement materials on warming up of pedestrian areas in summer season," *3rd International Academic Conference on Places and Technologies*, University of Belgrade – Faculty of Architecture, Belgrade, 14-15. April 2016, pp. 175-182.

ABSTRACT

Urban public open spaces are very important because everyday activities and social contacts of the inhabitants take place there. The intensity of use of public spaces depends on their quality, primarily on thermal comfort. Climatic conditions and inclusive urban design affect the microclimate conditions of open space - thermal comfort, and therefore the intensity of space use. The research analyzes the influence of physical properties of city square on thermal comfort and the use of space. For the purpose of the paper two city squares in Niš and Leskovac built in the second half of the 20th century, were analyzed. The research methods include: analysis of physical properties of the space, observation and direct survey of space users, and simulation of thermal comfort using RayMan software. Observation of the activities in the area and users survey was carried out during the summer months of 2016. The results of the research show that thermal comfort of open spaces depends to a large extent on the physical properties of the space, such as: shape, dimensions, materialization, presence and types of greenery, height of surrounding objects, etc.

THERMAL COMFORT OF THE CITY SQUARE BUILT IN THE SECOND HALF OF THE 20TH CENTURY: CASE STUDIES OF NIŠ AND LESKOVAC

Aleksandra Đukić
Jelena Đekić
Petar Mitković

Попречно природно провјетравање и енергетски ефикасна и одржива градња

Саша Б. Чворо¹

¹Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Бања Лука, Република Српска
sasa.cvoro@aggf.unibl.org

Сажетак—Рад је фокусиран на значај ваздушног комфора и енергетске ефикасности зграда и могућности примјене у процесу пројектовања. Поред уобичајених облика провјетравања у раду је посебна пажња посвећена архитектонским мјерама, односно попречном природном провјетравању. Посебан осврт је дат на конкретне савремене архитектонске примјере примјене ових мјера.

Кључне ријечи—ваздушни комфор, природно провјетравање, енергетски ефикасна и одржива градња, попречно провјетравање

I. УВОД

Квалитет животне средине у простору дефинисан је условима комфора у згради према којима се нека особа осјећа удобно. Осјећај удобности у простору неке особе заснива се на субјективној перцепцији низа спољашњих утицаја. Квалитет животне средине у простору поред низа елемената значајно одређује и концентрација онечишћавајућих, по људско здравље штетних материја присутних у ваздуху у зградама.

Извор онечишћења у зградама најчешће одређује људска активност. У развијеним земљама, концентрација онечишћавајућих материја у затвореним просторима је веома слична онима у атмосферском ваздуху. У екстремним случајевима, концентрација онечишћавајућих материја у зградама може бити и до пет пута већа од спољашњих онечишћења. Према Центру Уједињених нација за људска насеља, квалитет ваздуха у унутрашњем простору је неадекватан, односно неугодан, у чак око 30% објеката широм свијета. [1]

У погледу квалитета животне средине зграде нису само склониште или баријера против одређених нежељених утицаја /различитих атмосферских утицаја, односно кише, вјетра, хладноће и др./, већ их треба посматрати и као селективни филтер за одбацивање нежељених утицаја, али и прихватање позитивних, као што су нпр. природно освјетљење, сунчево зрачење или природно провјетравање.

Значај архитектуре у дефинисању квалитета животне средине, а самим тим и обезбјеђивању ваздушног комфора је од немјерљивог значаја. Унапређење животних услова, смањење потрошње енергије и очување животне средине подразумјева пројектовање и извођење зграда у складу са

постављеним циљевима одрживог развоја. Принципи пројектовања и начини материјализације утичу на очекивани ниво енергетске оптимизације и све елементе комфора у простору.

За архитекту је зато важно да у процесу пројектовања контролише услове животне средине, првенствено топлоту, ваздух, свјетлост и звук. Услови удобности у простору могу се обезбједити самим зградама /пасивном контролом комфора/ или употребом енергије /активном контролом комфора/. У већини случајева се ослањамо на заједничко дејство ове двије врсте контрола комфора у простору.

У данашње вријеме, када смо дошли до сазнања да су наши традиционални извори енергије коначни и на путу крајњег исцрпљења и да њихова убрзана употреба има озбиљне посљедице по животну средину /емисија CO₂, глобално загријавање, као и локално атмосферско онечишћење/, један од основних циљева архитектуре је да обезбједи задовољавајуће услове ваздушног комфора у простору са мало или без коришћења енергије, осим из непосредне околине или обновљивих извора.

Задатак архитектуре је да у циљу остваривања оптималних услова ваздушног комфора у простору и енергетске оптимизације:

- испита дате утицајне факторе комфора /услови на лицу мјеста, микроклима, онечишћивачи ваздуха и др./,
- утврди границе пожељних или прихватљивих услова комфора у простору /температура, влажност и квалитет ваздуха/,
- покуша да контролише ове промјенљиве параметре уз помоћ пасивних средстава /карактеристика зграде/ колико је то могуће и изводљиво,
- редукује потрошњу енергије само на контролу и одржавање активних средстава обезбјеђивања ваздушног комфора.

II. ПРИРОДНО ПРОВЈЕТРАВАЊЕ И ЕНЕРГЕТСКИ ЕФИКАСНА И ОДРЖИВА ГРАДЊА

Природно провјетравање има првенствени задатак да допринесе квалитету ваздуха у простору смањењем

концентрације онечишћавајућих материја, побољшавању услова топлотне удобности и смањењу потрошње енергије у зградама. Услови за постизање ових побољшања су да је концентрација онечишћавајућих материја у атмосферском ваздуху мања него у унутрашњем простору, спољашња температура ваздуха у границама удобности или, у најгорем случају, не доводи до топлотног шока корисника простора и да природно провјетравање не изазива друге еколошке и социјалне проблеме /бука, угрожавање приватност и др./.[2]

Квалитет ваздуха природно или дјелимично природно провјетраване зграде зависи у великој мјери од атмосферских утицаја, микроклиматских карактеристика локације, околне средине и архитектонских карактеристика зграде. Примјена мјера и системских рјешења природног провјетравања утиче на животни стандард корисника простора. Квалитет зграде, као и врсте коришћене енергије, услуга и система у објектима дефинишу улогу природног провјетравања у складу са захтјеваним квалитетом ваздуха у простору. Оно некада није довољно у односу на захтјеве који се постављају за одређене просторе, нпр. било да је у питању боравак већег броја људи или одређени процес који се обавља у посматраном простору.

Истовремено, са хигијенско - здравственог становишта, основни циљ примјене стандарда енергетске ефикасности је обезбјеђење довољне количине свјежег ваздуха у простору. У том смислу су израда ваздушно непропусног слоја и примјена система контролисане вентилације /које могу да укључују мјере пасивног и активног провјетравања/ уобичајене мјере за постизање задовољавајућег ваздушног комфора. Умањење топлотних губитака услјед провјетравања простора важан је предуслов за избјегавање оштећења на зградама, штедњу енергије и умањење укупних трошкова за гријање и хлађење објеката.

Минимализација вентилационих топлотних губитака постиже се обезбјеђивањем високе ваздушне непропусности добро испројектованим и изведеним вањским омотачем зграде ради избјегавања неконтролисане измјене ваздуха. Савременим технологијама производе се прозори и врата који омогућавају ваздушну заптивеност, односно непропусност.

У прољеће, љети и у јесен потребна количина свјежег ваздуха износи 10 до 30 м³ по особи и постиже се умјереним отварањем прозора, док у зимском периоду овакав начин провјетравања није прихватљив. У сваком случају, ако у просторији од 10 м² /са 30 м³/ бораве двије особе, без отварања прозора количина свјежег ваздуха је довољна за око 1,5 час.

Ваздушна непропусност је важан фактор енергетски ефикасне градње, којим се истовремено избјегава и влажење и оштећивање грађевинских конструктивних елемената и завршних облога. Кроз недовољно ваздушно непропусне грађевинске елементе топли, влажни ваздух из унутрашњег простора струји ка спољашњем, при чему се на хладним, недовољно изолованим, дијеловима

конструкције зграде може сакупљати водени кондезат. Будући да велики дио оштећења на зградама настаје управо на овај начин, ваздушно непропусна спољашња изолација се не примјењује само код енергетски ефикасних зграда већ и код објеката свих осталих енергетских стандарда.

Контролисано провјетравање простора подразумјева да се у правој мјери и на прави начин доводи чист, спољашњи ваздух /без онечишћења/ концептима и склоповима провјетравања који су енергетски рационални, односно са искоришћавањем топлотне енергије онечишћеног ваздуха. Овакви системи имају осигуран довод свјежег и квалитетног спољашњег ваздуха, а због филтрирања ваздух има мале количине прашине, мириса, полена, алергена, СО² и других материја.

Провјетравање по фугама и пукотинама, односно инфилтрација ваздуха је, генерално посматрано, веома непоуздан систем јер не задовољава стандарде и принципе енергетски ефикасног и одрживог грађења. Са друге стране, оптимизација система природне вентилације подразумјева да се отвори на згради, односно прозори, врата, кровни продужци, канали за вентилацију и др., пројектују тако да губици топлоте у зимском периоду и топлотно оптерећење у љетњем периоду буду што мањи, те када год је то могуће, отвори буду конципирани тако да се максимално искористе предности различитих одрживих мјера пасивног /природног/ провјетравања у љетњем периоду.

Природно провјетравање, поред свих горе наведених добрих карактеристика, са собом носи и одређене недостатке:

- може значајно да повећа потребу за топлотом у одређеним условима,
- премало влажности ваздуха у зимском периоду,
- превисоке температуре у просторијама у љетњем периоду,
- повремено доводи до појаве промаје са снажним налетима вјетра,
- повремено доводи до неадекватног одвођења онечишћавајућих материја код недостатка вјетра. [3]

У том смислу, данас су присутни различити обрасци природног провјетравања, систем ефекта димњака, ноћно провјетравање са хлађењем термалне масе, узгонске вертикале, атријумске куће /унутрашње двориште/, као и један од модернијих приступа преко двоструке, вентилисане фасаде. У наставку рада ће се указати на основне карактеристике и дати примјери попречног природног провјетравања.

III. ПОПРЕЧНО ПРИРОДНО ПРОВЈЕТРАВАЊЕ

Попречно природно провјетравање простора успоставља проток свјежег, спољашњег ваздуха кроз објекат и омогућава одвођење онечишћеног ваздуха из

зграде и истовремено доприноси регулацији температуре и влажности ваздуха у простору. У том смислу, попречно провјетравање је одржива и енергетски ефикасна алтернативна мјера механичком провјетравању простора, под одговарајућим климатским условима.

Циљ ових мјера може бити директно провјетравање и пасивно хлађење простора као резултат повећане брзине кретања и ниже температуре ваздуха или хлађење контактних /у додиру са правцем струјања ваздуха/ архитектонски материјализованих површина, којима се обезбјеђује индиректно снижавање температуре ваздуха. Ефикасност мјера зависи од величине вентилационих отвора за струјање ваздуха /мјеста улаза и излаза ваздуха/, брзине вјетра, те температуре и релативне влажности атмосферског ваздуха. Брзина кретања ваздуха је од кључног значаја за директно провјетравање, а проток ваздуха за индиректно, структурно провјетравање и хлађење простора.

Интезитет попречног провјетравања директно зависи од температурне разлике унутрашњег и спољашњег ваздуха. Оно је могуће само када је спољашњи ваздух за најмање 1.7°C /3°F/ ниже температуре од унутрашњег ваздуха. Са релативно малим температурним разликама долази и до занемарљивих ефеката провјетравања, односно ваздух струји на собној температури, не утичући тако на висину температуре и релативне влажности ваздуха у простору. Истовремено, са повећањем температурних разлика и протока ваздуха повећава се и интезитет и обим провјетравања. [4]

Директно попречно провјетравање је у сразмјери са брзином кретања ваздуха, односно јачином и правцем вјетра. Преовлађујући правци вјетра се често мијењају са годишњим добима, а могу да се смјењују и током краћих временских периода. Брзина вјетра је углавном свакодневно и/или сезонски промјенљива, а обично бива веома слаба у ноћним сатима у одсуству соларног загријавања тла (Како је вјетар хоризонтално струјање ваздуха чији је настанак условљен температурним и разликама притисака у сусједним ваздушним масама, тако и његов интезитет директно зависи од интезитета соларног зрачења). Најбољи ефекти природног попречног провјетравања се постижу када су зграде отворене доминантним локалним струјањима ваздуха, посебно повјетарцу чији се ефекат директно или индиректно провјетравања и хлађења простора додатно појачава заштитом објекта од директног сунчевог зрачења.

Успјешно попречно провјетравање подразумјева архитектонску форму која наглашава и користи изложеност објекта преовлађујућим правцима вјетра, обезбјеђује адекватан /контролисан/ улазак ваздуха у простор, минимализује интерне препреке у простору /на линији кретања ваздуха између улаза и излаза/, а истовремено омогућава адекватано извођење онечишћеног ваздуха.

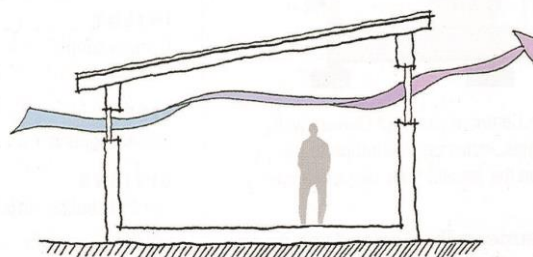
Идеалан облик архитектонског простора је тако, издужена правоугаона форма без унутрашњих преграда. На локацији, у непосредном окружењу објекта, треба избјегавати спољашње препреке које ометају адекватан

проток вјетра /попут дрвећа, жбуња или других артефаката у простору/, а с друге стране, правилним постављањем вегетације, заклона или крилних зидова треба усмјеравати и побољшавати проток ваздуха у правцу доминантних вјетрова.

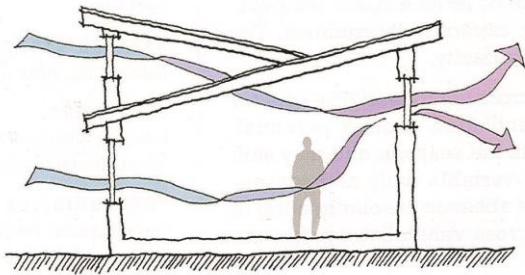
Попречним провјетравањем се, због обезбјеђивања ваздушног и топлотног комфора, може усмјеравати проток ваздуха кроз било који дио простора у зградама уколико је спољашња температура ваздуха довољно ниска да омогући струјање ваздуха. У случају високих температура спољашњег ваздуха, попречно провјетравање даје резултате уколико је проток ваздуха директно усмјерен у простору у висини боравка људи /у зони неутралне осе/, чиме особе у простору осјећају већу брзину кретања ваздуха. Попречно провјетравање је у случају ноћног хлађења простора /када постоји адекватна брзина вјетра/ усмјерено на максимални термички контакт са масивним грађевинским површинама и индиректно хлађење простора. Такође, висока вриједност релативне влажности ваздуха може угрозити удобност у простору чак и онда када су обезбјеђени оптимални услови провјетравања и хлађења простора. [4]

У том смислу, дефинисани су основни обрасци попречног природног провјетравања:

- Попречно провјетравање у горњим зонама простора, које омогућава уклањање онечишћеног ваздуха и структурно хлађење простора без утицаја на удобност корисника, односно без могућег ефекта промаје; /Sl.1./.
- Попречно провјетравање кроз ниже зоне у простору, обезбјеђује струјање ваздуха у нивоу корисника, чиме се директно утиче на осјећај удобности и температуру људског организма. /Sl.2./.



Sl. 1. Приказ попречног природног провјетравања у горњим зонама простора / Извор: Kwok, A.G., Grondzik, W.T., The Green Studio Handbook – Environmental Strategies for Schematic Design, Oxford: Architectural Press, 2007., стр.140. /



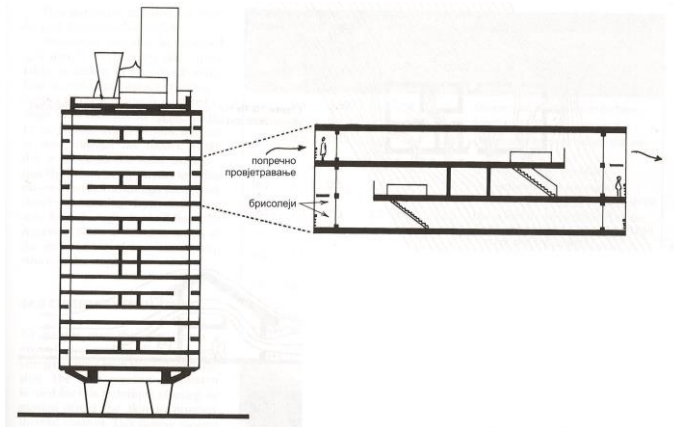
Sl. 2. Приказ попречног природног провјетравања у доњим зонама простора. / Извор: Kwok, A.G., Grondzik, W.T., The Green Studio Handbook – Environmental Strategies for Schematic Design, Oxford: Architectural Press, 2007., стр.140. /

Битан параметар попречног провјетравања је и одређивање типа и позиције вентилационих отвора /прозора, канала и др./ и њихов утицај на комплетан комфор у простору, квалитет ваздуха и енергетске перформансе зграде. Као негативан ефекат појављују се могући већи ниво буке у простору који се појављује преко непосредних извора комуналне буке из окружења, а која у објекат допире кроз вентилационе отворе, могућност убацивања ваздуха незадовољавајућег квалитета, као посљедица неадекватних мјеста захвата ваздуха, те топлотни губици изазвани неконтролисаном примјеном система.

IV. ПРИМЈЕРИ И ИСКУСТВА

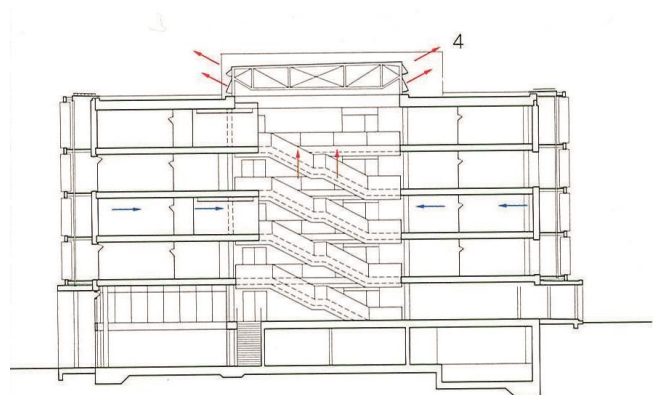
У наставку су дати примјери савремених архитектонских остварења која указују на могућност примјене архитектонских мјера, у конкретном случају попречног природног провјетравања, и њихов значај на целокупну енергетску ефикасност зграда. Такође, дат је примјер пројекта зграде Архитектонско – грађевинско – геодетског факултета у Бањој Луци (аутори Саша Б. Чворо и Малина Чворо) кроз приказ предложених мјера природног провјетравања, њиховог значаја у обезбјеђењу ваздушног комфора у односу на дефинисане енергетске карактеристике будућег објекта и биланс пројектованих енергетских перформанси.

На Sl.3. приказан је савремени архетипски архитектонски примјер попречног природног провјетравања простора, Ле Корбизјеов стамбени блок Unité d'habitation у Марсеју, из 1952. године. Двоетажне стамбене јединице галеријског типа, изразито мале ширине корисног стамбеног простора, пружају се унакрсно у простору зграде са омогућеном двостраном оријентацијом. Користећи природно окружење и микроклиматске услове, посебно доминантан вјетар, омогућено је природно попречно вјетрење без додатних механичких уређаја. [5] С обзиром на вријеме градње и социолошку димензију читавог простора примјењена функционална организација простора у унутрашњој структури зграде представља образац који на најбољи начин персонификује „модерну“, а који је своје отјелотворење добио и у низу реализованих објеката савремених српских архитеката.



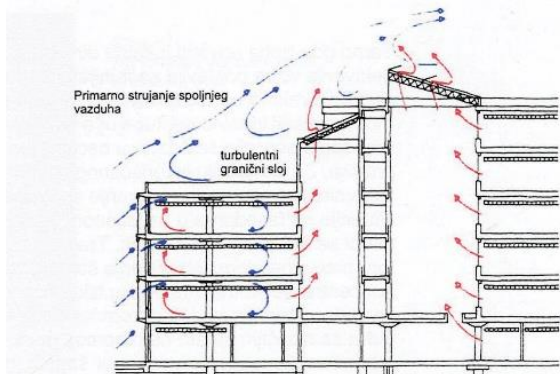
Sl. 3. Примјер савременог архетипског попречног природног провјетравања, стамбени блок Unité d'habitation, Марсеј, Ле Корбизје / Извор: Lechner, N., Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009., стр. 279. /

Зграда швајцарског Института за технологију из Цириха (Swiss Federal Institute of Technology) изграђена је 2006. године у Дибендорфу. Пројектанти архитектонског бироа Bob Gysin + Parter су изградили чврсту и хомогену просторну структуру научно – истраживачког центра, који је један од највећих нула – енергетски класификованих објеката образовне намјене у Европи. Објекат карактерише систем подржане вентилације са режимом ноћног природног попречног провјетравања, активним мјерама хлађења и без конвенционалног гријања, при чему се остварују оптималне радне температуре у канцеларијском простору од 20°C и 18°C у зонама комуникација. Двослојна фасадна раван, са вертикалним покретним стакленим крилима, омогућава попречно и узгонско провјетравање преко централног унутрашњег дворишта са застакљењем и вентилационим отворима за избацивање онечишћеног ваздуха, приказаног на Sl.4. Пројектна потрошња енергије за електро погоне, гријање и хлађење објекта износи 66,9 kWh/m². [6]



Sl. 4. Примјена различитих система провјетравања у објектима образовне намјене, Swiss Federal Institute of Technology, Dubendorf, Bob Gysin + Parter / Извор: Hegger, M., Fuchs, M., Stark, Th. Zeumer, M., Energy Manual – Sustainable Architecture, Munich: Edition Detail, Birkhauser, 2007., стр. 243. /

Примјер интегрисане примјене различитих система провјетравања је административна зграда Tchibo Holding Ag у Хамбургу архитеката Burgin Nissen Wentzlaff из Базела. Ради се о објекту са подржаном вентилацијом и хлађењем, као и са што је могуће већим процентом природног освјетљења и провјетравања. Систем вентилације је пројектован тако да се максимално продужи вријеме природног попречног и узгонског провјетравања. Двослојна фасада је изведена са заштитом од сунца и стражњом вентилацијом на подручју унутрашње равни, те карактеристичним горњим и доњим крилима за вентилацију, који служе за природно провјетравање у најразличитијим временским условима /јаки удари вјетра, слаби удари вјетра, без вјетра, термичка размјена ваздуха без вјетра и др./ Код виших удара вјетра спољна струјања ваздуха спроводе се изнад мрежастог плафона просторија, које се тангенцијално шири ка унутрашњем дворишту у циљу бољег узгонског и попречног природног провјетравања простора. Ток струјања ваздуха се завршава са централним свјетларником, чији се кровни елементи могу отворити у циљу исисавања онечишћеног ваздуха из околних просторија. У случају високих спољних температура ваздуха провјетравање се врши механичком вентилацијом са хлађењем. [3]



Sl. 5. Tchibo Holding Ag, Хамбург, Burgin Nissen Wentzlaff/ Извор: Daniels, K., Tehnologija ekološkog грађевина, Beograd: Jasen, 2009. /

Опште мјере за обезбјеђење ваздушног комфора у новој згради Архитектонско – грађевинско - геодетског факултета у Бањој Луци подразумевају одређивање оптималног броја особа у одређеним просторима у складу са препорукама датим у европском стандарду EN 13779. Обим и карактер конкретних мјера за обезбјеђење ваздушног комфора одређен је прије свега пројектним задатком дефинисаним енергетским перформансама будуће зграде, које максималну потрошњу енергије за гријање /и хлађење/ објекта одређују у износу до 15 kWh/m² годишње, потрошњу примарне енергије 120 kWh/m² годишње.

У циљу енергетске оптимизације и рационализације, неопходно је да се топлотни губици изазвани потребним мјерама природног провјетравања смање на неопходну, односно најмању могућу мјеру. Примјери приказаних савремених свјетских искустава, показују да је наведене,

високе енергетске стандарде, а када је у питању обезбјеђење ваздушног комфора у предметном простору, могуће скоро искључиво постићи примјеном мјера контролисане, односно централизоване вентилације уз корективну или допунску улогу природног провјетравања.

У том смислу је за конкретне архитектонске мјере за обезбјеђење ваздушног комфора у новој згради АГГ факултета у Бањој Луци, у виду природног провјетравања, одабрано попречно ноћно провјетравање, провјетравање узгонским вертикалама преко централног хола и кровних продужетака и провјетравање двослојном сегментираним фасадом. [7]

Попречно ноћно провјетравање на објекту подразумјева максимално искоришћење хлађења термалне масе у лјетњем периоду, комбиновано са аутоматском регулацијом отварања прозора. Могућа примјена је у вишим етажама старог дијела објекта / просторије са двостраном оријентацијом / и у наспрамно оријентисаним хоризонталним комуникацијама у новом дијелу објекта / правац пружавања у осовини сјевер – југ /.



Sl. 6. Графички приказ расподеле пројектне температуре ваздуха у згради АГГ факултета, прилог аутора.

Након анализе укупних предвиђених мјера постигнута вриједност пројектоване потрошње коришћене / финалне енергије за гријање објекта у износу од 8.1 kWh/m²год и укупне финалне енергије од 14.8 kWh/m²год сврстава новопроектвану зграду АГГ факултета у енергетски разред А+. Енергетски преглед пројектованих мјера по ставкама биланса приказан је у Таб.1.

ТАБЕЛА I. ЕНЕРГЕТЕСКИ БИЛАНС

Ставка биланса / финална енергија	Пројектовано / kWh/m ² год /
Гријање	8.1
Вентилација	2.6
Топла вода	0.9
Расвјета	2.9
Разно	0.3
Хлађење	/

V. ЗАКЉУЧАК

Обезбеђење ваздушног комфора у унутрашњем простору је основ за планирање и пројектовање савремених архитектонских здања. Карактеристике ваздушног комфора могу се примјенити у архитектонском пројектовању јер утичу на укупну удобност корисника и вриједност зграде. Унапређење ваздушног комфора /осигурање чистог ваздуха за здрав живот и креативан рад у зградама, без обзира на локацију/, као и умањење негативних микроклиматских ефеката /нпр. повећане температуре и влажности ваздуха/ и концентрације онечишћивача предметног подручја на здравље људи, чине конкретне циљеве који произилазе из основних поставки процеса архитектонског пројектовања и примјене енергетски ефикасних стандарда.

На концепт енергетске оптимизације зграде утичу свеобухватни гранични услови /употреба, енергија, клима и комфор/, урбанистички параметри и инфраструктура природног и грађеног окружења, вањски омотач зграде, инсталације у згради, материјали и стратегије, концепти и законски прописи, на основу којих се планирају мјере изградње зграда усклађене са енергетским, еколошким и економским перформансама. Енергетске перформансе зграде помажу пројектанту да боље разумије како зграда користи енергију. На тај начин се стварају услови да одговарајући архитектонски и урбанистички концепти постану интегрални дио основне пројектантске идеје.

Највећи дио одлука које утичу на потрошњу енергије у згради доноси се управо у почетној фази пројектовања, разматрању функционалних шема и прелиминарних форми. Напор, потребан за грубо сагледавање енергетских аспеката одлучујући је за даљи пројектантски рад. Активност пројектанта одвија се првенствено у повезивању и укрштању различитих идеја, а не само у смислу анализе. Информације и анализа проблема представљају се, прије свега, на начин који генерише архитектонски облик.

Пројектант мора да разумије форме генерисане по енергетским критеријумима. Архитектонски израз новопроектване зграде Архитектонско – грађевинско - геодетског факултета показује како параметри планирања и пројектовања енергетски ефикасних стандарда инспиративно утичу на просторно обликовне карактеристике савремених архитектонских здања. Овај примјер, али и примјери других приказаних архитектонских остварења показују да ови принципи не представљају ограничења већ дају нове елементе и начине за обликовање простора.

Унапређење ваздушног комфора простора у директној је зависности од конструктивних склопова, њихових

припадајућих грађевинских материјала и инсталационих система. Квалитет ваздуха у просторији је са једне стране одређен квалитетом доведеног атмосферског ваздуха и облицима провјетравања, а са друге стране онечишћењима условљеним намјеном простора и људским активностима које се у њему одвијају. Кретање ваздуха у простору се спроводи у складу са архитектонском организацијом простора. Циљ је омогућити усаглашено струјање ваздуха у просторији уз одвођење онечишћења насталих усљед боравка и рада у унутрашњем простору.

Енергетска ефикасност зграда могућа је и без примјене механичких уређаја за обраду ваздуха у унутрашњим просторима. Природно провјетравање подразумјева да се отвори на згради пројектују тако да губици топлоте у зимском периоду и топлотно оптерећење у љетњем периоду буду сведени на разумну мјеру.

LITERATURA

- [1] „AE 310 Fundamentals of Heating, Ventilating, and Air-Conditioning“. Brussels, 2005., ca <http://docslide.us/documents/fundamentals-hvac.html>
- [2] C. Ghiaus, F. Allard, Natural Ventilation in the Urban Environment - Assessment and Design, London: Earthscan, 2005.
- [3] K. Daniels, Tehnologija ekološkog gradenja, Beograd: Jasen, 2009.
- [4] A.G. Kwok, W.T. Grondzik, The Green Studio Handbook – Environmental Strategies for Schematic Design, Oxford: Architectural Press, 2007.
- [5] N. Lechner, Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [6] M. Hegger, M. Fuchs, Th. Stark, M. Zeumer, Energy Manual – Sustainable Architecture, Munich: Edition Detail, Birkhauser, 2007.
- [7] С. Б. Чворо, М. Чворо, Техничка документација за реконструкцију, адаптацију, доградњу и надоградњу постојећег објекта Архитектонско - грађевинског факултета Универзитета у Бањој Луци, Бања Лука: Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањој Луци, 2012

ABSTRACT

The paper focuses on the importance of air comfort and energy efficiency of buildings and the possibilities of application in the design process. In addition to the usual forms of ventilation in the work, special attention is paid to architectural measures, is to cross-flowing natural ventilation. A special review is given to concrete contemporary architectural examples of the application of these measures.

TRANSIENT NATURAL AIR-VENTILATION AND THE ENERGY EFFICIENT AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION

Sasha B. Chvoro¹



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017

3 - 4. novembar, Banja Luka

Sesija E1

Sesija E1

Radenko Marjanović i Petar Matić

**ANALIZA OSTVAREN OG POVEĆAVANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI POGONA PUMPN OG
POSTROJENJA SA FREKVENCIJSKOM REGULACIJOM**44

Vladimir Popović, Miloš Kukić, Đura Oros, Roberto Varga i Darko Marčetić

OPTIMALNO UPRAVLJANJE ASINHRONOM MAŠINOM U POGONU ELEKTRIČNIH VOZILA49

Petar Matić, Marko Gecić, Darko Marčetić, Vladimir Popović i Đura Oros

**MATEMATIČKI MODEL VISOKOBRZINSKOG SINHRONOG MOTORA SA
PERMANENTNIM MAGNETIMA SA UVAŽENIM GUBICIMA U GVOŽĐU**56

Darko Marčetić, Marko Gecić, Petar Matić

**ANALIZA MOGUĆNOSTI MINIMIZACIJE GUBITAKA SINHRONOG MOTORA SA STALNIM MAGNETIMA
NA ROTORU POGODNOG ZA PRIMENU U UREĐAJIMA ŠIROKE POTROŠNJE**63

Marko Šinik, Leposava Ristić, Milan Bebić, Saša Štatkić, Dragan Jevtić, Neša Rašić i Bogdan Brković

**PRIMENA AKTIVNIH ISPRAVLJAČA U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA VISOKE
ENERGETSKE EFIKASNOSTI**69

Bojan Erceg, Branko Blanuša, Đorđe Lekić

SIMULACIONI MODEL TROFAZNOG MATRIČNOG PRETVARAČA77

Анализа оствареног повећавања енергетске ефикасности погона пумпног постројења са фреквенцијском регулацијом

Раденко Марјановић¹, Петар Матић²

¹ Arcelor Mittal Prijedor, д.о.о. Приједор, Босна и Херцеговина

² Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, Бања Лука, Босна и Херцеговина

Садржај – Овај рад презентује студију побољшања енергетске ефикасности у пумпном постројењу рудника помоћу регулисаног погона са фреквенцијским регулатором. Циљ рада је да се упореде рачунски резултати очекиваних пројектованих режима рада и ефикасности са измјереним вриједностима радних величина и ефикасности рада погона у експлоатацији.

Кључне ријечи - пумпа, асинхрони мотор, фреквентни регулатор, енергетска ефикасност.

I. Увод

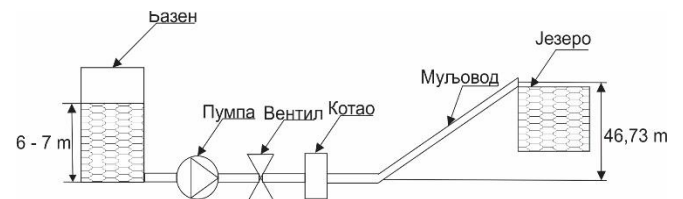
Електромоторни погони пумпних система у рачунима за утрошену електричну енергију заузимају 25 % до 50 % у индустрији. Утрошак електричне енергије за потребе пумпе може бити један од највећих ставки у рачуну ако пумпа ради више од 2000 радних часова годишње. Постоји велика могућност да се трошак за пумпу смањи путем одговарајућег пројектовања и избора пумпног система и контроле. Рад пумпе са промјенљивим протоком или лошим избором пумпе (предимензионасање) уобичајено захтијева 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 лијеplења материјала, кавитације, цурења, и до оштећења вентила усљед корозије. Најефикаснији начин управљања протоком је подешавање брзине пумпе [1]. Осим тога, снага пумпе зависи од куба брзине, па се управљањем брзином уједно управља и протоком и побољшава енергетска ефикасност. Регулисање брзине обртања пумпе може се вршити на више начина, од којих је најзначајнији примјеном фреквенцијског (или фреквентног) регулатора који има високу ефикасност, једноставно управљање, могућност једноставног уклапања у сложене системе управљања итд.

У раду ће се прво описати претходни систем погона пумпе заснован на синхронном мотору константне брзине и регулацији протока помоћу вентила за пригушење. Након тога, даће се основни елементи прорачуна новог електромоторног погона заснованог на фреквенцијски регулисаном асинхронном мотору који замјењује претходни систем. Процијениће се очекивано рачунско побољшање енергетске ефикасности пројектованог погона у односу на

претходни систем. Коначно, на основу мјерења на реализованом систему, упоредиће се реално остварено побољшање енергетске ефикасности у односу на прорачун, те дати одговарајући коментари.

II. ПРЕТХОДНИ ПУМПНИ СИСТЕМ

За потребе препумпавања муља из пумпне станице муља у руднику ArcelorMittal Prijedor у дугогодишњој експлоатацији кориштен је електромоторни погон кога је чинила центрифугална пумпа ГРТ 4000/71а 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 [2]. Капацитет пумпе је 3200 m³/h, а доток муља из система у пријемни базен, односно у пумпу је између 2200 m³/h и 2500 m³/h. Шема претходног пумпног система и муљовода приказана је на слици 1.



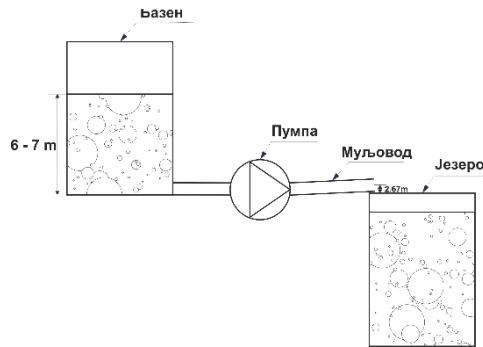
Сл. 1. Шема пумпног система и муљовода

Пошто пумпа има већи капацитет него што је доток муља у пумпну станицу, регулација протока се вршила пригушењем вентила. Котао за компензацију хидрауличног удара (приказан на слици 1) служи за смањење хидрауличног удара, односно смањења притиска у муљоводу.

III. НОВИ ПУМПНИ СИСТЕМ

Због технолошких потреба, дошло је до промјене конфигурације постојећег система, па се одлагање муља врши на мјесту старог површинског копа. Удаљеност новог мјеста одлагања од пумпне станице је 3000 m, док висинска разлика између осе излазне цијеви пумпе и осе цијеви на акумулационом језеру износи 2,67 m (слика 2). Пошто је дошло до промјене технолошког процеса, искориштена је прилика да се инсталише нови асинхрони мотор мање снаге са фреквентном регулацијом чиме би се

уједно извршило побољшање енергетске ефикасности читавог постројења.



Сл. 2. Шема новог пумпног система и муљовода

За пројектовање новог пумпног система, потребно је прво израчунати губитке новог муљовода и одредити радну криву новог система [3].

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 $D=700mm$ и протока $Q=2500m^3/h=0,6944m^3/s$ се рачунају на основу [2]:

$$H_l = L \cdot i \quad (3)$$

Гдје су L дужина цјевовода, 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 цјевоводу износе:

$$H_l = L \cdot i = 3000 \cdot 0,0061 = 18,3m \quad (5)$$

Потребан напор (манометарска висина дизања) муљне пумпе износи:

$$H_m = H_g + H_l + \Delta p = -3,33 + 18,3 + 5 = 19,97m \quad (6)$$

гдје је Δp општи напор пумпе.

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 $Q=2500 \text{ m}^3/h$ или $0,6944 \text{ m}^3/s$, напор $Y=196 \text{ J/kg}$ и максималну густину муља $\gamma_{\text{муљ}}=1060 \text{ kg/m}^3$ потребан је електромотор снаге:

$$N = 1,05 \cdot \frac{Q \cdot Y \cdot \gamma_{\text{муљ}}}{1000 \cdot \eta} = 1,05 \cdot \frac{0,6944 \cdot 196 \cdot 1060}{1000 \cdot 0,65} = 233 \text{ kW} \quad (7)$$

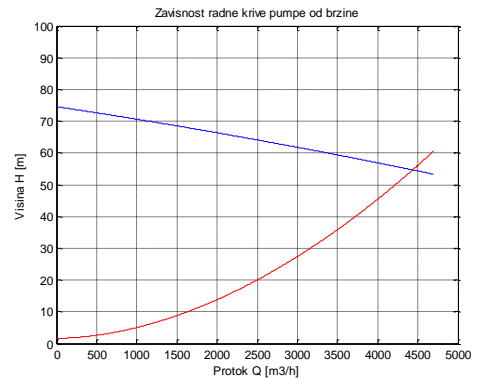
гдје је η степен искоришћења пумпе.

Због могућих нових потреба препумпавања муља на стару локацију, усваја се мотор снаге 500 kW и 500 ob/min чије карактеристике на основу [4] одговарају потребама старог система.

На основу радног дијаграма из [5] и коришћењем функције *polyfit* програмског пакета *Matlab* добијамо функцију која описује висину дизања пумпе у зависности од протока, односно:

$$H = -2,014 - 12,259Q + 79,285Q^2 \quad (8)$$

Радна крива пумпе означена плавом бојом и крива система (црвеном бојом) 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 новим радним системом пресјек криве система и пумпе при $4500 \text{ m}^3/s$ и да је потребна мања брзина обртања пумпе у односу на постојећи систем.

IV. ПРОРАЧУН ОПСЕГА ПОТРЕБНЕ БРЗИНЕ

Да бисмо одредили оптималну брзину конкретне пумпе за различите радне режиме, што је кључно за побољшање енергетске ефикасности, потребно је да одредимо зависности радних величина пумпе, односно протока Q , висине дизања пумпе (напора пумпе) H , и снаге пумпе P од промјене брзине.

$$Q \sim n \quad (9)$$

$$H \sim n^2 \quad (10)$$

$$P \sim n^3 \quad (11)$$

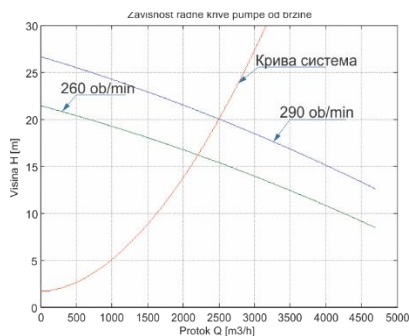
Посматраћемо два карактеристична радна режима пумпе. Пумпа је у 2014. години радила око 4800 радних часова. Од тога је 4100 радних часова радила при стандардном режиму рада постројења (доток муља

$Q=2500\text{m}^3/\text{h}=0,6944\text{m}^3/\text{s}$, а 700 радних часова је радила при режиму филтрације постројења (доток муља $Q=2200\text{m}^3/\text{h}=0,6111\text{m}^3/\text{s}$). На основу једначина (2) до (6) и једначина (9) и (10) подаци за ове протоке приказани су у Табели 1.

TABELA 1. ОПТИМАЛНИ ПОДАЦИ ПУМПНОГ СИСТЕМА ЗА РАЗЛИЧИТЕ ПРОТОКЕ

	H_g [m]	i	H_t [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	14,45	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 следеће снаге:

$$\left. \begin{array}{l} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{290} \sim n_{290}^3 \end{array} \right\} = \frac{500 \cdot 10^3 \sim 500^3}{P_{290} \sim 290^3} \Rightarrow P_{290} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{290}{500} \right)^3 = 97,5 \text{ kW} \quad (12)$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{260} \sim n_{260}^3 \end{array} \right\} = \frac{500 \cdot 10^3 \sim 500^3}{P_{260} \sim 260^3} \Rightarrow P_{260} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{260}{500} \right)^3 = 70,3 \text{ kW} \quad (13)$$

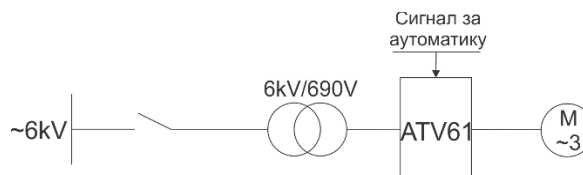
На бази једначине (8) хидрауличне снаге за протоке и одговарајуће висине $(Q;H)=(2500; 19,96)$, $(Q;H)=(2200; 16,12)$ су респективно:

$$P_{hid1} = \gamma_{\text{муља}} g H_1 Q_1 = 1060 \cdot 9,81 \cdot 19,96 \cdot 0,6944 = 144 \text{ kW} \quad (14)$$

$$P_{hid2} = \gamma_{\text{муља}} g H_2 Q_2 = 1060 \cdot 9,81 \cdot 16,12 \cdot 0,6111 = 102,4 \text{ kW} \quad (15)$$

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, очекује се да због старости пумпе, односно лошијег стања радног кола и кућишта пумпе, регулација вентилом ће се вршити врло мало или уопште неће бити потребна.

За нови електромоторни погон одабрана је следећа опрема: суви трансформатор *Schneider Electric „Trihal“* 6 kV/690 V 850 kVA, фреквентни регулатор *Schneider Electric Altivar 61* и асинхрони електромотор *АТБ Север* 500 kW и 496 ob/min. Трансформатор се напаја из већ постојеће СН ћелије. 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 мјерне сонде која се налази на дну пријемног базена. Шема цјелокупног система приказана је на слици 5.

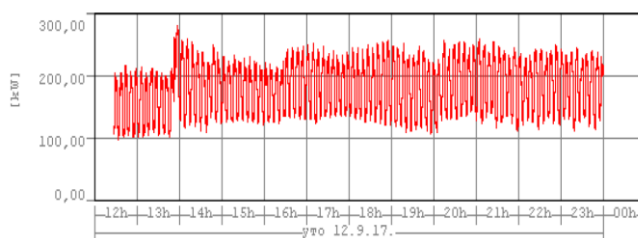


Сл. 5. Шема електромоторног погона

V. ИЗМЈЕРЕНЕ РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОГОНА

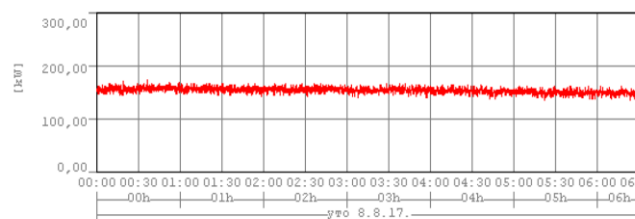
Након инсталације и подешавања погона, измјерене су стварно добијене карактеристике погона. Мјерење електричних величина је вршено на 6 kV страни помоћу мрежног анализатора *Janitza UMG604*. Извршено је више дуготрајних мјерења у току различитих циклуса производње, односно током пумпања и током филтрације.

Мјерењем је утврђено да електромоторни погон пумпе из мреже узима снагу од око $P_{280} = 180 \text{ kW}$, при брзини од око 280 ob/min и протоку од 2500 m³/h. На слици 6 је приказан дијаграм утрошене активне снаге за посматрани период.



Сл. 6. Дијаграм потрошње активне снаге у процесу пумпања

У режиму филтрације погона, односно при протоку 2200 m³/h, погон троши око $P_{250} = 160 \text{ kW}$ при брзини 250 ob/min. На слици 7 приказан је дијаграм гдје се види потрошња у филтрацији.



Сл. 7. Дијаграм потрошње активне снаге у процесу филтрације

Током рада постројења сви пригушни вентили су били отворени, односно није било потребно вршење пригушења.

При томе је висина муљног стуба у пријемном базену била око 5 метара, тј. електромоторни погон је омогућио фину регулацију нивоа базена. На овај начин нису настајали скокови и пропади нивоа муља у пријемном базену, јер није било великих и изненадних промјена брзина обртања пумпе.

VI. ОЧЕКИВАНЕ И РЕАЛНЕ УШТЕДЕ

Са новим системом очекивале су се велике уштеде у потрошњи електричне енергије као и једноставнија експлоатација. Као прво, замјеном синхроног мотора 1250 kW, који је при константној брзини 500 об/мин из мреже узимао снагу $P_{500}^{SM} = 1000kW$, новим асинхроним од 500 kW остварено је једноставније и јефтиније одржавање. Даље, коришћењем регулације брзине мотора са фреквентним регулатором, очекивано је да мотор из мреже узима око 100 kW, односно 70 kW. Са електротехничке стране добре особине регулацијом брзине фреквентним регулатором су „мекан“ старт (полазна струја је $1,5I_n$), а и 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.

Кориштен је нисконапонски систем (трансформатор 6kV/690 V, фреквентни регулатор, мотор) који је мање инвестиције у односу на средњенапонски систем (цијена НН система је око 135000 ВАН, а цијена СН система је око 180000 ВАН).

Очекиване уштеде у електричној енергији у два нова радна режима, у односу на претходни режим рада са синхроним мотором су:

$$\Delta P_{290} = P_{500}^{SM} - P_{290} = 1000 - 97,5 = 902,5kW \quad (16)$$

$$\Delta P_{260} = P_{500}^{SM} - P_{260} = 1000 - 70,3 = 929,7kW \quad (17)$$

Како пумпа током године ради са протоком $Q=2500m^3/h$ око 4100 часова и са протоком $Q=2200m^3/h$ око 700 часова, а цијена за потрошену електричну енергију је 0,065 ВАН/kWh, имамо да су уштеде електричне енергије промјеном брзине за ова два режима:

$$C_{e1} = \Delta P_{290} \cdot c_e \cdot T_1 = 902,5 \cdot 0,065 \cdot 4100 = 240.516ВАН \quad (18)$$

$$C_{e2} = \Delta P_{260} \cdot c_e \cdot T_2 = 929,7 \cdot 0,065 \cdot 700 = 42.301ВАН \quad (19)$$

Укупна уштеда у електричној енергији и одржавању при регулацији брзине пумпе фреквентним регулатором је:

$$C_e^{укупно} = C_{e1} + C_{e2} = 240516 + 42301 = 282817ВАН \quad (20)$$

Из (20) видимо да су укупне очекиване уштеде у електричној енергији око 283.000 ВАН на годишњем нивоу, добијене рачунским путем.

Реалне уштеде на основу извршених мјерења су међутим другачије:

$$\Delta P_{280} = P_{500}^{SM} - P_{280} = 1000 - 180 = 820kW \quad (21)$$

$$\Delta P_{250} = P_{500}^{SM} - P_{250} = 1000 - 160 = 840kW \quad (22)$$

$$C_{e1} = \Delta P_{280} \cdot c_e \cdot T_1 = 820 \cdot 0,065 \cdot 4100 = 218.530ВАН \quad (23)$$

$$C_{e1} = \Delta P_{250} \cdot c_e \cdot T_1 = 840 \cdot 0,065 \cdot 700 = 38.220ВАН \quad (24)$$

Из (21) и (20) укупна реална уштеда је око 257.000 ВАН. Разлика у очекиваној и реалној уштеди је 26.000 ВАН, односно око 10%.

На основу спроведене анализе, одступање око 10% у оствареној ефикасности је очекивано и прихватљиво, јер у њој нису уважени губици у сувом трансформатору и инвертору, као и додатни губици у пумпи који су настали због промјене радних режима.

VII. 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. Такође, упоредили смо очекиване радне карактеристике електромоторног погона пумпе добијене рачунским путем са измјереним вриједностима у конкретно реализованом погону.

Показали смо да израчунате карактеристике рада пумпног постројења (брзина обртања за одређени проток) одговарају експлоатационим карактеристикама и дају значајно побољшање ефикасности, повећавање робусности система, те лакше управљање и одржавање.

Међутим, очекивана потрошња електричне енергије, добијена прорачунима у фази пројектовања, је за око 10% мања од измјерених вриједности за оба радна режима због занемарења која су начињена у фази идејног пројектовања (губитке у сувом трансформатору и инвертору, који на основу спецификација Schneider Electric-а укупно износе око 30kW, те промијењеној ефикасности пумпе због промјене радне тачке). Самим тим, и уштеде у електричној енергији су мање од очекиваних. Ипак, разлика очекиваних и реалних уштеда је толика да се не доводи у питање исплативост самог пројекта и инвестиције која ће се отплатити у врло кратком року. Осим тога, у фази пројектовања очекивало се да ће бити потребно вршити додатну регулацију протока вентилима, али у експлоатацији се показало да за тиме нема потребе, што додатно смањује трошкове одржавања и увећава робусност и ефикасност новог система.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Muhammad H Al-Khalifah and Gregory K. McMillan, "Control valve versus variable speed drive for flow control," Presented at ISA Automation Week 2012.
- [2] Раденко Марјановић, „Моделовање и анализа рада високонапонског синхроног мотора у погону помпне станице,“ Електротехнички факултет Бања Лука, 2013.
- [3] Допунски рударски пројекат – Пројект депоније муља, Приједор, 2014.
- [4] Раденко Марјановић, „Побољшање енергетске ефикасности у пумпном постројењу коришћењем фреквентног регулатора,“ ЕНЕФ Бања Лука, 2013.
- [5] Technical and accompanying document for 4000/71&4000/71a, USSR, 1982.

ABSTRACT

This paper presents a study of improving energy efficiency in the pumping plant inside mine using regulated drives with the frequency converter. The aim was to compare the calculation results of the expected projected mode and efficiency, with measured of working values and efficiency of the plant in exploitive.

ANALYSIS OF THE ACHIEVED INCREASE IN THE ENERGY EFFICIENCY OF THE PUMPS PLANT WITH FREQUENCY REGULATION

Radenko Marjanović, Petar Matić

OPTIMALNO UPRAVLJANJE ASINHRONOM MAŠINOM U POGONU ELEKTRIČNIH VOZILA

Vladimir Popović, Miloš Kukić, Đura Oros, Roberto Varga, Darko Marčetić, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*

Sadržaj – U ovom radu je predstavljena optimalna strategija upravljanja asinhronom mašinom, AM, u pogonu električnih vozila u celokupnom opsegu brzina i momenata mašine. Strategija je definisana na osnovu dva kriterijuma – minimizacije gubitaka u pogonu i maksimalnog iskorišćenja strujnih kapaciteta za dobijanje obrtnog momenta mašine. Strategija u potpunosti zadovoljava uslove koje nameće konkretna primena pogona za električna vozila i automobile. Opisana je način za minimizaciju gubitaka AM upotrebom kontrolera zasnovanog na modelu gubitaka AM kao primarnog kriterijuma za optimalnost u stacionarnom stanju pogona. Kao kriterijum optimalnosti pogona u dinamičkim režimima, predstavljen je kriterijum dobijanja maksimalnog momenta mašine za raspoloživi vektor struje statora, koji stavlja u prvi plan dinamičke karakteristike pogona kojim se upravlja.

Ključne reči—asinhrona mašina, MTPA, energetska efikasnost;

1. UVOD

Elektromotorni pogoni predstavljaju najznačajnije potrošače električne energije u svetu. Procenjuje se da oko 60% ukupne energije u svetu zahtevaju sami elektromotorni pogoni. Uvođenjem energetski efikasnijih elektromotornih pogona kao i pažljivom konstrukcijom električnih mašina (odabir materijala i tehnoloških postupaka u fazi proizvodnje), može se smanjiti potrošnja električne energije kako u pogonskim uslovima tako i samoj fazi proizvodnje mašine. Asinhroni motori predstavljaju potrošače 50% ukupne proizvedene električne energije i čak 90% električne energije svih elektromotornih pogona u svetu. Zbog toga je izuzetno važno da se postigne energetski efikasno upravljanje asinhronim motorima, [1].

Asinhroni motori se danas masovno koriste i unutar sopstvenih mreža: u sistemima besprekidnih napajanja, sistemima za transport, plovila, električnih vozila itd. U tim aplikacijama se od AM zahteva brza regulacija momenta, energetska efikasnost itd. AM se u električnim vozilima napajaju iz baterija ograničenog kapaciteta. Stoga, neophodno je primeniti energetski efikasno upravljanje AM, kako bi radni vek baterija bio što duži. Sa druge strane, prilikom tranzijentnih procesa se zahteva da vozilo dostigne željenu brzinu i/ili pogonski momenat u najkraćem mogućem roku i tada se strategija upravljanja AM prvenstveno zasniva na dobijanju kvalitetnih dinamičkih performansi, dok energetska efikasnost pada u drugi plan. Aspekt efikasnosti pogona dobija na značaju prilikom ulaska pogona u stacionarni režim rada.

Postoje dva osnovna pristupa u okviru aspekta energetske efikasnosti upravljanja. Prvi je metod zasnovan na tehnici traženja energetskog optimuma, tzv. SC metod (eng. *Search Control* metod), [2-4]. Algoritmi pretrage pronalaze optimalnu vrednost fluksa, odnosno struje magnećenja na osnovu izmerene vrednosti ulazne snage. Brojna literatura se bavi ovim pitanjem i navedena je u [4]. Drugi pristup predstavlja upotrebu kontrolera zasnovanog na

modelu gubitaka mašine, LMC metod, (eng. *Loss Model Control method*), koji predstavlja matematičku metodu kojom se eksperimentalno dobijaju optimalne karakteristike struje i fluksa, jedinstvene za određeni motor, [5-10]. Parametri unutar samog kontrolera (npr. otpornosti, induktivnosti mašine...) se uobičajeno smatraju konstantnim, međutim ukoliko se uzmu obzir i njihove promene efikasnost i praktičnost ove metode se značajno povećava. Tako se umesto suboptimalne kontrole dobijaju prave optimalne karakteristike pogona, [10].

Prednosti SC metoda u odnosu na pristup zasnovan na LMC-u se ogledaju u činjenici da one ne zavise od tačnosti poznavanja parametara pogona. Sa druge strane, LMC pristup daje brži odziv a njegova složenost se može značajno umanjiti uproščavanjem modela uz dodatne korekzione mehanizme [4]. Pokazuje se da posmatrana uprošćenja ne utiču značajno na degradaciju optimalnosti algoritma i pomeranje radne tačke iz optimalne te je ovaj pristup uglavnom i eksploatisan u praksi.

U ovom radu su obrađene dve optimalne strategije upravljanja pogonom: strategija upravljanja motorom tokom prelaznih procesa kada je potrebno da mašina razvije maksimalan momenat za raspoložive kapacitete struje (poglavlje 3), kao i strategija za rad mašine sa minimalnim gubicima, odnosno energetski efikasno upravljanje (poglavlje 4). Model gubitaka AM na kome će se zasnivati LMC je pre svega razmotren u poglavlju 2. Predstavljena je i ekvivalentna šema AM sa izvesnim uprošćenjima koja će uz koncept vektorske kontrole implementirane u pogonu biti podloga za konstrukciju optimalne strategije u pogonu. Korišćen pristup za minimizaciju gubitaka biće zasnovan isključivo na LMC metodi koja će biti obrađena u ovom radu.

2. ENERGETSKI BILANS ASINHRONE MAŠINE

Ukupni gubici u AM, P_{uk} , se sastoje od gubitaka u bakru statora i rotora, P_{cu} , gubitaka u feromagnetnom jezgru usled postojanja promenljivog magnetisanja kola, P_{Fe} , i mehaničkih gubitaka, P_{meh} , usled trenja obrtnih delova mašine i ventilacije.

$$P_{uk} = P_{cu} + P_{Fe} + P_{meh} \quad (1)$$

U stacionarnom stanju, gubici u bakru statora i rotora usled postojanja odgovarajućih struja kroz namotaje su:

$$P_{cu} = R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r(i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \quad (2)$$

gde su sa R_s i R_r označeni otpornosti namotaja statora i rotora. Komponente struje statora i rotora po d i q osi mašine su respektivno, i_{ds} i i_{qs} za stator i i_{dr} i i_{qr} za rotor.

Gubici u feromagnetnom jezgru nastaju usled efekata histerezisa i vrtložnih struja pri naizmeničnom magnetisanju u magnetnom kolu:

$$P_{Fe} = k_h \omega \psi_m^2 + k_{vs} \omega^2 \psi_m^2 \quad (3)$$

gde su k_h i k_{vs} koeficijenti gubitaka histerezisa i vrtložnih struja, respektivno. Ovi gubici zavise od nivoa magnetnog fluksa u mašini ψ_m i frekvencije napajanja ω .

Mehanički gubici zavise od brzine obrtanja rotora i mogu se u dobroj aproksimaciji svesti na sledeći oblik:

$$P_m = k_m \omega_r^2 \quad (4)$$

gde je k_m koeficijent mehaničkih gubitaka.

Prve dve vrste gubitaka, gubici u bakru i gvožđu, predstavljaju kontrolabilne gubitke, iz razloga što se na iste može uticati odgovarajući utiskivanjem vektora struje statora AM, [3]. Treća vrsta gubitaka, mehanički gubici, nisu kontrolabilni i neće se nadalje razmatrati.

Gubici u gvožđu opisani sa (3) pokazuju izrazito nelinearnu zavisnost od frekvencije i magnetne indukcije. U opsegu malih i srednjih brzina ovi gubici su zanemarivi u odnosu na gubitke u bakru. To je naročito slučaj prilikom razmatranja mašina sa dugim rotorom gde se konstrukcijom same mašine postižu značajni obrtni momenti uz redukciju indukcije a samim tim i smanjenje gubitaka u gvožđu. U konkretnoj aplikaciji za električne automobile prethodna svojstva su uzeta u obzir, stoga je smisleno gubitke u gvožđu zanemariti.

Model gubitaka AM će biti predstavljen u konstelaciji sa algoritmom vektorske kontrole, što je značajno u slučaju da se žele postići superiorne dinamičke karakteristike pogona.

Ukoliko je implementirana vektorska kontrola AM, postiže se nezavisna kontrola momenta i fluksa AM. Sledeći skup jednačina je u tom slučaju validan:

$$i_{dr} = 0; i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs}; \psi_{rd} = L_m i_{ds}; \quad (6)$$

Iskorištavanjem (6) i uvrštavajući iste u relacije za gubitke, (2) i (5) dobija se:

$$P_{cu} = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^2 \quad (7)$$

Ukupni kontrolabilni gubici se mogu izraziti kao:

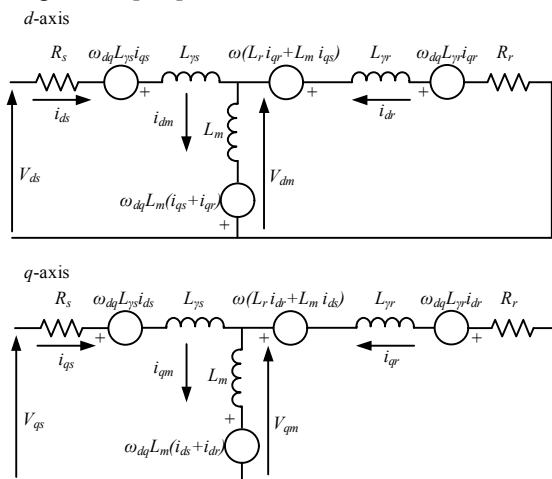
$$P_{gubkon} = R_d i_{ds}^2 + R_q i_{qs}^2 \quad (8)$$

gde su

$$R_d = R_s \quad (9)$$

$$R_q = R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \quad (10)$$

Model opisan sa (8–10) pokazuje da se kontrolabilni gubici mogu izraziti kao funkcija upravljačkih komponenti u vektorskom pogonu, komponentama struja statora po d i q osi. Kontrolisanjem istog vektora, gubici se mogu menjati i konačno, može se dobiti optimalan pogon koji poseduje minimalne gubitke, [6-8].



Sl. 1. Dinamička ekvivalentna šema asinhronne mašine u dq koordinatnom sistemu osa

Predstavljeni model gubitaka je izveden pod izvesnim uprošćenjima i zasnovan je na ekvivalentnoj šemi AM predstavljenoj na sl. 1, [5]. Ova aproksimacija podrazumeva da se aktivna komponenta struje grane magnetisanja koja pravi gubitke u gvožđu zanemaruje u okviru celokupne dinamike sistema. Zasnovanost ove aproksimacije, pored već ranije navedenih činjenica koji joj idu u prilog, u okviru traženja optimalnosti u pogonu, minimizacije gubitaka ili maksimalnog iskorišćenja momenta, se može pravdati, činjenicom da je kriva u okolini optimalne tačke ravna i široka bez obzira na upotrebljen tip mašine, [4]. Stoga se predstavljena aproksimacija može prihvatiti jer se iskorišćenje u pogonu neće značajno promeniti.

Razmatrani model gubitaka, (8–10), biće iskorišćen za već pomenute potrebe traženja optimalnosti tačke pogona za minimizaciju gubitaka AM.

Za potrebe implementacije algoritma maksimalnog iskorišćenja kapaciteta pogonskog momenta pogona biće korišćena relacija za elektromagnetni momenat u zavisnosti od komponenti struja statora po d i q osi mašine:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{ds} i_{qs} = K_t i_{ds} i_{qs} \quad (11)$$

gde je sa K_t definisano pojačanje momenta pogona:

$$K_t = \frac{3}{2} p \frac{L_m^2}{L_r} \quad (12)$$

Ova relacija podrazumeva da je implementirana vektorska kontrola u pogonu kao i da je uticaj efekta gubitaka u gvožđu na degradaciju elektromagnetnog momenta zanemariv.

Relacija opisana sa (11) i (12) uz model gubitaka, (8–10) predstavlja polaznu osnovu u postupku traženja optimalnog algoritma za upravljanje AM u pogonu električnog vozila.

3. OPTIMALNI ALGORITAM UPRAVLJANJA U POGONU AM U ELEKTRIČNOM VOZILU

Kao što je već i diskutovano, optimalni algoritam za upravljanje pogonom AM u aplikaciji električne vuče i transporta mora da obuhvati potrebu za minimizaciju gubitaka kao i maksimizaciju kapaciteta obrtnog momenta za savladavanje otpornih sila u toj aplikaciji.

Energetska efikasnost i maksimizacija stepena iskorišćenja u pogonu predstavlja primarni zadatak koga je potrebno ostvariti u stacionarnom stanju pogona, tj. kada se električno vozilo kreće ustaljenom brzinom.

Prilikom tranzijentnih režima pogona, neophodno je ostvariti što brže uspostavljanje momenta i njegovo maksimalno iskorišćenje pri postojećim strujnim i naponskim kapacitetima pogona. U slučaju kretanja pogona na velikim usponima potrebno je ostvariti maksimalan obrtni momenat za dati vektor struje da bi se savladao otporni momenat usled gravitacione sile koja se suprotstavlja pogonskom momentu. Prilikom preticanja i obilaženja pogona vozila, neophodno je ostvariti velike brzine i momenat za efikasno manevarisanje. Usled ograničenih strujnih i naponskih mogućnosti pogona, neophodno je za potreban pogonski momenat ostvariti minimalan intenzitet vektora struje statora kako bi se ovi kapaciteti rasteretili i kako bi se omogućila šira margina za dobijanje obrtnog momenta pogona.

U nastavku će biti analizirana svaka od pojedinačnih strategija i biće izvedeni odgovarajući analitički obrasci koji definišu optimalne kriterijume u tim pojedinačnim slučajevima. Pokazaće se da je moguće ostvariti univerzalan

algoritam upravljanja koji se lako može realizovati u okviru upravljačkog sistema od interesa. Dobiće se odgovarajuća skalarna relacija koja će važiti i u slučaju kada se razmatraju promene parametara od interesa. U zavisnosti od režima rada pogona pojedini faktori skaliranja u odgovarajućoj relaciji će korigovati optimalan odnos strujnih komponenti ili neće biti uzeti u razmatranje. Kao glavni parametar koji je potrebno adaptirati u okviru optimalnog algoritma kontrole AM pogona biće induktivnost magnetisanja.

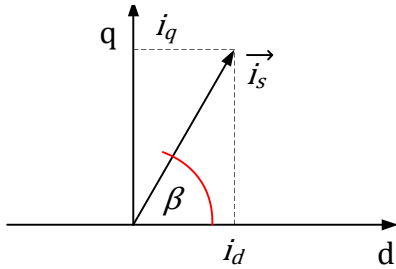
3.1. Algoritam ostvarenja maksimalnog momenta za datu amplitudu struje statora – MTPA strategija

Algoritam ostvarenja maksimalnog momenta za datu amplitudu struje statora AM, tzv. MTPA algoritam (eng. *Maximum Torque per Ampere*) predstavlja optimalnu strategiju upravljanja pogona električnog vozila u slučaju kretanja pogona po velikim usponima gde je potrebno obezbediti što više obrtnog momenta za savladavanje gravitacione sile koja se suprotstavlja kretanju vozila.

MTPA daje maksimum momenta za konstantnu vrednost amplitude struje statora tako što podešava ugao strujnog vektora relativno u odnosu na d osu mašine, ugao β . Dakle rešenje se dobija izjednačavanjem prvog izvoda momenta mašine po uglu struje statora β sa nulom.

$$\frac{dm_{el}}{d\beta} = 0 \quad (13)$$

Sa sl. 2 se vidi da je potrebno promenom ugla vektora struje statora za istu amplitudu dobiti što veću vrednost momenta.



Sl. 2. Optimalna pozicija vektora struje statora relativno u odnosu na d osu mašine za ostvarenje MTPA algoritma

Ukoliko se u početnoj aproksimaciji smatra da je kritičan parametar, induktivnost magnećenja L_m konstantan parametar, može se lako pokazati da se dobija da je optimalan ugao strujnog vektora:

$$\beta_{MTPA} = 45^\circ \quad (14)$$

Optimalne komponente struje statora na osnovu sl. 2 su stoga:

$$i_{dSMTPA} = i_s \cdot \cos \beta_{MTPA} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_s \quad (15)$$

$$i_{qSMTPA} = i_s \cdot \sin \beta_{MTPA} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_s \quad (16)$$

Jasno je stoga da je optimalan odnos struja:

$$MTPA: \frac{i_{ds}}{i_{qs}} = 1 \quad (17)$$

Skalarna relacija opisana sa (17) je jednostavna i laka za implementaciju. Relacija definiše optimalan odnos komponenti struja statora da bi se dobio maksimalan momenat u pogonu, [9]. Međutim, relacija ima izvesno ograničenje u samom postupku izvođenja jer podrazumeva da je parametar induktivnosti magnećenja konstantan. Ovaj parametar se menja sa nivoom fluksa i zasićenosti magnetnog

kola. Stoga (17) daje suboptimalan odnos koji može da značajno degradira maksimalnu efikasnost u slučaju da se pogon značajno opteretiti. Sa porastom opterećenja povećava se referenca momenta i_{qs} , a zbog relacije optimalnosti $i_{ds} = i_{qs}$ dobijene u (17) komanda fluksa se povećava. Stvarna vrednost fluksa se u realnom slučaju neće ostvariti zbog efekta zasićenja magnetnog kola mašine pa optimalna tačka u pogonu neće biti ostvarena.

Za pronalaženje optimalne strategije MTPA potrebno je poznavati zavisnost induktivnosti magnećenja sa strujom, tj. $L_m = f(i_{ds})$. Pretpostaviće se da je ova zavisnost linearna i u oblasti zasićenja feromagnetnog jezgra izražena relacijom:

$$L_m = L'_m i_{ds} + L_{m0} \quad (18)$$

gde je L'_m inkrementalna induktivnost koja ima vrednost manju od nule a L_{m0} induktivnost

Relacija opisana sa (18) nagoveštava da se sa porastom struje magnetisanja i_{ds} , induktivnost magnećenja L_m opada (inkrementalna induktivnost L'_m je negativna).

Kasnije će na konkretnom primeru AM koja se ugrađuje u okviru pogona električnog vozila i koji je iskorišćen u svrhe testova pokazati da se u oblasti blagog zasićenja zavisnost opisana sa (18) potpuno konzistentna i zasnovana.

Međutim, ukoliko se uvaži promena međuinduktivnosti sa promenom d struje statora, (18), izraz za momenat, (11), postaje:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (L'_m i_{ds} + L_{m0}) i_{ds} i_{qs} \quad (19)$$

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \frac{1}{2} (L'_m i_s \cos \beta + L_{m0}) i_s^2 \sin 2\beta \quad (20)$$

Uz uvažavanje $L_m \gg L_{rr}$, može se smatrati da je $L_m \approx L_r$ i dobija se:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{1}{2} (L'_m i_s \cos \beta + L_{m0}) i_s^2 \sin 2\beta \quad (21)$$

Sada se izraz opisan sa (13), nakon sređivanja može svesti na polinom trećeg reda po $\cos \beta$:

$$3L'_m i_s \cos^3 \beta + 2L_{m0} \cos^2 \beta - 2L'_m i_s \cos \beta - 2L_{m0} = 0 \quad (22)$$

Implementacija algoritma opisanog relacijom (22) je komplikovana za proračun na kontroleru. Potrebno je za parametre grane magnećenja pri svakoj vrednosti amplitude struje statora numerički rešiti jednačinu, pronaći inverznu vrednost kosinusa ugla β i na osnovu iste proračunati komponente struje statora koje definišu optimalni kriterijum MTPA, (15) i (16). Praktičan prilaz podrazumeva definisanje *look-up* tabele kojom se automatski može izračunati optimalne struje. Pokazaće se da postoji optimalna relacija izražena u drugačijem obliku koja takođe definiše optimalnost po MTPA a koja je numerički pogodnija za implementaciju. Ona će biti izvedena iz modifikovanog kriterijuma koji će se po smislu optimalnog odnosa pokazati identičnim kao i za MTPA.

3.2. Algoritam ostvarenja minimalne amplitude struje statora za dati momenat – MAPT strategija

Algoritam ostvarenja minimalne amplitude struje za datu referencu momenta AM, tzv. MAPT algoritam (eng. *Minimum Ampere per Torque*) predstavlja optimalnu strategiju upravljanja pogona električnog vozila u slučaju kretanja pogona pri velikim brzinama kada je potrebno uspostaviti značajan obrtni momenat. U tom slučaju se proširuje margina napona i struje mašine, a time i obrtnog momenta za efikasnije manevrisanje. Biće pokazano da se

ova metoda poklapa sa MTPA strategijom u smislu dobijanja optimalnog odnosa upravljačkih komponenti u pogonu, komponenti struja statora. Osnovna razlika između opisanih strategija se ogleda u tome da li je komanda iz nadređenog sistema unutar kontrolera referenca momenta ili amplituda struje. Ukoliko je to momenat, onda se teži dobijanju MAPT, u suprotnom ukoliko je izlaz iz nadređenog regulatora struja, MTPA se izvršava.

Do rešenja se dolazi pronalaskom minimuma sledeće težinske funkcije po dve upravljačke promenljive:

$$J(i_{ds}, i_{qs}) = i_s + \lambda_1(K_t i_{ds} i_{qs} - T_L) \quad (23)$$

gde je T_L momenat opterećenja a λ_1 Lagranžov koeficijent.

Težinska funkcija čiji se minimum po moment traži uključuje pored amplitude struje statora takođe i član koji uzima u obzir i ograničenje da se mora ostvariti momenat koji uravnotežava momenat opterećenja T_L .

Minimum funkcije se pronalazi izjednačavanjem prvog izvoda ove funkcije po momentu sa nulom:

$$\frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial m_e} = \frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial i_{xs}} \frac{1}{\frac{\partial m_e}{\partial i_{xs}}} = 0 \quad (24)$$

gde $x \in \{d, q\}$.

Lako se može pokazati da, u slučaju kada se induktivnost magnetisanja smatra konstantnom, je optimalni strujni odnos identičan kao i u slučaju MTPA strategije ukoliko se reši sistem (24) po odnosu komponenti struja statora. Praktično, MAPT pristup predstavlja drugačiju konstelaciju istog pristupa optimalnoj kontroli AM u tranzijentnom režimu.

$$MAPT : \frac{i_{ds}}{i_{qs}} = 1 \quad (25)$$

Ukoliko se uvaži zavisnost opisana sa (18) može se sistem (24) po odnosu struja rešiti i dobiti relacija:

$$MAPT : \frac{i_{ds}}{i_{qs}} = 1 \cdot \sqrt{1 + \frac{L'_m i_{ds}}{L'_m i_{ds} + L_{m0}}} \quad (26)$$

Množitelj u izrazu definiše korekciju odnosa optimalnih struja. Na osnovu (26) je jasno da u slučaju povećanja i_{ds} ovaj faktor se smanjuje i teži prema nuli smanjujući optimalni odnos struja. Ultimativno, iz izraza se vidi da u slučaju zasićenja odnos teži ka nuli što je i u intuitivnom smislu jasno, ne postoji promena struje i_{ds} sa i_{qs} usled nemogućnosti dobijanja promene fluksa. Naravno, izraz za optimalnost, (26) je uopštenje izraza (25) gde je prirodno ubačena i zavisnost usled promene induktivnosti sa nivoom zasićenja; ukoliko se posmatra linearno područje gde je $L'_m = 0$ izraz se transformiše u (25). Korekcionni faktor usled uvažavanja zasićenja pri aproksimaciji induktivnosti po (23) glasi:

$$k_L = \sqrt{1 + \frac{L'_m i_{ds}}{L'_m i_{ds} + L_{m0}}} \quad (27)$$

Izraz opisan sa (26) je pogodniji za implementaciju na kontroleru iako sam faktor k_L zavisi od struje i_{ds} koju treba proračunati. U nastavku se daje procedura koja služi za dobijanje optimalnih komponenti struja.

Sređivanjem (26) dobija se polinom trećeg reda koji direktno za rešenje daje komponentu struje i_{ds} za referencu momenta kao parametar i_{qs} .

$$L'_m i_{sd}^3 + L_{m0} i_{sd}^2 - 2L'_m i_{sq}^2 i_{sd} - L_{m0} i_{sq}^2 = 0 \quad (28)$$

Kako (28) predstavlja polinom trećeg stepena po i_{sd} moguće ga je rešiti numeričkim Njutn-Rapsonovim postupkom. Dodatna pogodnost primene ovog postupka je mogućnost izbora dobre početne aproksimacije $i_{sd0} \approx i_{sq}$. Ta činjenica favorizuje napred opisani numerički postupak pronalazjenja rešenja.

Za zadatu vrednost reference i_{sq} i početnu aproksimaciju $i_{sd0} \approx i_{sq}$ (28) postaje:

$$f_0(i_{sd0}) = L'_m i_{sd0}^3 + L_{m0} i_{sd0}^2 - 2L'_m i_{sq}^2 i_{sd0} - L_{m0} i_{sq}^2 = f_0 \quad (29)$$

Linearizacijom (29) oko radne tačke $(i_{sd0}, f_1(i_{sd0}))$, razvojem u Tejlorov red, dobija se:

$$f \approx f_0(i_{sd0}) + \frac{\partial f_1(i_{sd0})}{\partial i_{sd}} \Delta i_{sd1} = 3L'_m i_{sd0}^2 + 2L_{m0} i_{sd0} - 2L'_m i_{sq}^2 \quad (30)$$

Dalje se iz (30) proračuna korekcija Δi_{sd1} :

$$\Delta i_{sd1} = \frac{0 - f_0(i_{sd0})}{\frac{\partial f_1(i_{sd0})}{\partial i_{sd}}} \quad (31)$$

Tada nova vrednost i_{sd} postaje:

$$i_{sd1} = i_{sd0} + \Delta i_{sd1} \quad (32)$$

i dobija se nova funkcija:

$$f_1(i_{sd1}) = L'_m i_{sd1}^3 + L_{m0} i_{sd1}^2 - 2L'_m i_{sq}^2 i_{sd1} - L_{m0} i_{sq}^2 = f_1 \quad (33)$$

Ukoliko tačka $(i_{sd1}, f_1(i_{sd1}))$ zadovoljava uslove konvergencija, i_{sd1} se proglašava rešenjem (28), odnosno optimalnom vrednošću d struje statora za MAPT strategiju. Ukoliko to nije slučaj, postupak se nastavlja na isti način sve dok uslovi konvergencije ne budu ispunjeni. S obzirom da je početna aproksimacija bliska optimalnom rešenju, a Njutn Rapsonov postupak efikasno konvergira u slučaju polinomne jednačine višeg reda, do rešenja bi trebalo da se dođe u najviše 3 iteracije. Konvergencija rešenja stoga nije prikazana u radu.

3.2. Algoritam minimizacije gubitaka AM – optimalna kontrola u stacionarnom stanju pogona AM

Minimizacija gubitaka AM podrazumeva pronalazjenje optimalnih upravljačkih signala potrebnih za ostvarenje maksimalnog stepena efikasnosti pogona. Jedini ograničenje u tom slučaju predstavlja činjenica da momenat mašine mora da pokrije momenat opterećenja. Pošto se jedino može uticati na kontrolabilne gubitke u mašini u težinsku funkciju se upravo oni uvrštavaju:

$$J(i_{ds}, i_{qs}) = P_{gubkon} + \lambda_1(K_t i_{ds} i_{qs} - T_L) \quad (34)$$

Ovi gubici su po modelu gubitaka, (8–10) i izraženi u funkciji upravljačkih promenljivih, stoga se minimum težinske funkcije može lako pronaći diferenciranjem (34) po i_{ds} i i_{qs} i izjednačavanjem izraza sa nulom. Tako se dobija sistem:

$$\frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial i_{ds}} = 2R_d i_{ds} + \lambda_1 K_t i_{qs} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial i_{qs}} = 2R_q i_{qs} + \lambda_1 K_t i_{ds} = 0 \quad (36)$$

Nije teško pokazati da je rešenje sistema opisanog sa (35) i (36) daje optimalnu tačku:

$$(i_{ds}, i_{qs}) = \left(\left(\frac{R_q T_e^2}{R_d K_t^2} \right)^{\frac{1}{4}}, \left(\frac{R_d T_e^2}{R_q K_t^2} \right)^{\frac{1}{4}} \right) \quad (37)$$

Optimalni odnos se dobija iz relacije (37) i iznosi, [10]:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{\frac{R_q}{R_d}} = \sqrt{\frac{R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}}{R_s}} \quad (38)$$

Izraz opisan sa (38) pokazuje da je optimalni strujni odnos konstantan i definisan kao:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} = C \quad (39)$$

Za razliku od izraza za MTPA i MAPT ovaj odnos se razlikuje od 1 i zavisi od parametara omskih otpora namotaja i induktivnosti magnećenja i namotaja rotora. Bez obzira na to, može se uvideti sličnost optimalnih strategija, strujni odnos kod optimalnosti gubitaka je samo drugačiji u smislu drugačijeg faktora.

I u slučaju uzimanja efekta zasićenja nije teško pokazati da ukoliko se (18) ubaci u težinsku funkciju (34) (K_t zavisi od L_m) može se dobiti

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} k_L \quad (40)$$

Optimalno rešenje opisano u (40) se može dobiti na isti način kao i u slučaju MAPT pristupa, samo umesto i_{qs} se dodaje faktori C koji množe i_{qs} u (28). Postupak proračuna je analogan kao u slučaju MAPT.

$$L'_m i_{sd}^3 + L_{m0} i_{sd}^2 - 2L'_m (C i_{sq})^2 i_{sd} - L_{m0} (C i_{sq})^2 = 0 \quad (41)$$

4. UNIVERZALNA FORMULA I ALGORITAM ZA OPTIMALNU KONTROLU AM

U ovom poglavlju objedinjeni su na jednom mestu svi zaključci iz prethodnog poglavlja u jednu kompaktnu skalarnu formulu koja je jednostavna za implementaciju na modernom kontroleru. Analitička zavisnost obuhvata sve tri opisane klase optimalne kontrole, MTPA, MATP i LMC metod. Uzet je u obzir i efekat zasićenja u okviru formule:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = C k_L \quad (42)$$

gde su:

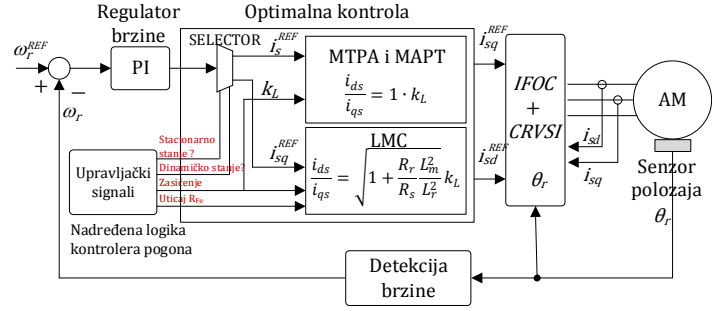
$$C = \begin{cases} 1 & \text{MTPA i MAPT} \\ \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} & \text{LMC} \end{cases} \quad (43)$$

$$k_L = \sqrt{1 + \frac{L'_m i_{ds}}{L'_m i_{ds} + L_{m0}}} \quad (44)$$

Korekcionni faktor opisan u (44) se bira na osnovu karakteristika same mašine, tj. na osnovu karakteristike magnećenja mašine. Njegovo uvažavanje/zanemarenje je pitanje karakteristika samog pogona i tolerancija koje nameće sama primena što nije diskutovano detaljnije.

Kompletan algoritam upravljanja predloženim pogonom zasnovanim na predloženoj univerzalnoj formuli je dat na

sl. 3:



Sl. 3 Kompletan algoritam upravljanja pogonom zasnovanog na predloženoj univerzalnoj formuli

5. GRAFIČKI PRIKAZ OPTIMALNIH ZAVISNOSTI U KORIŠĆENOM POGONA AM

Za potrebe lakšeg razumevanja izvedenih analitičkih zavisnosti u ovom poglavlju je data grafička predstava istih zavisnosti. Za detaljniju predstavu korišćeni su parametri pogona koji je iskorišćen upravo u aplikaciji električne vuče za koju je i predložen optimalni model opisan (42–44).

Pogon čiji su parametri iskorišćeni za potrebe dobijanja grafičke zavisnosti optimalnih odnosa je zasnovan na 4-polnoj asinhronoj mašini YDQ5_4 6730 nominalne izlazne snage 5kW, napona 48V i struje 90A. Pogon je predviđen za napajanje iz akumulatorske baterije preko DC-AC pretvarača za dobijanje odgovarajućeg naizmeničnog napona promenljive frekvencije i napona u okviru vektorskog pogona AM.

Na pređašnje opisanom pogonu izvršena i grafička predstava pojedinih zavisnosti od interesa. Za konkretne vrednosti pojedinih parametara modela AM dobijene se grafičke zavisnosti koje su u uskoj korespondenciji sa predstavljenoj analitikom u radu. Parametri samog modela se dobijeni iz oglada praznog hoda i kratkog spoja AM. Konačni rezultati ovih oglada su tabelarno prikazani u tabeli I.

Tabela I. Rešenja polinoma trećeg stepena po uglu β , d i q komponente struje statora i njihov odnos za traženi ugao

R_s [mΩ]	R_r [mΩ]	L_{mn} [mH]	L_{ys} [mH]	L_{yr} [mH]
4.45	5.45	0.98	0.03	0.03

U tabeli I su prikazani nominalni podaci za parametre ekvivalentne šeme. Za potrebe dobijanja optimalnih kriterijuma neophodno je dati zavisnost induktivnosti magnećenja od sistemskih veličina od interesa, struje magnećenja, $i_{ds} = I_m$.

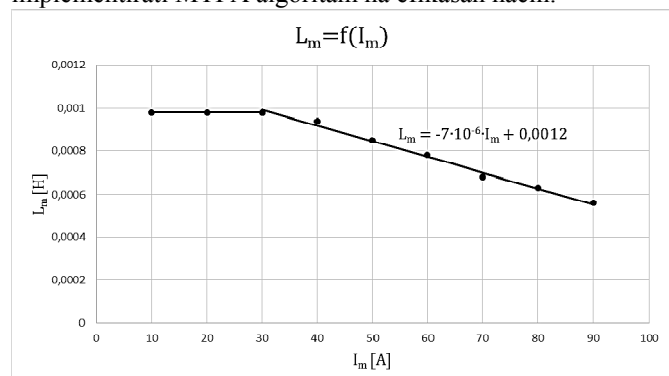
Na sl. 4 prikazana je induktorska karakteristika korišćene AM, zavisnost induktivnosti magnećenja od struje magnećenja. Vidi se da je u opsegu do 30A ova induktivnost konstantna. Iznad 30A mašina ulazi u blago zasićenje i vidi se sa sl. 4 da induktivnost opada približno linearno. Ovo ide u prilog razmatranjima opisanim (18). Na istoj slici je stoga i prikazana i broјčano ova zavisnost:

$$L_m = L'_m i_{ds} + L_{m0} = -7 \cdot 10^{-6} i_{ds} + 0.0012 \quad (45)$$

Na osnovu dobijenih parametara i zavisnosti u konkretno korišćenom pogonu može se doći do grafičkih zavisnosti zasnovanih na kriterijumu optimalnosti, (42–44).

U tabeli I predstavljene su optimalne komponente struje statora i_{sdMTPA} i i_{sqMTPA} kao i optimalni uglovi i njihov odnos za pojedine vrednosti amplitude struje statora i_s . Jasno

je uočljivo da pri malim vrednostima amplitude struje statora odnos je blizak 1 dok sa iste struje ovaj odnos se smanjuje usled efekta zasićenja. Vrednosti u tabeli II dobijeni su *off-line* procedurom, gde je za parametar i_s rešavana nelinearna (22). Korišćenjem *look-up* tabele moguće je stoga implementirati MTPA algoritam na efikasan način.

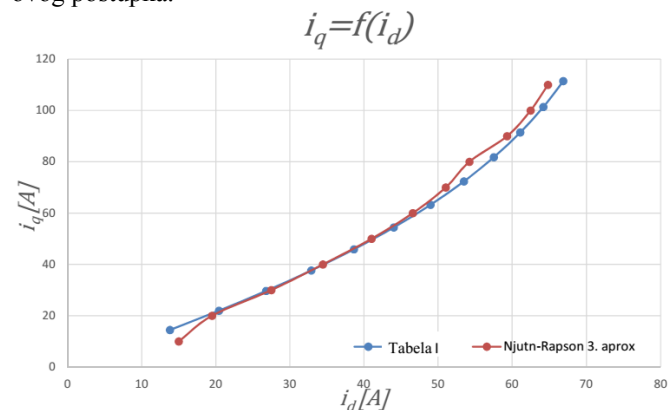


Sl. 4 Karakteristika magnećenja korišćene AM dobijene iz oglada praznog hoda AM

Tabela II. Rešenja polinoma trećeg stepena po uglu β , d i q komponente struje statora i njihov odnos za traženi ugao

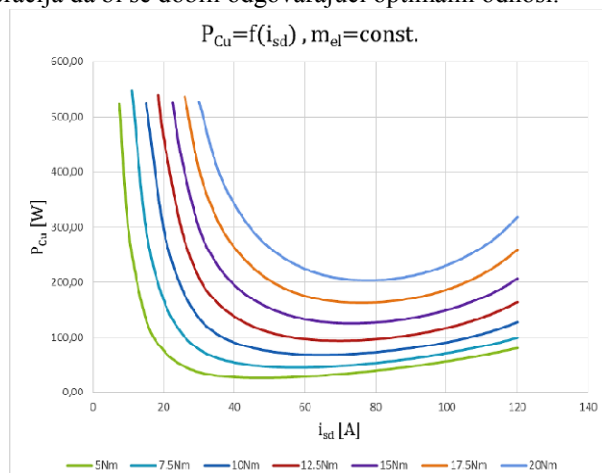
i_s [A]	$\cos(\beta_{MTPA})$	β_{MTPA} [°]	i_{sdMTPA} [A]	i_{sqMTPA} [A]	$\frac{i_{sdMTPA}}{i_{sqMTPA}}$
20	0,691	46,314	13,81	14,46	0,955
40	0,670	47,931	26,80	29,69	0,903
60	0,644	49,903	38,65	45,90	0,842
80	0,612	52,241	48,99	63,25	0,775
100	0,575	54,876	57,54	81,79	0,703
120	0,535	57,651	64,21	101,38	0,633
140	0,494	60,381	69,19	121,71	0,569
160	0,455	62,923	72,83	142,46	0,511
180	0,419	65,208	75,48	163,41	0,462
200	0,387	67,223	77,43	184,40	0,420
220	0,359	68,987	78,89	205,37	0,384

U MAPT poglavlju naglašeno je da se ista zavisnost optimalnih komponenti može i analitički dobiti čak i ako se uvaži efekat zasićenja. Dobijanje optimalnog odnosa opisanog sa (26) je dobijena rešavanjem (28) koja je zasnovana na Njutn-Rapsonovom iterativnom postupku. Na sl. 5 prikazana je zavisnost koja opisuje odnos komponenti struje statora dobijene rešavanjem (28) za pojedine vrednosti i_{qs} . Predstavljeni su rezultati dobijeni nakon druge iteracije ovog postupka.



Sl. 5 Poređenje optimalnih vrednosti d i q komponenti struje statora iz tabele II i dobijenih primenom Njutn-Rapsonovog iterativnog postupka

Na istoj slici je prikazana zavisnost dobijena za slučaj MTPA strategije, gde su tačke iz tabele II unesene. Može se uočiti zadovoljavajući nivo poklapanja tačaka između dva srodna pristupa. To daje eventualnu prednost i favorizuje upotrebu analitičkog pristupa jer je potreban mali broj iteracija da bi se dobili odgovarajući optimalni odnosi.



Sl. 6 Zavisnost gubitaka u bakru od d komponente struje statora za momente 5-20 Nm

U slučaju korišćenja LMC pristupa za određene vrednosti momenata u pogonu, iz (37) za optimalnu trajektoriju pogona je moguće izračunati optimalne komponente struje statora i gubitke u bakru. Na sl. 6 prikazane su zavisnosti gubitaka u bakru od upravljačke komponente fluksa mašine, i_{ds} . Sa sl. 6 se vidi da postoji minimum gubitaka za određenu vrednost d struje statora i da sa porastom momenta taj minimum je prisutan pri većim vrednostima i_{ds} .

U tabeli III prikazane su optimalne struje po d osi za različite vrednosti momenata AM po kriterijumu minimizacije gubitaka AM.

Tabela III. Optimalna vrednost i_{sd} za momente 5-20 Nm po kriterijumu optimizacije gubitaka AM

m_{el} [Nm]	i_{sdOPT} [A]
5	50
7,5	60
10	65
12,5	70
15	75
17,5	75
20	80

Na osnovu rezultata iz tabele III prikazani su optimalni odnosi strujnih komponenti.

Tabela IV. Optimalne vrednosti komponenti statorske struje i njihov odnos po kriterijumu optimizacije gubitaka AM

m_{el} [Nm]	i_{sdOPT} [A]	i_{sqOPT} [A]	i_{sdOPT}/i_{sqOPT}
0,5	15	11,04	1,36
1	25	18,37	1,36
2	30	22,05	1,36
2,5	35	25,66	1,35
5	50	40,51	1,23
7,5	60	55,34	1,08
10	65	71,42	0,91
12,5	70	87,14	0,80
15	75	102,86	0,73
17,5	75	120,01	0,62
20	80	135,9	0,59

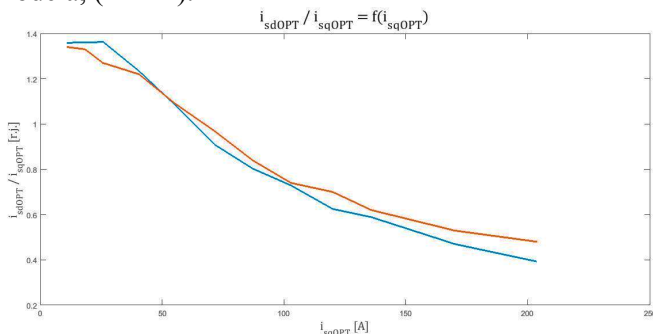
m_{el} [Nm]	i_{sdOPT} [A]	i_{sqOPT} [A]	i_{sdOPT}/i_{sqOPT}
25	80	169,88	0,47
30	80	203,86	0,39

Iz tabele IV se vidi da je za momente do 2Nm odnos d i q struja jednak:

$$C = \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} \approx 1.36 \quad (46)$$

dok za veće momente opada usled zasićenja magnetnog kola.

Da bi se pokazala zasnovanost modela kada je zasićenje uvaženo upoređeni su rezultati odnosa struja sa pristupom opisanim (44) koja daje analitičku zavisnost gde je uvažan i efekat zasićenja. Plava kriva na sl. 7 predstavlja optimalan odnos komponenti struja statora u zavisnosti od reference momenta, i_{qs} , preslikan iz tabele IV dok narandžasta kriva predstavlja istu zavisnost dobijenu putem Njutn-Rapsonovog iterativnog postupka koji rešava optimalni model. Poklapanje krivih implicira zasnovanost predloženog modela, (42–44).



Sl. 7 Odnos optimalnih vrednosti d i q komponenti struje statora

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena optimalna strategija upravljanja AM, u pogonu električnih vozila u celokupnom opsegu brzina i momenata mašine. Opisan je način za minimizaciju gubitaka AM upotrebom kontrolera zasnovanog na modelu gubitaka AM kao primarnog kriterijuma za optimalnost u stacionarnom stanju pogona. Prilikom tranzijentata u pogona, predstavljen je kriterijum dobijanja maksimalnog momenta mašine za raspoloživi vektor struje statora, koji stavlja u prvi plan dinamičke karakteristike pogona kojim se upravlja. Relevantne zavisnosti u vidu odnosa strujnih komponenti struja statora kojima se postižu optimalni kriterijumi su opisani za strategije MTPA, MATP i LMC-a. Pokazano je da se može na osnovu predstavljenih zavisnosti dobiti univerzalna skalarna analitička formula koja obuhvata i efekat zasićenja feromagnetog materijala. Predstavljen je numerički proračun preko koga se dobijaju vrednosti struja statora po d i q osi, za postizanje optimalnosti u pogonu.

7. LITERATURA

[1] M. Waheeda Beevi, A. Sukesh Kumar, H.S. Sibin, "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

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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/June 1985.
- [10] 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.

Abstract – In this paper the optimal strategy for controlling the induction machine drives in the application of electric vehicle is presented within whole speed region. Strategy is based on two criteria – criteria of obtaining minimum losses in IM drive and criteria for maximum torque capacity exploitation in the IM drive. Presented strategy completely satisfies the conditions which are demanded from considered application in electric vehicles. Approach based on loss model controller is described as a primary method for optimality in steady state condition of a drive. In dynamic state of a drive the primal and therefore the optimal criterion is suggested so as to obtain the maximization of torque capacity in drive concerning the available current and voltage constraints. Graphical approach based on the latter analytics is presented within the drive application of interest.

OPTIMAL CONTROL STRATEGY IN ELECTRIC VEHICLE BASED IM DRIVE IN WHOLE SPEED REGION

Vladimir Popovic, Milos Kukic, Djura Oros, Roberto Varga, Darko Marčetić

Математички модел високобрзинског синхроног мотора са перманентним магнетима са уваженим губицима у гвожђу

Петар Матић¹, Марко Гецић², Дарко Марчетић³, Владимир Поповић³, Ђура Орос³

¹Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, Бања Лука, Република Српска

²Torqueedo GmbH, Gilching, Germany

³Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Србија

petar.matic@etf.unibl.org, marko.gecic@torqueedo.com, darmar@uns.ac.rs, vladimir.popovic@uns.ac.rs, djura.oros@uns.ac.rs

Садржај—У раду је описан поступак извођења математичког модела синхроног мотора са унутрашње монтираним перманентним магнетима у коме су уважени губици у гвожђу. Рад садржи теоријску анализу процеса настајања губитака у гвожђу, модификацију стандардног модела, потребна упрошћења и критичку анализу, те опис практичног одређивања параметара модела. Верификација добијеног модела обављена је поређењем резултата рачунарске симулације и експериментално снимљених резултата. Наведене су неке могуће примјене модела у пракси: за алгоритме оптимизације енергетске ефикасности и за развој алгоритама неререгенеративног кочења.

Кључне ријечи—синхроне машине са перманентним магнетима, губици у гвожђу, енергетска ефикасност, неререгенеративно кочење

I. УВОД

Синхроне машине са унутрашње монтираним перманентним магнетима (енг. *Internal Permanent Magnet Synchronous Machines – IPMSM*) су у протеклих десетак година доживјеле велику експанзију у векторски управљаним погонима широке намјене, нпр. у кућним апаратима и погонима мале снаге [1]. Захваљујући унутрашње постављеним магнетима, оне обично раде на високом брзинама обртања (високобрзинске машине), па су малих габарита и ниске цијене. Поред наведеног, њихова предност у односу на остале врсте електричних машина је у томе што су веома енергетски ефикасне, јер се на ротору, на коме се налази перманентни магнет, не генеришу никакви губици. Код њих губици снаге постоје само на статору, и то у намотајима (тзв. губици у бакру) и у магнетном колу статора (тзв. губици у гвожђу).

При моделовању и анализи рада, као и при изради алгоритама за дигитално управљање IPMSM, губици у гвожђу се обично занемарују. Основни разлог за њихово занемаривање је чињеница да се они тешко моделују, док је други разлог што се процес електромеханичког претварања енергије може довољно тачно моделовати и без губитака у гвожђу [2]. Губитке у гвожђу је неопходно уважити у моделима за посебне примјене, као што су развој техника за увећавање ефикасности или техника за кочење мотора без регенерације енергије. У литератури

постоји више приступа за модификацију модела IPMSM тако да се уваже губици у гвожђу [3-6], али су најчешће редуковани и дати за устаљено стање.

У раду ће се прво дати детаљан поступак извођења општег модела IPMSM са уваженим губицима у гвожђу, затим образложити потребна упрошћења у циљу поједностављења модела, те описати методологија практичног одређивања одговарајућих параметара. У циљу верификације модела, упоредиће се резултати рачунарске симулације добијеног математичког модела са вриједностима измјереним у експерименту. На крају рада, описаће се двије могуће примјене добијеног модела у пракси: за развој техника за минимизацију губитака, и за развој техника за неререгенеративно кочење.

II. МОДЕЛ IPMSM БЕЗ ГУБИТАКА У ГВОЖЂУ

У литератури се модел електричног подсистема IPMSM без губитака у гвожђу даје сљедећим системом једначина [1, 2]:

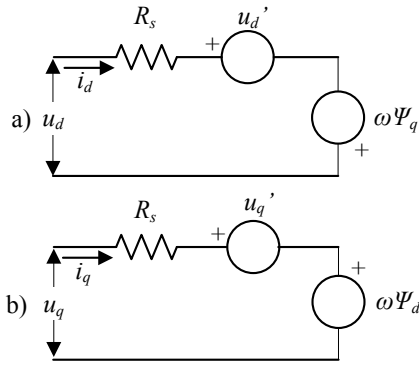
$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$m_e = \frac{3}{2} P (\Psi_{PM} i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}), \quad (3)$$

гдје су u_d , u_q , i_d , i_q , Ψ_d и Ψ_q напони, струје и флуksни обухвати по d и q оси, Ψ_{PM} флуksни обухват перманентног магнета на ротору, L_d и L_q синхроне реактансе статора, а P број пари полова. У овом моделу синхроно ротирајући координатни систем оријентисан је тако да се d оса поклапа са флуksном перманентног магнета. Одговарајућа еквивалентна шема за d и q осу је дата на Слици 1, гдје су транзијентне електромоторне силе:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_d \\ \dot{u}_q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (3)$$



Слика 1: Еквивалентна шема IPMSM по d и q оси без уважавања губитака у гвожђу

III. ГУБИЦИ У ГВОЖЂУ IPMSM

На ротору IPMSM налази се перманентни магнет који је у синхронизму са обртним пољем, па у његовом магнетном колу нема губитака. Због тога губици у гвожђу IPMSM постоје само у магнетном колу статора, гдје је флуks временски промјенљив. Флуksни обухват статора може се написати у облику:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{\gamma d} \\ \Psi_{\gamma q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{md} \\ \Psi_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{\gamma d} \\ \Psi_{\gamma q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{Fed} \\ \Psi_{Feq} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

гдје су $\Psi_{\gamma d}$ и $\Psi_{\gamma q}$ расипни флуksеви статора, Ψ_{md} и Ψ_{mq} флуksеви магнећења који представљају допринос струја статора заједничком флуksу, а Ψ_{PM} је флуks перманентног магнета. Расипни флуksеви се затварају ван магнетног кола, тако да губитке у гвожђу ствара само онај дио флуksа статора (Ψ_{Fed} и Ψ_{Feq}) који се затвара кроз његово магнетно коло:

$$\Psi_{Fes} = \sqrt{\Psi_{Fed}^2 + \Psi_{Feq}^2}. \quad (5)$$

Уз претпоставку да је магнетно коло незасићено, једначина (4) може се написати у облику:

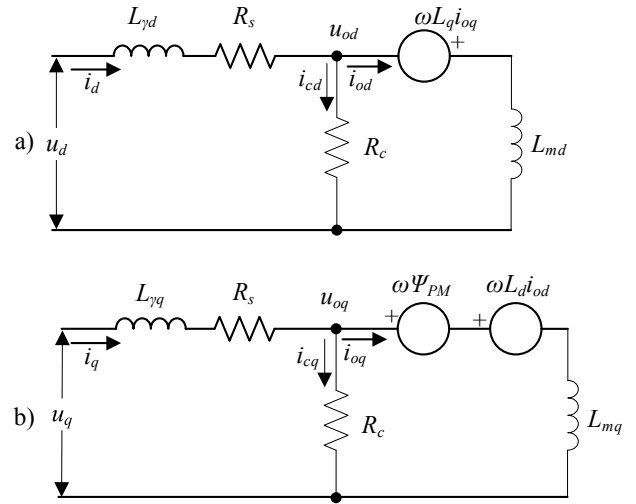
$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\gamma d} i_d \\ L_{\gamma q} i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{md} i_{0d} \\ L_{mq} i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\gamma d} & 0 \\ 0 & L_{\gamma q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

гдје су $L_{\gamma d}$ и $L_{\gamma q}$ расипне индуктивности статора, а L_{md} и L_{mq} индуктивности магнећења по d и q оси. У оваквој представи, кроз расипне индуктивности статора протичу струје статора i_d и i_q које стварају расипни флуks статора, а кроз индуктивности магнећења протичу струје i_{0d} и i_{0q} које моделују заједнички флуks (магнећења) који потиче од струја статора. Треба примијетити да уколико не постоје губици у гвожђу статора, тада је $i_d = i_{0d}$ и

$i_q = i_{0q}$, па се једначина за флуksне обухвате (6) своди на једначину (2), и тада важи:

$$\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\gamma d} + L_{md} \\ L_{\gamma q} + L_{mq} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Губици у гвожђу моделују се преко фиктивног отпорника R_c на коме ће фиктивне струје i_{cd} и i_{cq} створити еквивалентне губитке у гвожђу. Овај отпорник се додаје оточно [3], како је приказано на Слици 2, а струје кроз њега одбијају се од струја статора.



Слика 2: Еквивалентна шема IPMSM по d и q оси са уваженим губицима

Укупне струје статора и губици у гвожђу су:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2). \quad (9)$$

На овај начин, струја статора има двије компоненте: магнетизационе струје i_{0d} и i_{0q} , које моделују допринос струја статора укупном заједничком флуksу, и оточне струје i_{cd} и i_{cq} , које моделују губитке у гвожђу. Овај модел важи у општем случају, чак и када се посматра IPMSM у идеалном (генераторском) празном ходу. У том случају су струје статора једнаке нули, $i_d = 0$ и $i_q = 0$, а према Слици 2 постоје фиктивне струје магнећења $i_{0d} = i_{cd}$ и $i_{0q} = i_{cq}$ које стварају губитке празног хода. Растом терета, расту струје статора, па настаје флуks магнећења статора који увећава губитке у односу на идеалан празан ход. С друге стране, уколико се занемаре губици у гвожђу, тада је $R_c \rightarrow \infty$, па се еквивалентна шема са Сlike 2 своди се на шему са Сlike 1, јер је тада $i_{cd} = 0$ и $i_{cq} = 0$, а $i_d = i_{0d}$ и $i_q = i_{0q}$.

Према шеми са Сlike 2, једначине напонске равнотеже и флуksних обухвата IPMSM са уваженим губицима су:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\gamma d} & 0 \\ 0 & L_{\gamma q} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{d0} \\ \Psi_{q0} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{d0} \\ \Psi_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

при чему је:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

IV. ПАРАМЕТРИ МОДЕЛА IPMSM СА УВАЖЕНИМ ГУБИЦИМА

У моделу електричног подсистема IPMSM (10)-(12) са уваженим губицима фигуришу фиктивни отпорник R_c и расипне и магнетизационе индуктивности по d и q оси. Поступак одређивања параметара модела уз одговарајуће модификације биће објашњен у наставку.

A. Одређивање отпорника R_c

Кључни параметар у моделу IPMSM са уваженим губицима у гвожђу је отпорник R_c , који моделује губитке у гвожђу, и који је на основу (9) једнак:

$$R_c = \frac{2}{3} \frac{P_{Fe}}{(i_{cd}^2 + i_{cq}^2)} \quad (13)$$

Отпорник (13) моделује све губитке у гвожђу статора који се, у општем случају, групишу у губитке услед хистерезиса P_H , губитакe услед вртложних струја P_{VS} , те додатне губитке услед виших хармоника и осталих секундарних појава. У литератури постоји више приступа за анализу појединих губитака [4], при чему се додатни губитци обично занемарују, а хистерезисни губитци и губитци услед вртложних струја описују се изразом:

$$P_{Fe} = P_H + P_{VS} = (c_1 \omega_e + c_2 \omega_e^2) \Psi_{Fes}^2. \quad (14)$$

Према (14) сматра се да губитци у гвожђу статора зависе од квадрата помјенљивог флуksа у његовом магнетном колу, те од синхроне брзине и од њеног квадрата. Усвајањем наведене апроксимације, отпорник R_c може се одредити из (9) и (14):

$$R_c = \frac{(c_1 \omega_e + c_2 \omega_e^2) \Psi_{Fes}^2}{i_{cd}^2 + i_{cq}^2} = R_c(\omega_e, \Psi_{Fes}), \quad (15)$$

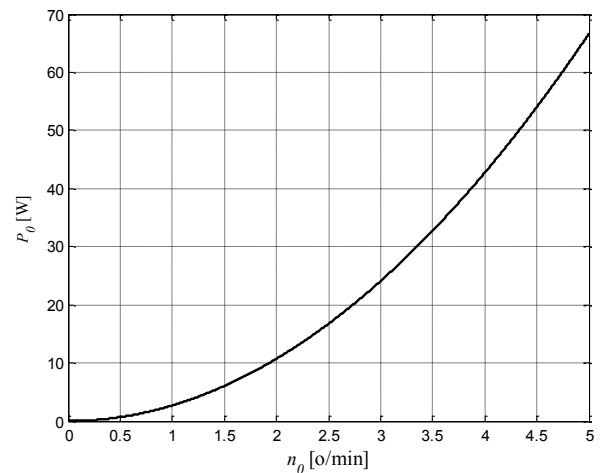
који, ако се не занемари засићење, зависи и од нивоа флуksа. Уколико се занемари засићење, отпорник R_c се може одредити из огледа моторског празног хода као:

$$R_c = \frac{2}{3} \frac{(\omega_e \Psi_{PM})^2}{P_0 - P_{Cu0}}, \quad (16)$$

при чему су P_0 и ω_e измјерене вриједности снаге и брзине обртања у празном ходу, а P_{Cu0} су губици у намотајима статора у празном ходу који се рачунају из измјерених струја празног хода:

$$P_{Cu0} = \frac{3}{2} R_s (i_{dPH}^2 + i_{qPH}^2) \quad (17)$$

Струје статора у празном ходу i_{dPH} , и i_{qPH} обично имају малу вриједност, па се могу занемарити, и тада је $P_0 \approx P_{Fe0}$. У огледу моторског празног хода снима се одговарајућа зависност снаге празног хода од брзине, приказана на Сlici 3 [4]. Уврштавањем измјерених вриједности у (16), добија се зависност фиктивног отпорника од брзине.

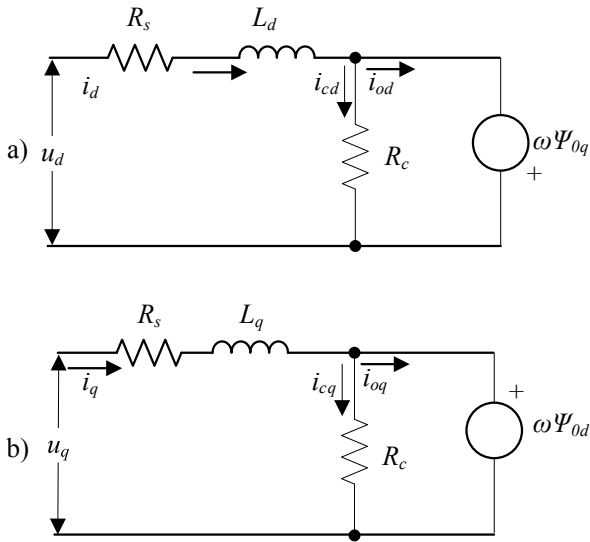


Слика 3: Губици у гвожђу P_{Fe} у функцији учестаности (брзине обртања)

Може се примијетити да су на овај начин губитци трења и вентилације P_{fv} (тзв. механички губитци) придружени губицима у гвожђу, али они зависе само од брзине.

B. Одређивање индуктивности

У моделу (10-12) фигуришу расипне индуктивности статора, $L_{\gamma d}$ и $L_{\gamma q}$, те магнетизационе индуктивности L_{md} и L_{mq} . Оне се могу одредити примјеном неке од уобичајених процедура за одређивање параметара синхроних машина [1]. Међутим, ради једноставности [5], магнетне појаве могу се описати према модификованој еквивалентној шеми са Сlike 4. У овој модификацији отпорник који моделује губитке у гвожђу је пребачен иза индуктивности магнећења, па су расипне индуктивности и индуктивност магнећења сабране као у (7). Овим се параметри модела знатно лакше одређују јер у њему сада фигуришу познате синхроне индуктивности. При томе је настала прихватљива грешка, јер су струје које теку кроз отпорник који моделује губитке у гвожђу у оточној грани много мање од струја кроз редну грану.



Слика 4: Модификована еквивалентна шема са индуктивностима расипања придруженим индуктивностима магнетнећа

У складу са наведеним приступом из [5], напонска једначина IPMSM са уваженим губицима у гвожђу постаје:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

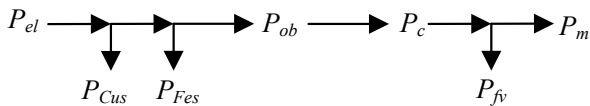
при чему су флуксни обухвати:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

а струје статора исте као у (12).

V. ТОКОВИ СНАГА У МОДЕЛУ IPMSM СА УВАЖЕНИМ ГУБИЦИМА У ГВОЖЂУ

Да би се математички модел компетирало једначином за момент, потребно одредити снагу обртног поља и снагу конверзије, $P_{ob} = P_c$, односно анализирати токове снага у IPMSM са уваженим губицима, како је приказано на Слици 5.



Слика 5: Токови снага у IPMSM са уваженим губицима у гвожђу

Улазна (електрична) снага у IPMSM је:

$$P_e = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix}, \quad (20)$$

која уврштавањем једначине напонске равнотеже (18) у стационарном стању постаје:

$$P_e = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2} \omega_e [(\Psi_{PM} + L_d i_{0d}) i_q - L_q i_d i_{0q}] = P_{Cu} + (P_{Fe} + P_c) \quad (21)$$

Први сабирак у добијеном изразу представља губитке у баку статора, а други збир снаге конверзије и снаге губитака у гвожђу. Ако се у другом сабирку у (21) струје i_d и i_q изразе преко струја кроз оточни отпорник и струја магнетнећа (12), добијају се изрази за губитке у баку P_{Cu} , губитке у гвожђу P_{Fe} и снагу конверзије P_c :

$$P_e = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2} \omega_e [\Psi_{PM} i_{qc} + L_d i_{0d} i_{qc} - L_q i_{0q} i_{dc}] + \frac{3}{2} \omega_e [\Psi_{PM} i_{0q} + (L_d - L_q) i_{0d} i_{0q}] = P_{Cu} + P_{Fe} + P_c \quad (22)$$

Момент конверзије у моделу са уваженим губицима је:

$$m_c = \frac{3}{2} P [\Psi_{PM} i_{0q} + (L_d - L_q) i_{0d} i_{0q}], \quad (23)$$

при чему се из (22) види да се губици у гвожђу могу представити и у форми еквивалентног момента

$$m_{Fe} = \frac{3}{2} P (\Psi_{PM} i_{cq} + L_d i_{0d} i_{cq} - L_q i_{0q} i_{cd}), \quad (24)$$

који се супротставља моменту конверзије. Физички гледано, губици у гвожђу стварају кочни момент, а снага губитака у гвожђу, осим из (9), може се одредити и из:

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} \omega_e [\Psi_{PM} i_{cq} + L_d i_{0d} i_{cq} - L_q i_{0q} i_{cd}]. \quad (25)$$

VI. ПРЕГЛЕД ЈЕДНАЧИНА МОДЕЛА IPMSM СА УВАЖЕНИМ ГУБИЦИМА У ГВОЖЂУ

На основу претходног излагања, комплетан модел IPMSM са уваженим губицима у гвожђу, са флуксевима као промјенљивим стања, дат је једначинама:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -\left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \\ 1 + \frac{R_s}{R_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$m_c = \frac{3}{2} P \left[\Psi_{PM} i_{0q} + (L_d - L_q) i_{0d} i_{0q} \right], \quad (28)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_c - m_{opt}, \quad (29)$$

при чему се струје кроз фиктивни отпорник и струје статора рачунају из:

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \frac{\omega_e}{R_c} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{0d} \\ \Psi_{0q} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

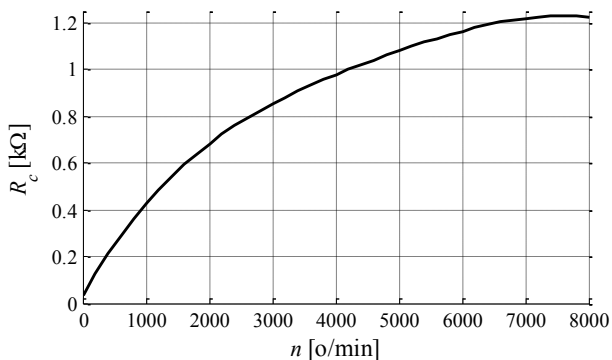
а губици у баку и гвожђу се рачунају из:

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) = \frac{3}{2} R_s \left[\left(i_{0d} - \frac{\omega_e L_q i_{0q}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{0q} + \frac{\omega_e (\Psi_{PM} + L_d i_{0d})}{R_c} \right)^2 \right], \quad (32)$$

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2) = \frac{3}{2} \frac{\omega_e^2}{R_c} \left[(\Psi_{PM} + L_d i_{0d})^2 + (L_q i_{0q})^2 \right]. \quad (33)$$

VII. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА И ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА IPMSM СА УВАЖЕНИМ ГУБИЦИМА

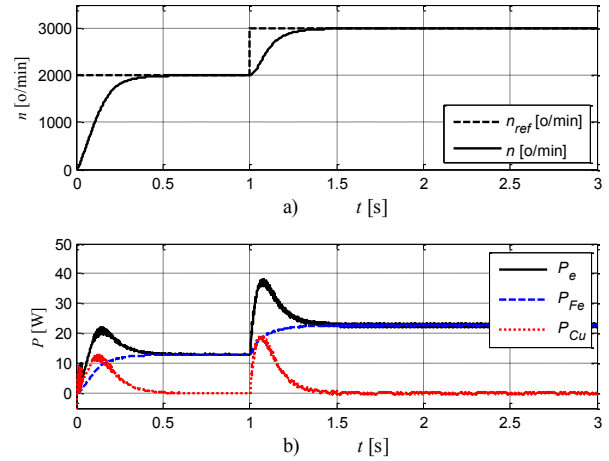
Параметри мотора који је кориштен у симулацији и експерименту су: $P = 4$, $L_d = 16.84$ mH, $L_q = 24.67$ mH, $R_s = 2.73$. На основу огледа моторског празног хода, према Слици 4 и изразима (16) и (17) добијена је зависност фиктивног отпорника R_c од брзине (15), како је приказано на Слици 6.



Слика 6: Зависност фиктивног отпорника R_c од брзине обртања

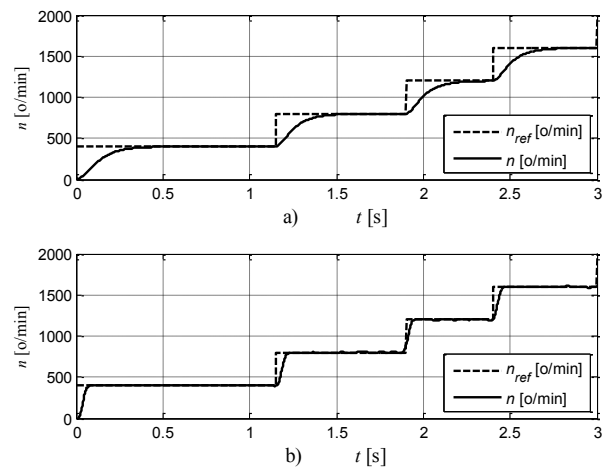
На основу математичког модела (26)-(33) направљен је рачунарски програм за симулацију рада IPMSM са уваженим губицима у гвожђу моделованим преко фиктивног отпорника са Слике 6. На Слици 7 приказани су резултати симулације радног режима убрзавања неоптерећеног погона из стања мировања до брзине од

2000 o/min, односно до 3000 o/min (Слика 7а). На Слици 7б приказани су поједини губици у машини. Са Слике 7б види се да губици у гвожђу P_{Fe} расту са растом брзине, а пошто се посматра неоптерећен погон, губици у гвожђу су приближно једнаки улазној снази. У прелазним режимима, током убрзавања, машина развија момент убрзања, који је праћен повећаним струјама, па тада настају и значајни губици у баку приказани на Слици 7б.

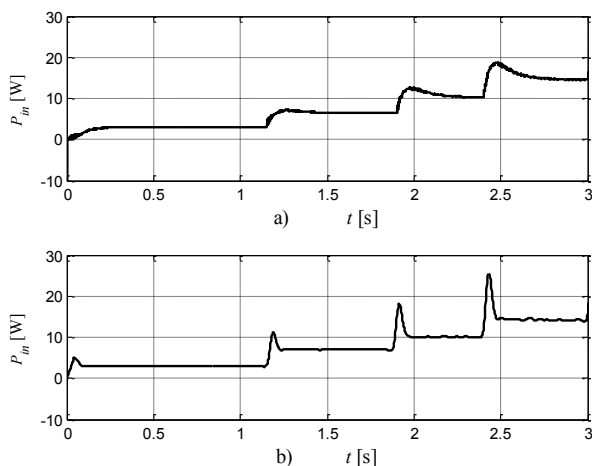


Слика 7: Рачунарска симулација рада IPMSM са уваженим губицима у гвожђу: а) брзина обртања и б) улазна снага P_e , губици у баку P_{Cu} , губици у гвожђу P_{Fe}

У циљу верификације модела, на Слици 8 и Слици 9 упоређени су одзиви добијени рачунарском симулацијом модела (26)-(33) и одзиви добијени експериментом. Посматран је режим промене брзине обртања у празном ходу, па је снага која улази у мотор приближно једнака губицима у гвожђу. На Слици 8 приказани су одзиви брзине у симулацији и експерименту, а на Слици 9 улазна снага у мотор добијена симулацијом и измјерена улазна електрична снага у експерименту.



Слика 8: Брзина обртања IPMSM у празном ходу: а) рачунарска симулација и б) измјерене вриједности у експерименту



Слика 9: Улазна снага у IPMSM у празном ходу: а) рачунарска симулација и б) измјерене вриједности у експерименту

Поређењем одзива са Сlike 9 закључује се да математички модел IPMSM са уваженим губицима у гвожђу (26)-(33) добро моделује губитке који постоје у реалној машини. Мања одступања у прелазним режимима на Сlici 9 последица су различитог подешавања регулатора брзине у симулацији и експерименту, што се види са Сlike 8.

VIII. ПРИМЈЕНЕ МОДЕЛА IPMSM СА УВАЖЕНИМ ГУБИЦИМА У ГВОЖЂУ

Добијени модел може се користити за развој алгоритама за минимизацију губитака у погонима са IPMSM, односно повећавање ефикасности, као и за развој стратегија за кочење без рекуперације енергије.

A. Минимизација губитака

Минимизација губитака широко је обрађена у литератури [2-5]. Показано је да се при датом моменту оптерећења и брзини обртања могу одредити струје i_d и i_q тако да губици у машини буду минимали. У основи, тражи се минимум функције губитака

$$\min \{P_g\} = \min \{P_{Fe} + P_{Cu}\}. \quad (34)$$

уз услов да машина развија дати момент (28). На тај начин се добијају струје i_{0d} и i_{0q} из којих се, помоћу (30) и (31) одређују потребне струје i_d и i_q . У оптимизационом процесу тражи се рјешење добијеног нелинеарног система једначина, што је детаљно обрађено у литератури.

B. Нерегенеративно кочење

Друга битна примјена модела IPMSM са уваженим губицима у гвожђу је за развој техника нерегенеративног кочења [6]. Наиме, у масовним примјенама IPMSM за погоне широке потрошње, користе се јефтине мотори напајани из претварача енергетске електронике који не

омогућавају регенерацију енергије кочења у мрежу. У том случају, сва енергија кочења се мора дисипирати у погонском претварачу и у мотору. Код ове примјене, потребно је да електрична снага (21) током кочења буде једнака нули, што се своди на:

$$P_{Cu} + P_{Fe} = -P_c, \quad (35)$$

односно на услов да се снага конверзије при датој брзини дисипира на губицима унутар мотора. Из услова (35), одређује се прва веза између струја i_{d0} и i_{q0} . Друга веза се одређује из добијања што већег кочног момента. Да би кочење било што ефикасније, потребно је да током кочења губици у мотору имају максималну вриједност:

$$\max \{P_g\} = \max \{P_{Fe} + P_{Cu}\}, \quad (36)$$

одакле се добија друга веза између струја i_{d0} и i_{q0} . Рјешавањем система (35) и (36), те уз (30) и (31), одређују се потребне струје i_d и i_q за најефикасније кочење, тј. за кочење у најкраћем времену. Проблем рјешавања система датих једначина лежи у томе што је потребно одредити максимум функције губитака (36) још и уз ограничење максималних струја /или напона:

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} = I_{MAX}, \quad (37)$$

$$\sqrt{u_d^2 + u_q^2} = U_{MAX}, \quad (38)$$

Ова ограничења могу, али не морају, да наступе истовремено, тако да је веома компликовано рјешавати добијени систем једначина уз додатне услове (37)-(38). Поступак одређивања оптималних струја IPMSM током нерегенеративног кочења уз уважавање губитака у гвожђу није за сада довољно обрађен у доступној литератури [7].

IX. ЗАКЉУЧАК

Модел IPMSM са уваженим губицима у гвожђу добијен је модификацијом модела у коме нема губитака. При томе су кориштени уобичајени приступи који се користе у литератури, уз додатна занемарања која су детаљно дискутована. Поређењем резултата добијених експериментом и рачунарском симулацијом потврђена је задовољавајућа тачност модела. Наведене су двије примјене модела: повећавање енергетске ефикасности и развој алгорита нерегенеративног кочења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дарко П. Марчетић, „Микропроцесорско управљање енергетским претварачима“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [2] Владан Вучковић, „Електрични погони“, Електротехнички факултет, Београд, 1997.
- [3] C. Cavallaro, A. : D. Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. R. Galluyyo, M. Trapanese: „Efficiency Enhancement of Permanent – Magnet Synchronous Motor Drives By Online Loss Minimization Approaches“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, No. 4, August 2005.
- [4] Марко Гецић: „Енергетски ефикасно дигитално управљање синхроним мотором са сталним магнетима при великим брзинама

обртања“, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2017.

- [5] S. Morimoto, Y. Ton g, Y. Takeda, T. Hirasu: “Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 541, No. 5, October 1994.
- [6] Петар Матић, Дарко Марчетић: „Нерекуперативно кочење високобрзинских синхроних мотора са перманентним магнетима“, Научно – стручни симпозијум ИНФОТЕХ, Јахорина, март 2017.
- [7] Vladan R. Jevremović, Borislav Jefenić: “An Efficient Braking Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors”, 13th International Symposium on Power Electronics - Ee 2005, *Proceedings*, Novi Sad, November 2nd -4th, 2005.

ABSTRACT

In this paper modeling of a synchronous motor with internally mounted permanent magnets with iron losses taken into account is described. The paper contains a theoretical

analysis of iron losses, modification of the standard model, necessary simplification and its analysis, and a discussion on the practical determination of the model parameters. The verification of the model was done by comparing the results of computer simulation model and experimentally recorded values. It is stated that the model is applicable in two practical implementations: to create drives with increased efficiency and to develop non-regenerative braking algorithms for permanent magnet synchronous drives.

MATHEMATICAL MODEL OF HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH IRON LOSSES TAKEN INTO ACCOUNT

Petar Matić, Marko Gecić, Darko Marčetić, Vladimir Popović,
Đura Oros

Analiza mogućnosti minimizacije gubitaka sinhronog motora sa stalnim magnetima na rotoru pogodnog za primenu u uređajima široke potrošnje

Darko Marčetić¹, Marko Gecić², Petar Matic³

¹Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Republika Srbija

²Torqueedo GmbH, Gilching, Germany

³Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
darmar@uns.ac.rs, marko.gecic@torqueedo.com, petar.matic@etf.unibl.org

Sažetak—U ovom radu predstavljen je model sinhronog motora sa stalnim magnetima na rotoru, sa uvažanim gubicima u gvožđu. Na osnovu modela analizirana je mogućnost minimizacije ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka motora. Prilikom računarskih simulacija motora pogodnog za korišćenje u uređajima široke potrošnje pokazano je da se odabirom odgovarajuće direktne komponente vektora struje statora mogu minimizirati ukupni kontrolabilni električni gubici.

Ključne reči—energetska efikasnost; sinhroni motor sa stalnim magnetima; pogoni široke primene; minimizacija gubitaka;

I. UVOD

U današnjem, savremenom i industrijalizovanom svetu potreba za električnom energijom je sve veća i potrebno ju je što efikasnije proizvoditi i koristiti [1]. Potrošnja toplotne i električne energije neprestano raste, pa će pre ili kasnije biti potrebno mnogo investirati kako u prenosne, tako i u distributivne mreže, ali i transformatorske stanice. Jedan od najvažnijih faktora za uštedu energije je upotreba energetski efikasnih motora. Standard za klasifikaciju motora po nivoima vrednosti stepena iskorišćenja [2], IEC 60034-30, definiše četiri energetske klase motora: IE1 – motori standardne efikasnosti (*Standard efficiency*); IE2 – motori visoke efikasnosti (*High efficiency*), sa 18-25% manjim gubicima u odnosu na IE1; IE3 – motori vrlo visoke efikasnosti (*Premium efficiency*), sa 15-20% manjim gubicima od IE2; i IE4 – motori super efikasnosti (*Super Premium efficiency*), što se prezentira kao cilj kome se teži. Prema Direktivi 2005/32/EC [3] primena motora navedenih energetskih klasa je obavezna u zemljama Evropske unije. Od 1. januara 2017. svi motori nominalnih snaga od 0,75-375kW moraju biti najmanje klase IE3, ili klase IE2 i opremljeni sa pretvaračima za regulaciju brzine (frekvencije).

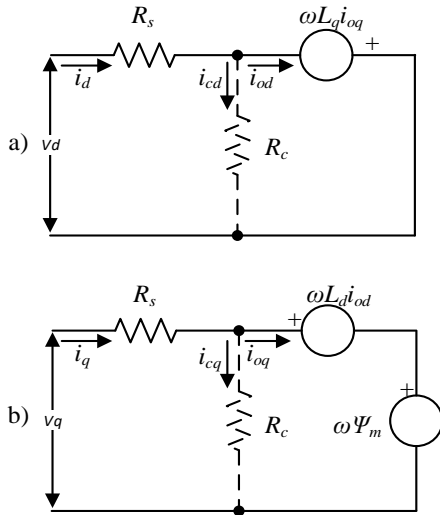
Kod raznih uređaja poput aparata za domaćinstvo, ručnih alata, rashladnih uređaja i ventilatora koriste se pogoni promenljive brzine. Ovi pogoni su veoma osetljivi po pitanju cene, dok u isto vreme zahtevaju visoku pouzdanost i efikasnost. Što se tiče energetskih klasa uređaja široke potrošnje od 2010. godine u Evropskoj uniji važe klase od A do G [4], pri čemu klasa A označava najmanju potrošnju električne energije, a klasa G najveću potrošnju energije. Upotrebom energetski efikasnijih uređaja široke potrošnje može se uštedeti značajna količina energije, a samim tim i smanjiti potreba za investicijama u prenosnim i distributivnim mrežama. U uređajima široke potrošnje u poslednje vreme najčešće se koriste sinhroni motori sa stalnim magnetima na rotoru, jer u odnosu na druge vrste raspoloživih obrtnih mašina imaju najveću efikasnost [5].

Gubici sinhronne mašine mogu se podeliti u nekoliko grupa. Prvu grupu čine gubici u bakru mašine (P_{Cu}) koji nastaju u namotajima na statoru. Gubici u namotajima statora su gubici zbog prolaska struje I kroz namotaj izazvane opterećenjem. To su gubici Džulove toplote i dodatni gubici. Džulovi gubici su proporcionalni RI^2 , gde je R otpornost namotaja. Kako su Džulovi gubici zbog nametnute struje opterećenja proporcionalni otpornosti namotaja, oni se povećavaju sa porastom temperature namotaja. Dodatni gubici nastaju usled pojave potiskivanja, kao i zbog dodatnog magnetisanja feromagnetnog kostura i konstruktivnih delova. Ove gubitke je teško tačno odrediti. U digitalno regulisanim pogonima promenljive brzine smatra se da su Džulovi gubici u namotaju mašine kontrolabilni, a svi ostali gubici u bakru se zanemaruju. Drugu vrstu čine gubici u gvožđu (P_{Fe}) tj. gubici u feromagnetnom magnetskom kolu. Ovi gubici se sastoje od gubitaka izazvanih usled vrtložnih (vihornih) struja i gubitaka usled histereze. U digitalno regulisanim pogonima promenljive brzine smatra se da su gubici u gvožđu kontrolabilni, jer se promenom napajanja mašina može dovesti u radni režim u kome se ima manja snaga gubitaka u gvožđu. Treću vrstu gubitaka čine mehanički gubici koji se sastoje od gubitaka (usled) trenja i ventilacije. Smatra se da ovi gubici nisu kontrolabilni.

Vektorskim upravljanjem se postiže raspregnuto upravljanje momentom i fluksom sinhronne mašine. Regulacijom poprečne komponente vektora struje statora (struja q ose) reguliše se momenat, dok se regulacijom direktne komponente vektora struje statora (struja d ose) reguliše fluks mašine [6]. Konvencionalna metoda upravljanja sinhronim motorima sa stalnim magnetima je postavljanje direktne komponente vektora struje statora na nulu, za brzine obrtanja manje od nominalne. Za brzine pri kojima amplituda fazne EMS statora postaje veća od maksimalnog mogućeg faznog napona na izlazu invertora ($\approx U_{dc}/\sqrt{3}$) neophodno je umanjiti polje [7] i time izbeći zasićenje strujnih regulatora. Potrebno je smanjiti ukupan fluks statora u d -osi, što se postiže negativnom strujom u d -osi. U ovom radu analiziraće se promena ukupnih kontrolabilnih gubitaka u zavisnosti od struje d ose pri određenim parovima brzina i opterećenja.

II. MATEMATIČKI MODEL SINHRONOG MOTORA SA STALNIM MAGNETIMA

Ekvivalentna šema sinhronog reluktantnog motora u dq koordinatnom sistemu prikazana je na slici 1 [1]. Na slici, R_s predstavlja otpornost statorskog namotaja, R_e otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu, Ψ_m fluks stalnog magneta dok L_d i L_q predstavljaju induktivnosti u podužnoj d i poprečnoj q osi.



Sl. 1. Ekvivalentna šema PMSM. a) ekvivalentna šema d ose, b) ekvivalentna šema q ose

Na osnovu ekvivalentne šeme može se napisati sledeći matematički model u stacionarnom stanju:

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

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

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

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

gde su v_{od} i v_{oq} naponi grane magnećenja, v_d i v_q dq komponente vektora statorskog napona, i_d i i_q dq komponente vektora statorske struje, i_{cd} i i_{cq} dq struje kroz granu magnećenja, i_{do} i i_{qo} struje u vazdušnom zazoru, $\rho = L_q/L_d$, dok je ω električna ugaona brzina.

Elektromagnetni moment zavisi od isturenosti polova rotora, fluksa magneta i komponenti vektora struje statora. Na osnovu slike 1 moment se može izraziti na sledeći način:

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

Gubici u bakru statorskog namotaja su proporcionalni kvadratu amplitude statorske struje i mogu se predstaviti kao:

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

Gubici u gvožđu mogu se izračunati na osnovu R_c otpornosti i struja koje protiču kroz nju:

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

Ukupni kontrolabilni električni gubici se dobijaju kao zbir gubitaka u bakru i gvožđu:

$$\begin{aligned} P_L &= P_{Cu} + P_{Fe} = \frac{3}{2} (R_s (i_d^2 + i_q^2) + R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2)) \\ &= \frac{3}{2} \left(R_s (i_d^2 + i_q^2) + \frac{\omega^2 ((\rho L_d i_{oq})^2 + (\Psi_m + L_d i_{od})^2)}{R_c} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

a mogu se izraziti kao funkcija od i_{od} , T i ω :

$$P_L = f(i_{od}, T, \omega) \quad (9)$$

Iz jednačine za elektromagnetni moment može se izraziti komponenta struje i_{oq} :

$$i_{oq} = \frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \quad (10)$$

a zatim uvrštavanjem (10) u (1) – (4) dobijaju se komponente vektora struje statora:

$$i_d = i_{od} - \frac{2T\omega\rho L_d}{3pR_c(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \quad (11)$$

$$i_q = \frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} + \frac{\omega(\Psi_m + L_d i_{od})}{R_c} \quad (12)$$

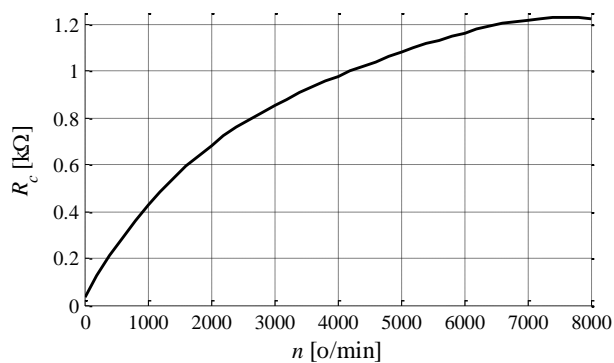
Ako se dobijene komponente vektora struje statora uvrste u (9) dobija se:

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{3}{2} R_s \left(\left(i_{od} - \frac{2T\omega\rho L_d}{3pR_c(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{2T}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} + \frac{\omega(\Psi_m + L_d i_{od})}{R_c} \right)^2 \right) \\ &\quad + \frac{3}{2} \frac{\omega^2 \left(\left(\frac{\rho L_d}{3p(\Psi_m + (1 - \rho)L_d i_{od})} \right)^2 + (\Psi_m + L_d i_{od})^2 \right)}{R_c} \end{aligned} \quad (13)$$

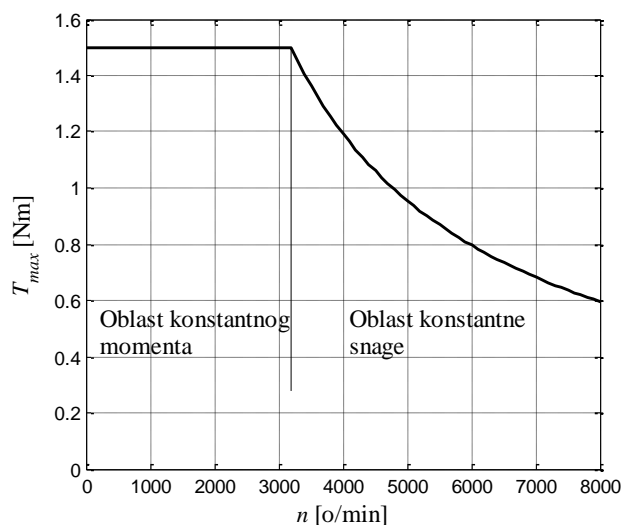
III. REZULTATI RAČUNARSKIH SIMULACIJA

Zavisnost snage gubitaka od struje i_{od} za različita opterećenja i na različitim brzinama dobijena simulacijama prikazana je u ovom poglavlju. Prilikom simulacija korišćeni su nominalni parametri motora korišćenog u mašini za pranje veša: $p = 4$, $L_d = 16.84$ mH, $L_q = 24.67$ mH, $R_s = 2.73$. Otpornost kojom su modelovani gubici u gvožđu menja se sa promenom brzine. Dominantni gubici u praznom hodu su gubici u gvožđu i na osnovu merenja tih gubitaka može se odrediti otpornost R_c pomoću sledećeg izraza:

$$R_c = \frac{3(\omega\Psi_m)^2}{2P_{Fe}} \quad (14)$$



Sl. 2. Zavisnost R_c od brzine obrtanja

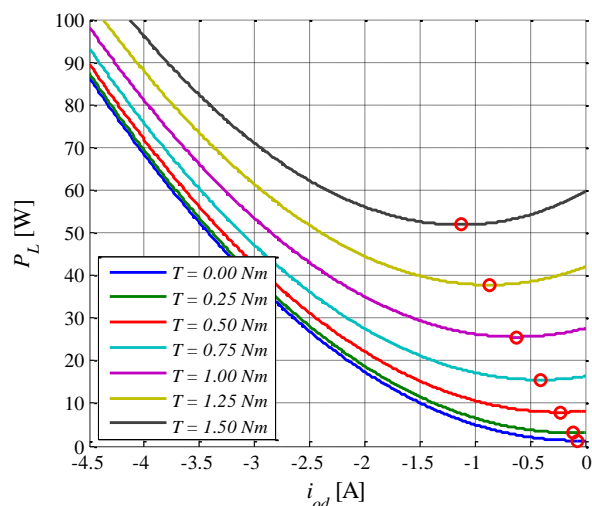


Sl. 3. Zavisnost momenta od brzine

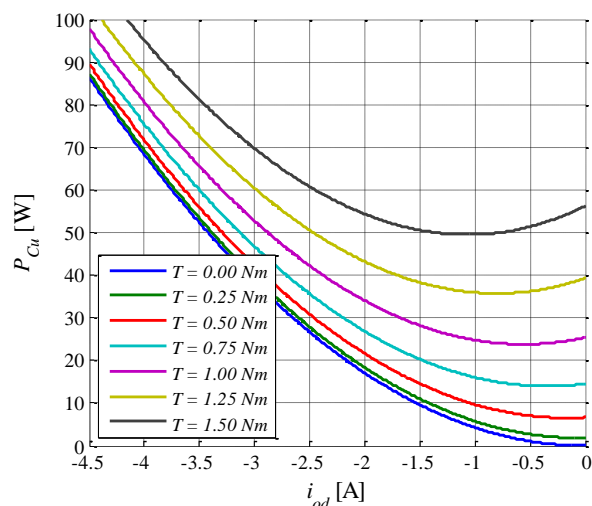
Zavisnost maksimalnog momenta od brzine sinhronog motora sa stalnim magnetima napajanog iz invertora korišćenog u ovoj analizi ilustrovana je na slici 3. Vidi se da je maksimalni momenat konstantan do brzine od 3200 o/min, a nakon toga opada (oblast slabljenja polja). Kako je izlazna snaga jednaka proizvodu momenta i brzine ona raste linearno do brzine od 3200 o/min, a nakon toga ostaje konstantna. Na srednjim i velikim brzinama električni pogon mora raditi sa konstantnom snagom.

A. Male brzine obrtanja rotora

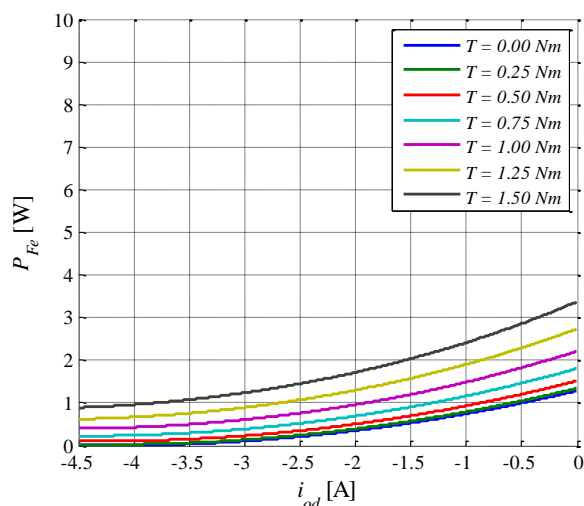
Na slici 4 prikazana je zavisnost ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka u funkciji struje i_{od} za više različitih opterećenja, za slučaj kada je brzina konstantna i iznosi 500 o/min. Povećanjem negativne struje kontrolabilni gubici se smanjuju, a zatim povećavaju. Funkcija gubitaka je konveksna i za svako opterećenje postoji takva struja i_{od} kojima se ostvaruju minimalni gubici.



Sl. 4. Zavisnost P_L od i_{od} pri različitim opterećenjima i brzini od 500 o/min



Sl. 5. Zavisnost P_{Cu} od i_{od} pri različitim opterećenjima i brzini od 500 o/min



Sl. 6. Zavisnost P_{Fe} od i_{od} pri različitim opterećenjima pri brzini od 500 o/min

Na slici 4 prikazana je zavisnost snage gubitaka u bakru od struje i_{od} pri brzini od 500 o/min. Jasno se može videti da se

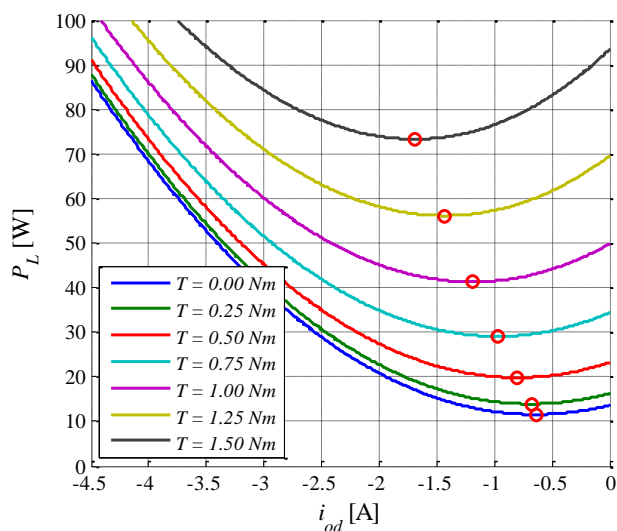
povećanjem negativne struje i_{od} povećavaju gubici u bakru pri svim opterećenjima. Sa slike 5 može se videti da se povećanjem negativne struje i_{od} smanjuju gubici u gvožđu pri svim opterećenjima. Takođe, može se videti da su pri malim brzinama dominantni gubici u bakru. U tabeli I predstavljeni su podaci o mogućnostima smanjena kontrolabilnih gubitaka pri malim brzinama. Može se videti da se izborom odgovarajuće struje i_{od} kontrolabilni gubici mogu smanjiti do 13%.

TABELA I. MOGUĆNOST SMANJENJA GUBITAKA NA MALIM BRZINAMA

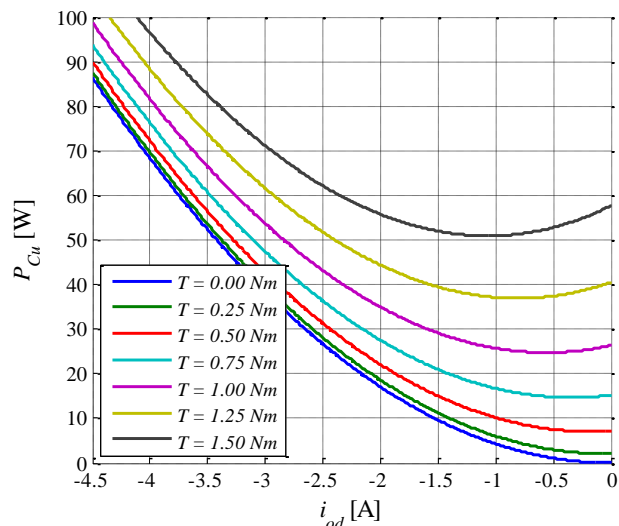
T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	P_L pri $i_{od} = 0$	P_L min	ΔP_L [%]
0	13,6	1,28	1,69
0,25	3,17	3,11	1,77
0,50	8,18	7,93	2,98
0,75	16,33	15,52	4,97
1,00	27,62	25,56	7,45
1,25	42,06	37,77	10,20
1,50	59,63	51,84	13,07

B. Srednje brzine obrtanja rotora

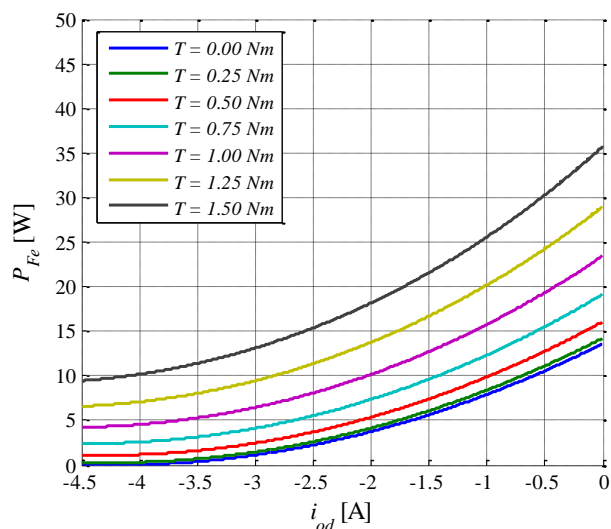
Na slici 3 prikazana je zavisnost ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka u funkciji struje i_{od} za više različitih opterećenja, za slučaj kada je brzina konstantna i iznosi 3000 o/min. Jasno se može videti da postoje takve struje i_{od} kojima se ostvaruju minimalni gubici za pri svakom opterećenju.



Sl. 7. Zavisnost P_L od i_{od} pri različitim opterećenjima i brzini od 3000 o/min



Sl. 8. Zavisnost P_{Cu} od i_{od} pri različitim opterećenjima i brzini od 3000 o/min



Sl. 9. Zavisnost P_{Fe} od i_{od} pri različitim opterećenjima pri brzini od 3000 o/min

Na slici 4 prikazana je zavisnost snage gubitaka u bakru od struje i_{od} pri brzini od 3000 o/min. Jasno se može videti da se negativnijom strujom i_{od} povećavaju gubici u bakru pri svim opterećenjima. Na slici 5 može se videti da se negativnijom strujom i_{od} smanjuju gubici u gvožđu pri svim opterećenjima. Takođe, može se videti da su pri malim brzinama dominantni gubici u bakru. U tabeli II predstavljeni su podaci o mogućnostima smanjena kontrolabilnih gubitaka pri srednjim brzinama. Može se videti da se izborom odgovarajuće struje i_{od} kontrolabilni gubici mogu smanjiti do 21%.

TABELA II. MOGUĆNOST SMANJENJA GUBITAKA NA SREDNJIM BRZINAMA

T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	P_L pri $i_{od} = 0$	P_L min	ΔP_L [%]
0	13,66	11,57	15,32
0,25	16,31	13,92	14,67

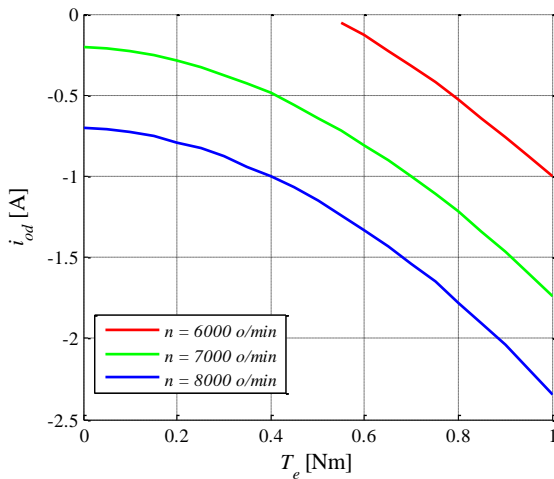
T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	P_L pri $i_{od} = 0$	P_L min	ΔP_L [%]
0,50	23.22	19.83	14.59
0,75	34.39	29.07	15.49
1,00	49.82	41.28	17.13
1,25	69.50	56.14	19.23
1,50	93.44	73.30	21.55

C. Velike brzine obrtanja rotora

Maksimalni momenat koji motor može da razvije zavisi od strujnih (I_{max}) i naponskih (U_{max}) ograničenja invertora. Strujno ograničenje je dominantno na malim, dok je naponsko na velikim brzinama obrtanja. Naponsko ograničenje može se prestaviti kao:

$$v_d^2 + v_q^2 \leq U_{max} \left(U_{DC} / \sqrt{3} \right) \quad (15)$$

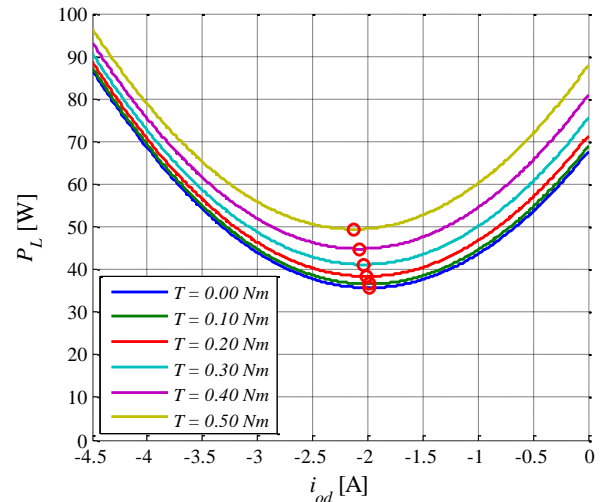
gdje je U_{DC} napon jednosmernog međukola.



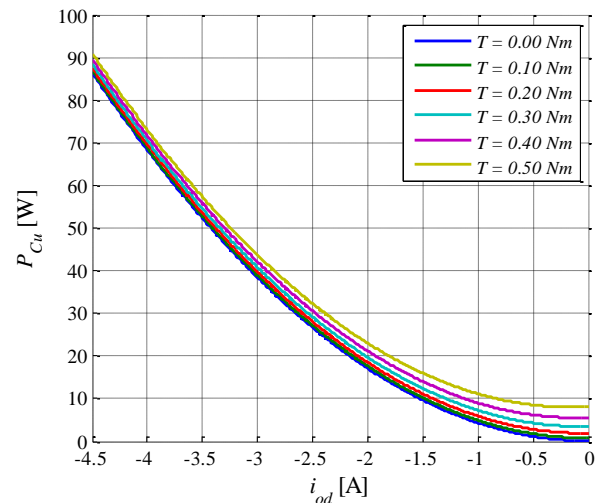
Sl. 10. Struja iod pri kojoj se omogućava rad pogona uz poštovanje limita napona pri različitim opterećenjima i brzinama obrtanja

Na slici 10 prikazana je zavisnost struje i_{od} , pri kojoj pogon radi na granici naponskog ograničenja, od opterećenja pri različitim brzinama obrtanja. Može se primetiti da pri brzini obrtanja od 6000 o/min pogon radi sa strujom i_{od} jednakoj nuli do opterećenja od 0,55 Nm, a nakon toga aktivira se naponsko ograničenje. Pri brzini obrtanja od 7000 o/min i 8000 o/min aktivno je naponsko ograničenje čak i kad je pogon neopterećen.

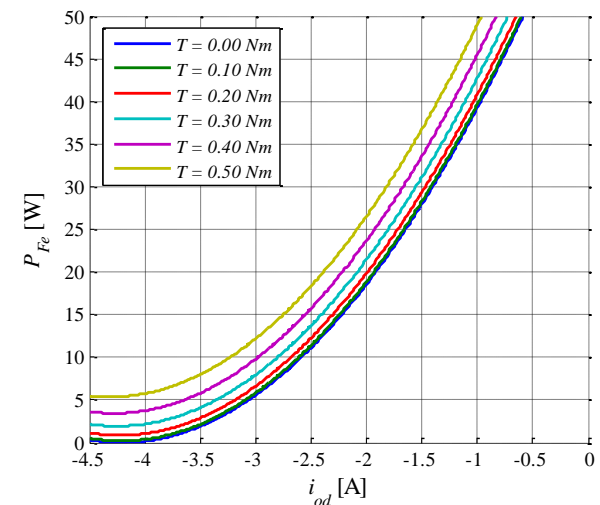
Na slici 11 prikazana je zavisnost ukupnih kontrolabilnih električnih gubitaka u funkciji struje i_{od} za više različitih opterećenja, za slučaj kada je brzina konstantna i iznosi 8000 o/min. Jasno se može videti da postoje takve struje i_{od} kojima se ostvaruju minimalni gubici za pri svakom opterećenju.



Sl. 11. Zavisnost P_L od i_{od} pri različitim opterećenjima i brzini od 8000 o/min



Sl. 12. Zavisnost P_{Cu} od i_{od} pri različitim opterećenjima i brzini od 8000 o/min



Sl. 13. Zavisnost P_{Fe} od i_{od} pri različitim opterećenjima pri brzini od 8000 o/min

Na slici 12 prikazana je zavisnost snage gubitaka u bakru od struje i_{od} pri brzini od 8000 o/min. Jasno se može videti da se negativnijom strujom i_{od} povećavaju gubici u bakru pri svim opterećenjima. Na slici 13 može se videti da se negativnijom strujom i_{od} smanjuju gubici u gvožđu pri svim opterećenjima. Takođe, može se videti da su pri malim brzinama dominantni gubici u bakru. U tabeli III predstavljeni su podaci o mogućnostima smanjena kontrolabilnih gubitaka pri srednjim brzinama. Može se videti da se izborom odgovarajuće struje i_{od} kontrolabilni gubici mogu smanjiti do 27%.

TABELA III. MOGUĆNOST SMANJENJA GUBITAKA NA VELIKIM BRZINAMA

T[Nm]	Kontrolabilna snaga gubitaka		
	P_L pri $i_{od} = 0$ ili i_{od} naponskog limita	P_L min	ΔP_L [%]
0	49,14	35,70	27,35
0,10	49,53	36,57	26,17
0,20	50,55	38,39	24,06
0,30	52,20	41,15	21,18
0,40	54,51	44,84	17,74
0,50	57,47	49,43	13,99
0,60	61,16	54,91	10,21

IV. ZAKLJUČAK

Kontrolabilni gubici u motorima naizmenične struje su gubici u bakru i gubici u gvožđu. Računarskim simulacijama pokazano je da postoji mogućnost smanjenja kontrolabilnih gubitaka u naizmeničnim motorima korišćenjem odgovarajućih komponenti vektora struje statora. Struja d- ose kojom se ostvaruju minimalni kontrolabilni gubici je uvek više negativna od konvencionalnog upravljanja, što dovodi do smanjenja fluksa u motoru, a samim tim i do manjih gubitaka u gvožđu. U isto vreme se povećaju gubici u bakru, ali su ukupni kontrolabilni gubici manji. Ako se uporede razlike u snazi gubitaka na različitim opterećenjima i pri različitim brzinama može se zaključiti da se u pogonu već mašine može uštedeti značajna snaga tokom samo jednog radnog ciklusa.

ZAHVALNICA

Rad je sponzorisan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta III 042004.

LITERATURA

- [1] M. Gecic, M. Kapetina, D. Marcetic, "Energy Efficient Control of High Speed IPMSM Drives - A Generalized PSO Approach," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.16, no.1, pp.27-34, 2016.
- [2] Standard IEC 60034-30, 2010: Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single speed three-phase cage induction motors.
- [3] Direktive 2005/32/EC, Commission of the European Communities with regard to ecodesign requirements for electric motors and their variable speed drives, Brussels 2005.
- [4] Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products
- [5] Morimoto, S.; Tong, Y.; Takeda, Y.; Hirasa, T., "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.41, no.5, pp.511,517, Oct 1994.
- [6] Jang-Mok Kim; Seung-Ki Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.1, pp.43,48, Jan/Feb 1997.
- [7] A. Rubaai, D. Ricketts and M. D. Kankam, "Development and Implementation of an Adaptive Fuzzy-Neural Network Controller for Brushless Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 2, pp. 441-447, March/April 2002.

ABSTRACT

In this paper a model of a synchronous machine with permanent magnets on the rotor is presented, with included iron losses. Based on the model, the possibilities of minimizing the total controllable electrical losses of the machine were analyzed. In computer simulations of a motor suitable for use in home appliance, it has been shown that by selecting the corresponding d component of the stator current vector, it is possible to minimize total controllable electrical losses.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF MINIMIZING THE LOSSES OF PMSM USED IN HOME APPLIANCE BASED ON THE MODEL OF LOSSES

Darko Marčetić, Marko Gecić, Petar Matic

Primena aktivnih ispravljača u elektromotornim pogonima visoke energetske efikasnosti

Marko Šinik¹, Leposava Ristić¹, Milan Bebić¹, Saša Štatkić², Dragan Jevtić¹, Neša Rašić¹, Bogdan Brković¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

²Fakultet tehničkih nauka - Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini, Kosovska Mitrovica, Srbija

sm163090m@student.etf.bg.ac.rs, leposava.ristic@etf.bg.ac.rs, bebic@etf.bg.ac.rs, statkic@etf.rs, jevtic@etf.rs, rasic@etf.rs, brkovic@etf.rs

Sažetak—U radu je analizirana primena aktivnog ispravljača u industrijskim elektromotornim pogonima sa ciljem povećanja energetske efikasnosti. Rekuperacija energije kočenja u pogonima sa vertikalnim transportom tereta, kao i u toku smanjenja brzine u pogonima velikih inercija predstavljaju odlučujuće faktore za upotrebu aktivnih ispravljača. Ovakvi pogoni rade sa približno prostoperiodičnom ulaznom strujom u motornom i u generatorskom režimu rada. Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici, ali po potrebi se može podesiti i drugačije kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna snaga ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice kao i pogon sa aktivnim ispravljačem. Ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača. Navedene prednosti, koje su eksperimentalno ispitane, a rezultati prikazani u radu, čine energetski pretvarač sa aktivnim ispravljačem najboljim izborom za primenu u pogonima visoke energetske efikasnosti. Rezultatima simulacija na razvijenom modelu, ilustrovan je uticaj harmonijskog izobličenja mrežnog napona na ulazne struje aktivnog ispravljača u sklopu frekventnog pretvarača u elektromotornom pogonu i omogućeno ispitivanje pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u radnim režimima koje je nemoguće ili opasno realizovati u laboratorijskim uslovima.

Ključne reči — *elektromotorni pogon; aktivni ispravljač; harmonijska analiza; rekuperacija; kompenzacija*

I. UVOD

Usled povećavanja cene energije i problema globalnog zagrevanja izazvanog efektom staklene bašte, nastalog kao posledica emisije štetnih gasova, u toku poslednjih decenija javio se značajan porast interesovanja naučne i stručne zajednice za teme energetske efikasnosti. Elektromotorni pogoni, posebno oni koji se koriste u industriji, prepoznati su kao jedan od glavnih činioca koji mogu značajno da doprinesu smanjenju ukupne potrošnje energije, s obzirom na svoju veličinu i instalisanu snagu. Ovo može biti postignuto [1] na sledeće načine:

- Povećanjem energetske efikasnosti tehnološkog procesa - rad u energetski efikasnoj radnoj tački procesa;
- Povećanjem energetske efikasnosti motora - izborom motora sa visokom klasom energetske efikasnosti;
- Radom elektromotornog pogona u energetski optimalnoj radnoj tački smanjenjem gubitaka u motoru i pretvaraču;
- Unapređivanjem rada pretvarača na strani mreže u elektromotornom pogonu, izborom aktivnog

ispravljača u fazi projektovanja, i parametarizacijom u fazi puštanja u rad.

Glavna tema ovog rada je primena aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u elektromotornom pogonu, čime se ostvaruju bolje performanse pogona u pogledu talasnog oblika struje prema mreži, rekuperacije energije pri kočenju i kompenzacije reaktivne snage drugih potrošača koji su sa posmatranim pogonom sa aktivnim ispravljačem vezani na mrežu na istim sabirnicama.

Rad je organizovan na sledeći način: posle uvoda datog u prvom poglavlju, u drugom poglavlju sledi opis različitih topologija elektromotornog pogona sa frekventnim pretvaračem, sa posebnim osvrtom na opis energetske i upravljačkog dela aktivnog ispravljača kada se on koristi u okviru frekventnog pretvarača. U trećem poglavlju su prikazani rezultati simulacije na modelu elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem, koji je razvijen za slučaj ispitivanja ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u uslovima koje je opasno ili nemoguće ostvariti u laboratoriji. Verifikacija modela ostvarena je poređenjem sa rezultatima dobijenim merenjem na eksperimentalnoj postavi u laboratoriji, u motornom režimu rada. Ostali rezultati, snimljeni za izabrane karakteristične slučajeve koji ilustriju poboljšane performanse elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem i PWM inverterom u pogledu energetske efikasnosti, prikazani su u četvrtom poglavlju. Zaključak je dat u petom poglavlju.

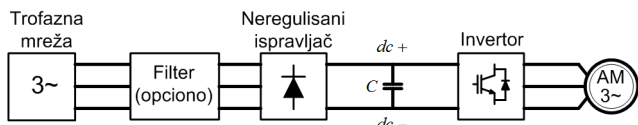
II. FREKVENTNI PRETVARAČ SA AKTIVNIM ISPRAVLJAČEM U ELEKTROMOTORNOM POGONU

U ovom poglavlju biće predstavljeni energetski i upravljački deo elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem, koji oba podjednako imaju značajan uticaj na njegove performanse, a u pogledu ostvarenja glavnog cilja regulacije - regulacije brzine i momenta motora, energetske efikasnosti pogona i uticaja na napojnu mrežu.

A. Energetski deo

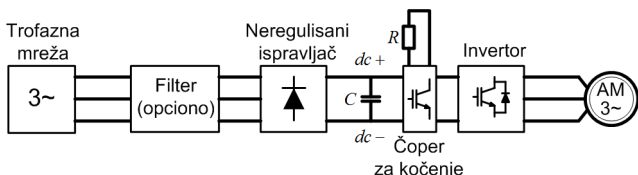
Moderni regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim motorima obično imaju sličnu topologiju frekventnog pretvarača, koji čine ispravljač, jednosmerno međukolo i inverter. Naponski pretvarači dominiraju u aplikacijama manje i srednje snage, ali se njihova primena postepeno širi i na aplikacije većih snaga. U pogonima velikih i vrlo velikih snaga primenjuju se druge topologije pretvarača, koje se

najčešće napajaju iz mreža srednjeg napona. Snage naponskih pretvarača u mrežama niskog napona dostižu vrednost od 2 MW, uz stalno povećanje maksimalne raspoložive snage. Najjednostavnija topologija energetskog dela pogona promenljive brzine sa frekventnim pretvaračem koji obezbeđuje napajanje motora naponom promenljive amplitude i učestanosti, prikazana na Sl. 1.



Sl. 1. Topologija frekventnog pretvarača u regulisanom elektromotornom pogonu sa asinhronim motorom

Neregulirani (diodni) ispravljač prikazan na Sl. 1, prenosi energiju samo u jednom smeru i to sa naizmenične na jednosmernu stranu, dok inverter može da radi u invertorskom režimu, snabdevajući motor aktivnom snagom, ali i u ispravljačkom režimu, prihvatajući aktivnu snagu od motora i prenoseći je nazad u pretvarač. Ispravljački režim invertora se javlja pri rekuperativnom kočenju motora, na primer prilikom spuštanja tereta vertikalnim transportnim uređajima (kranovi, liftovi i sl.), ili tokom usporavanja opterećenja koja imaju veliku inerciju. Da bi se frekventni pretvarač zaštitio od nedozvoljeno velike vrednosti jednosmernog napona u međukolu (napon na kondenzatoru C), neophodno je modifikovati topologiju sa Sl. 1. U aplikacijama u kojima se ne očekuju česti periodi kočenja motora, ili energija koja se oslobađa prilikom kočenja nije velika, moguće je koristiti konfiguraciju pretvarača sa čoperom i otpornikom za kočenje. Višak energije se na otporniku za kočenje (R) pretvara u toplotu, što svakako ne doprinosi ukupnoj energetskoj efikasnosti pogona. Međutim, ovo rešenje je ekonomski opravdano, pogotovu u slučajevima gde se malo energije može generisati iz pogona. Topologija pogona sa čoperom za kočenje u jednosmernom međukolu je prikazana na Sl. 2.



Sl. 2. Topologija frekventnog pretvarača sa čoperom za kočenje

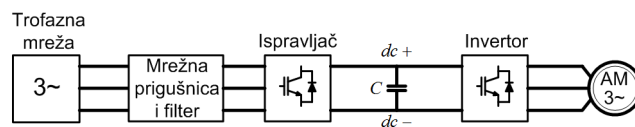
Drugi važan problem elektromotornog pogona sa nereguliranim (diodnim) ispravljačem, kao ulaznom jedinicom frekventnog pretvarača, je problem izobličenja struje iz mreže tokom njegovog rada. Kombinacija nereguliranog ispravljača i kondenzatora (C) u jednosmernom međukolu proizvodi harmonike višeg reda u mrežnoj struji. Ovo se numerički izražava preko ukupnog (pravog) faktora snage (λ), koji nekad ima vrednost $\lambda=0,7$, dok je faktor snage prvog harmonika visok, obično u opsegu iznad 0,95 [2]. Različiti proizvođači frekventnih pretvarača pristupaju ovom problemu na različite načine, da bi smanjili harmonijsko izobličenje na dozvoljenu vrednost definisanu IEEE [3] i IEC [4] standardima, a da bi zadržali nisku cenu. Pasivni filteri, ili „harmonijski filteri“, koji se povezuju između mrežnog napajanja i ispravljača su

često dodatne komponente pogona, koje nepovoljno utiču na dimenzije i težinu opreme u električnom ormaru, kao i na disipiranu toplotu na takvim komponentama. Cena pasivnih filtera je srazmerna njihovoj efikasnosti, zbog čega se često balans između cene i performansi definiše kao minimum potrebnih performansi za postizanje vrednosti definisanih standardima.

Suprotno neregulisanom ispravljaču kao ulaznoj jedinici frekventnog pretvarača, upotreba aktivnog ispravljača, ili PWM ispravljača, ima nekoliko prednosti, navedenih u [5]:

- Rad sa ukupnim (pravim) faktorom snage vrlo bliskim jedinici;
- Mogućnost vraćanja u napojnu mrežu ukupne energije generisane u toku kočenja;
- Prostoperiodični talasni oblik mrežne struje i u motornom i u generatorskom režimu rada;
- Mogućnost dinamičke kompenzacije reaktivne energije ostalih potrošača uz adekvatno dimenzionisanje po snazi elemenata frekventnog pretvarača;
- Mogućnost kompenzacije kratkotrajnih propada ili nesimetrije mrežnog napona.

Navedene prednosti čine frekventni pretvarač sa aktivnim ispravljačem u pogledu energetske efikasnosti najboljim izborom za primenu u elektromotornim pogonima. Međutim, negativna strana ovakvog pogona je njegova cena, što negativno utiče na širu upotrebu pretvarača sa ovom topologijom. Visoka cena ovakvog pretvarača je posledica upotrebe invertora sa istom strukturom i na mrežnoj strani (ispravljač) i na motornoj strani frekventnog pretvarača. Blok dijagram ove topologije je prikazan na Sl. 3.



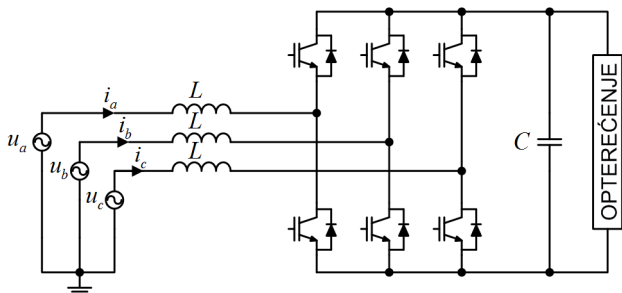
Sl. 3. Topologija frekventnog pretvarača sa aktivnim ispravljačem za regulisani elektromotorni pogon sa asinhronim motorom

Detaljna struktura energetskog dela aktivnog ispravljača na Sl. 4 prikazuje šest upravljivih prekidačkih elemenata, najčešće IGBT (engl. Insulated Gate Bipolar Transistors) tranzistora. Topologije aktivnih ispravljača koje imaju pojačavačko svojstvo najčešće za prekidačke komponente koriste ove tranzistore, kao i obaveznu prigušnicu (L), koja je povezana između mrežnog napajanja i energetskih tranzistora. Induktivnost prigušnice ograničava porast struje tokom prekidanja tranzistora (učestanost prekidanja je jednaka učestanosti PWM modulacije, što znači da je visoka), ali ima mali uticaj na rad na mrežnoj učestanosti (niska učestanost). Ako su trenutne vrednosti modulisanog napona i napona mreže u fazi, ali različite amplitude, ispravljač se ponaša kao čisto otpornički potrošač, što rezultuje prostoperiodičnim talasnim oblikom ulazne (mrežne) struje, naravno, zanemarujući harmonike usled visoke učestanosti PWM modulacije [6].

B. Upravljački deo

Upravljački deo ispravljača i invertora implementira se u digitalni upravljački sistem visokih performansi. Mikrokontroler se bazira na DSP-u (engl. digital signal

processor) ili sličnom procesoru sa velikom brzinom obrade podataka. U poslednje vreme, da bi se brzina obrade pojedinih delova programa još više povećala, koriste se FPGA (engl. Field-Programmable Gate Array) čipovi, uz nekoliko DSP jezgara koji rade u paraleli (konkurentno). Iako se realizuju u istoj upravljačkoj jedinici, upravljački deo motora i upravljački deo ispravljača se projektuju i analiziraju nezavisno. Upravljanje energetskim pretvaračem na strani motora (invertora) je dobro poznato i tema je mnogih radova i knjiga, dok će upravljanje ispravljačem (energetskim pretvaračem na strani mreže) ovde biti detaljnije prikazano.



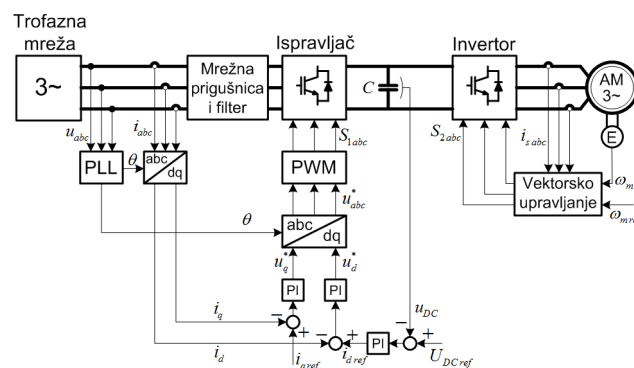
Sl. 4. Topologija energetskog dela aktivnog ispravljača

U novijoj literaturi su predstavljane razne strategije upravljanja PWM ispravljačima, ali se najčešće korišćene mogu svrstati u dve osnovne grupe: upravljanje zasnovano na naponu (engl. Voltage Oriented Control, VOC) [7], koje ima sličnosti sa vektorskim upravljanjem (engl. Field Oriented Control, FOC) asinhronog motora i direktno upravljanje snagom (engl. Direct Power Control, DPC) [8]. Može se uočiti sličnost VOC i FOC metode, jer obe koriste transformaciju koordinata i regulatore struje, kao i DPC metode sa direktnim upravljanjem momentom (engl. Direct Torque Control, DTC) asinhronog motora, jer ove dve metode ne koriste obrtnu transformaciju koordinata i imaju histerezisne komparatore u upravljačkoj strukturi. Obe strategije upravljanja dalje mogu biti podeljene na one bazirane na naponu (VOC, DPC) i one bazirane na virtualnom fluksu (engl. Virtual Flux Oriented Control, VFOC, i Virtual Flux based Direct Power Control, VF-DPC), u cilju postizanja robusnijeg upravljanja.

Osim navedenih načina upravljanja, potpuno nov način upravljanja koji omogućava da se PWM ispravljač ponaša kao virtualna sinhrona mašina (VSM) i poseduje dinamiku sinhronne mašine, skoro je predstavljen u [9]. Ova „tehnologija sinhro-pretvarača“ je razvijena za PWM pretvarače, bilo da se oni koriste na mrežnoj strani, ili na strani opterećenja, da bi se omogućila unifikacija integracije u „pametne“ elektro-energetske mreže. U industrijskim uređajima ove vrste, najčešće se za upravljanje aktivnim ispravljačem koriste VOC i VFOC načini upravljanja. VOC metoda je primenjena na aktivnom ispravljaču u laboratorijskoj eksperimentalnoj postavci, koja je korišćena za merenja i analizu u ovom radu. Obe metode su bazirane na vektorskom načinu upravljanja, koje je razvijeno za potrebe upravljanja asinhronim i sinhronim motorima. VOC upravljanje se obično primenjuje u sinhrono rotirajućem referentnom sistemu, jer se tako od periodičnih talasnih oblika struja i napona dobijaju jednosmerne veličine (vrši se transformacija koordinata). Postavljanjem direktne ose (d ose) rotirajućeg referentnog

sistema u osu sa vektorom napona, dinamički model se značajno pojednostavljuje, jer komponenta napona u q osi postaje jednaka nuli, što omogućava efikasnu regulaciju. Za rad sa jediničnim faktorom snage, q komponenta struje takođe treba da bude jednaka nuli.

Blok dijagram aktivnog ispravljača sa VOC upravljanjem je prikazan na Sl. 5. Ugao transformacije (θ) se dobija pomoću fazno spregnute petlje (engl. Phase Locked Loop), PLL bloka koji radi ispravno čak i ako postoje harmonijska izobličenja napona. Referentna vrednost q komponente struje (i_{qref}) se određuje prema referentnoj vrednosti faktora snage, dok se referenca d komponente struje (i_{dref}) dobija na izlazu PI regulatora jednosmernog napona. Princip rada pretvarača zahteva da referentna vrednost napona u jednosmernom međukolu ($U_{DCref} \geq 600$ Vdc) bude veća od napona neregulisanog (diodnog) ispravljača (540 Vdc za 400 Vac napona napajanja).



Sl. 5. Upravljački blok dijagram elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem

VFOC upravljanje predstavlja poboljšanje VOC upravljanja u pogledu osetljivosti ugla transformacije (θ) na fluktuacije i kratkotrajne prekide napona napajanja. Ovaj nedostatak VOC upravljanja se rešava primenom PLL- a, ali kvalitet odziva ispravljača zavisi od efikasnosti projektovanja PLL-a. Analogija VFOC upravljanja sa vektorskim upravljanjem motora je očigledna, pri čemu je brzina motora zamenjena naponom u jednosmernom međukolu.

III. SIMULACIONI MODEL ELEKTROMOTORNOG POGONA SA AKTIVNIM ISPRAVLJAČEM

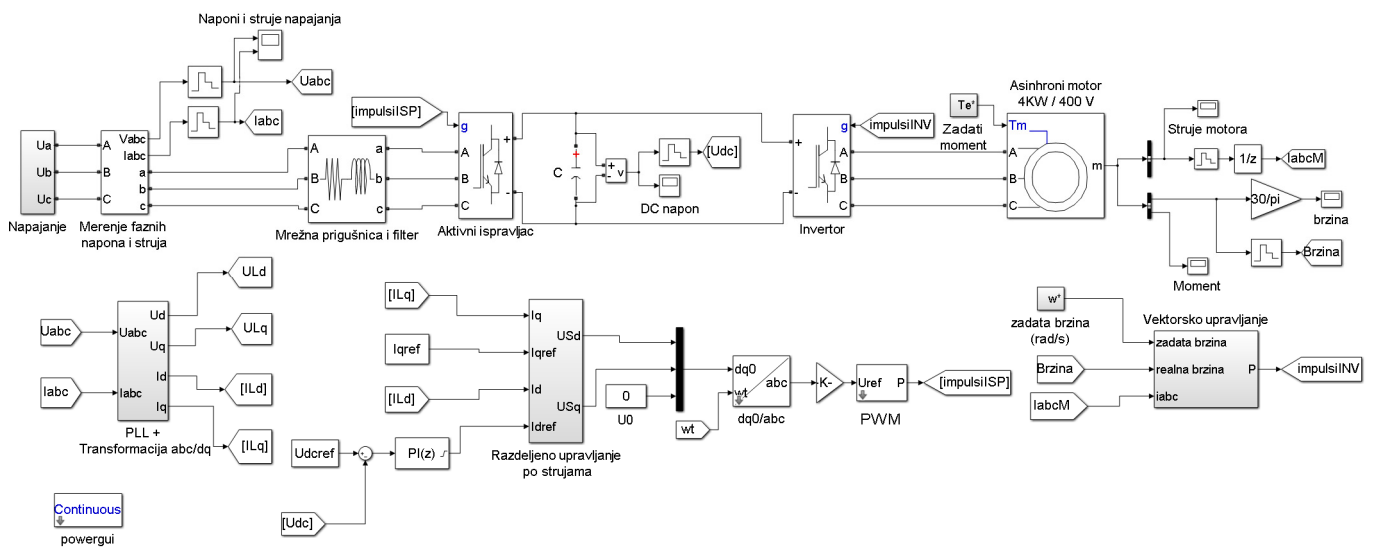
Sa ciljem da se omogućí ispitivanje ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u radnim režimima koje je teško ili nemoguće ostvariti u laboratorijskim uslovima, razvijen je simulacioni model elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem (Sl. 6) na kome je primenjeno VOC upravljanje, po ugledu na eksperimentalnu postavku u laboratoriji. Posmatrana su dva slučaja u režimu rada aktivnog ispravljača sa pozitivnom aktivnom snagom, odnosno u motornom režimu rada elektromotornog pogona (motor je opterećen polovinom nominalnog momenta). Prvi slučaj koji se analizira je slučaj kada je napon napajanja idealan prostoperiodičan signal. S obzirom da je zadata reaktivna komponenta struje jednaka nuli (faktor snage je jednak jedinici), talasni oblik struje je takođe idealno prostoperiodičan i u fazi sa naponom (Sl. 7). Idealni uslovi napajanja su vrlo retki, jer je mrežni napon na mestu

priključenja elektromotornog pogona vrlo često izobličen usled prisustva drugih nelinearnih potrošača u mreži, zbog čega će se kao drugi slučaj u simulaciji analizirati elektromotorni pogon u istim uslovima rada kao i u prvom slučaju, samo pri promenjenom naponu napajanja, koji će sada biti realan signal, snimljen u laboratoriji u kojoj se vrše merenja. Talasni oblik mrežne struje dobijen simulacijom na modelu, u uslovima kada je za mrežni napon uzeta snimljena vrednost dobijena merenjem u laboratoriji, zajedno sa snimljenom vrednošću mrežne struje dobijene merenjem u istim uslovima rada pogona, prikazani su na Sl. 8. Analizom prikazanih rezultata, može se jasno uočiti da je ostvareno zadovoljavajuće poklapanje rezultata simulacije sa rezultatima dobijenim merenjem u laboratoriji. Odgovarajuća odstupanja su posledica nemogućnosti da se detaljno modeluju svi delovi upravljačkog algoritma, koji su nedostupni kao intelektualna svojina proizvođača, kao i zbog toga što samo modelovanje uvek podrazumeva određeni stepen uprošćenja, odnosno

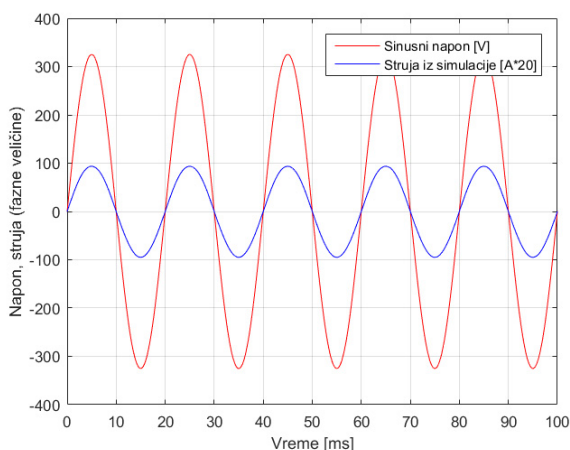
uvođenje opravdanih zanemarenja. Iz prikazanih rezultata se mogu izvesti dva bitna zaključka:

1. Samo u slučaju napajanja idealnim mrežnim naponom, dobiće se idealni talasni oblici mrežne struje, dok će se u ostalim slučajevima javiti odgovarajuća izobličenja u skladu sa izobličenjima mrežnog napona. Na osnovu toga, jasno se može utvrditi u vremenskim dijagramima snimljenim u toku eksperimenta, koja odstupanja od idealnog talasnog oblika su posledica neadekvatno podešenih vrednosti parametara, koja se eventualno mogu popraviti, a šta je posledica napajanja - što se može otkloniti u zavisnosti od mogućnosti upravljačkog algoritma, koje je predvideo i implementirao proizvođač opreme. Na taj način se mogu primeniti različiti načini ublažavanja štetnog uticaja izobličenja talasnog oblika mrežnog napona na talasni oblik mrežne struje.

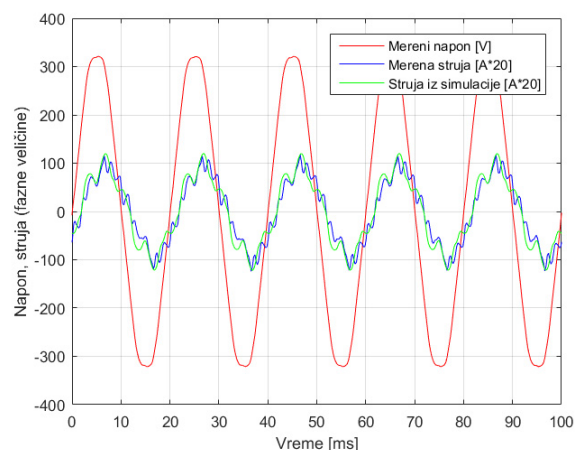
2. Pokazano je da se predstavljeni simulacioni model može koristiti za dalja ispitivanja ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u uslovima koje je opasno ili nemoguće izvesti u laboratoriji.



Sl. 6. Blok dijagram simulacionog modela pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem



Sl. 7. Talasni oblik idealnog mrežnog napona i odgovarajuće mrežne struje dobijene simulacijom na modelu u motornom režimu rada elektromotornog pogona



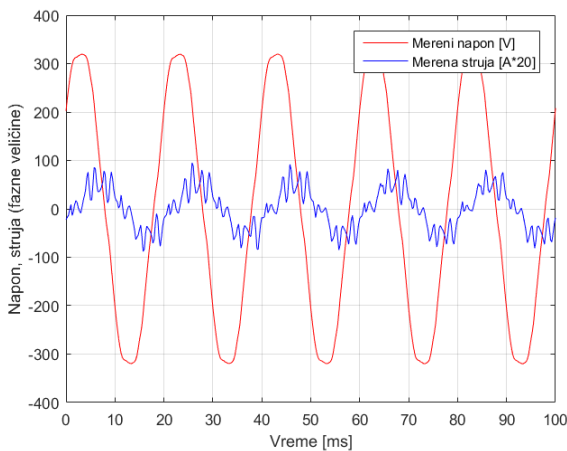
Sl. 8. Talasni oblici mrežnog napona i struje dobijeni merenjem u laboratoriji i talasni oblik struje dobijen simulacijom na modelu, u istim uslovima napajanja pogona (vrednost snimljena merenjem u laboratoriji) i u motornom režimu rada elektromotornog pogona

IV. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA I REZULTATI

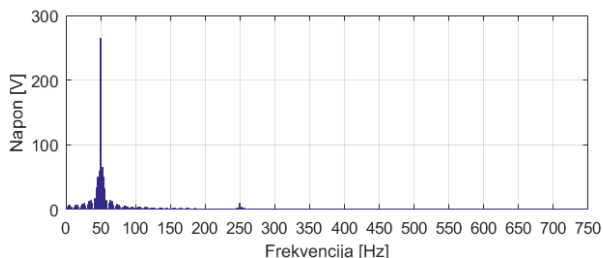
Eksperimentalna postavka, pomoću koje će se analizirati rad aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u energetski efikasnom elektromotornom pogonu realizovana je u Laboratoriji za elektromotorne pogone na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Postavka se sastoji od dva mehanički spregnuta asinhrona motora napajana preko dva energetska prevarača (vektorski upravljani frekventni pretvarači sa naponskim inverterima). Ovakva konfiguracija omogućava mašinama da menjaju svoje uloge u eksperimentima: u slučaju kada je jedan pogonski motor drugi je opterećenje u generatorskom režimu rada i obrnuto. Jedan od energetskih pretvarača ima diodni mosni ispravljač, dok drugi, koji je tema ovog rada, ima aktivni ispravljač kao pretvarač na strani mreže. Performanse pretvarača će biti ilustrovane eksperimentalnim rezultatima dobijenim na navedenoj postavci u različitim režimima rada.

A. Talasni oblik ulazne struje

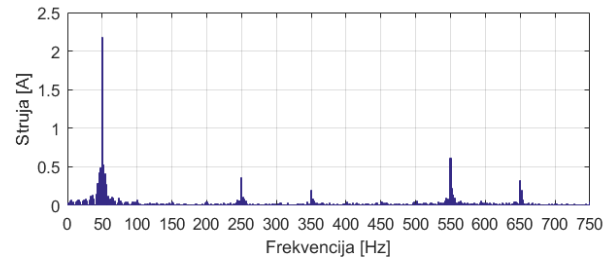
Talasni oblik ulazne struje pretvarača koji radi u režimu praznog hoda (u slučaju kada nije priključen motor) prikazan je na Sl. 9. Mrežni napon, prikazan na slici, sadrži harmonijska izobličenja izazvana nelinearnim potrošačima kao što su monofazna kompjuterska napajanja i fluorescentno osvetljenje u zgradi fakulteta. Iz tog razloga je i mrežna struja izobličena, a mala količina reaktivne snage se razmenjuje između pretvarača i mreže. Amplitudski spektar mrežnog napona je prikazan na Sl. 10, a mrežne struje na Sl. 11.



Sl. 9. Talasni oblik mrežnog napona i struje u režimu praznog hoda pretvarača (THDi=37,216%, THDu=3,623%)



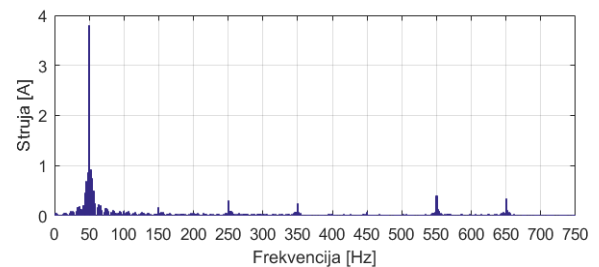
Sl. 10. Amplitudski spektar mrežnog napona – rad pretvarača u praznom hodu (učestanost odabiranja 4kHz)



Sl. 11. Amplitudski spektar mrežne struje – rad pretvarača u praznom hodu

B. Motorni režim rada

Rad aktivnog ispravljača sa pozitivnom aktivnom snagom predstavlja standardni režim rada pogona. Pretvarač uzima aktivnu snagu iz mreže i snabdeva motor potrebnim talasnim oblicima napona i struje. Reaktivna snaga, potrebna za rad motora se obezbeđuje iz pretvarača, a ne iz napojne mreže. Aktivna snaga uzeta iz mreže je veća od snage na vratilu motora, za snagu gubitaka u frekventnom pretvaraču (ispravljač, DC kolo i inverter) i motoru pri konverziji energije. Ovaj režim rada je korišćen pri verifikaciji simulacionog modela, pri čemu su na Sl. 8 prikazani mrežni napon i ulazna struja pretvarača. Amplitudski spektar mrežnog napona je praktično isti u svim režimima rada pogona u toku eksperimenta i prikazan je na Sl. 10, a amplitudski spektar mrežne struje za ovaj slučaj, prikazan je na Sl. 12.



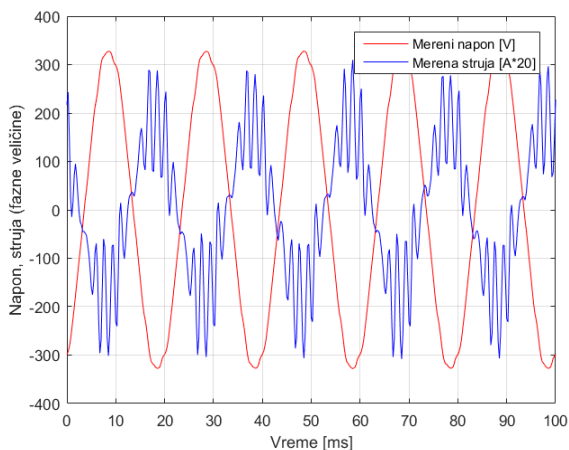
Sl. 12. Amplitudski spektar mrežne struje – rad pretvarača sa pozitivnom aktivnom snagom (P=1886 W, Q=445,6 Var, S=2382 VA, $\lambda=0,792$, $\cos\phi=0,973$, THDi=17,579%, THDu=2,645%)

C. Generatorski režim rada - rekuperacija energije u mrežu

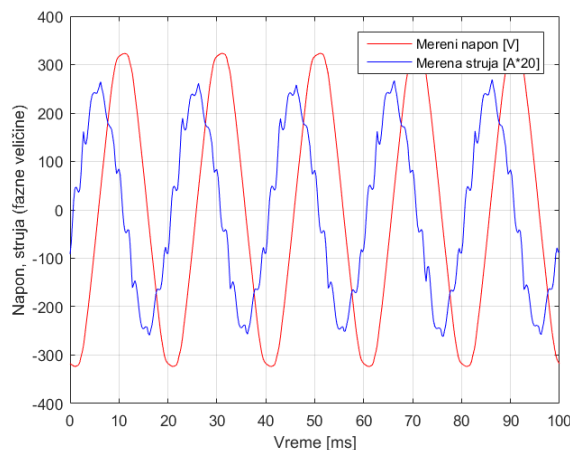
Glavna prednost aktivnog ispravljača je rad sa negativnom aktivnom snagom, odnosno rekuperacija energije. Talasni oblici mrežnog napona i struje pri radu sa negativnom aktivnom snagom su prikazani na Sl. 13, a amplitudski spektar mrežne struje na Sl. 114. U ovom režimu, aktivnu snagu generiše motor koji radi u režimu rekuperativnog kočenja. Energija se inverterom konvertuje i snabdeva jednosmerno međukolo pretvarača i injektira u napojnu mrežu. Gubici snage u pretvaraču nadoknađuju se iz generisane snage motora, što rezultuje nešto manjom snagom koja se vraća u mrežu, od one koju motor zaista proizvodi u generatorskom režimu rada.

D. Kompenzacija reaktivne snage na mestu priključenja pretvarača na mrežu

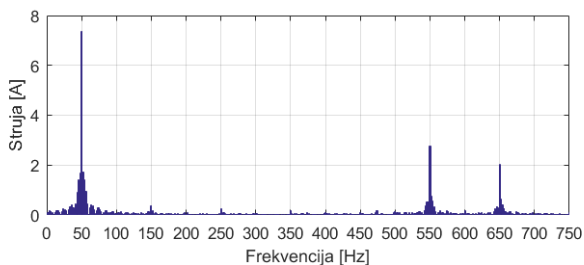
Osim svoje glavne funkcije da snabdeva energijom potrošače ili da vrši rekuperaciju aktivne snage pogona, pretvarač sa aktivnim ispravljačem ima mogućnost da radi sa



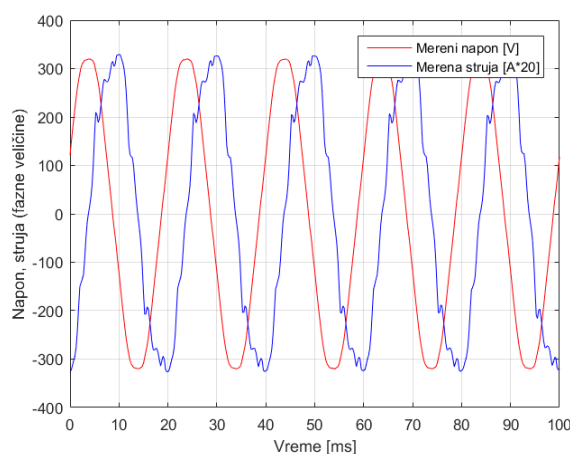
Sl. 13. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom ($P=4465$ W, $Q=444$ Var, $S=5139$ VA, $\lambda=-0,869$, $\cos\varphi=-0,995$, $THDi=47,033\%$, $THDu=2,231\%$)



Sl. 15. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i negativnom reaktivnom snagom (kapacitivno opterećenje, $THDi=10,567\%$, $THDu=2,316\%$)



Sl. 14. Amplitudski spektar mrežne struje - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom



Sl. 16. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i pozitivnom reaktivnom snagom (induktivno opterećenje, $THDi=10,319\%$, $THDu=2,101\%$)

faktorom snage koji nije jedinični (tj. da radi sa faktorom snage između -1 i 1). Drugim rečima, može da kompenzuje reaktivnu snagu ostalih potrošača koji su povezani na istim mrežnim sabirnicama kao i pretvarač sa aktivnim ispravljačem. Preduslov za rad u ovom režimu je da se dimenzionisanjem pogona obezbedi dovoljna strujna margina. Da bi se ilustrovala ova karakteristika pogona, na Sl. 15 i Sl. 16 su prikazani talasni oblici mrežnog napona i struje sa pozitivnom (induktivnom) i negativnom (kapacitivnom) reaktivnom snagom koju pogon razmenjuje sa mrežom. Treba naglasiti da reaktivna snaga nije neophodna za rad ovog pogona, i zato se najčešće podešava da bude jednaka nuli.

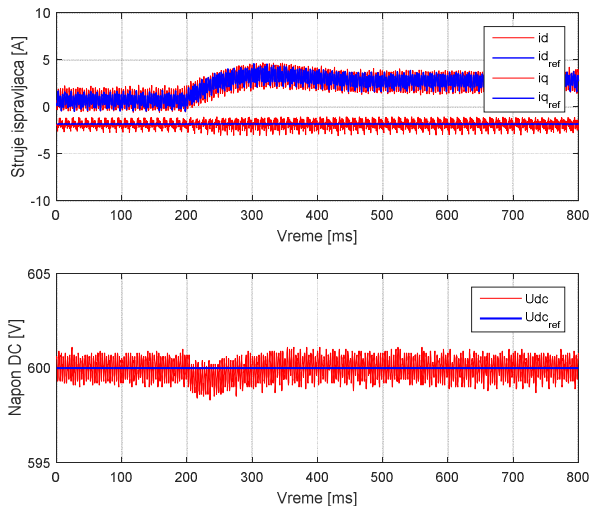
E. Prelazni režimi

Najčešći uzrok promene režima rada aktivnog ispravljača je promena režima rada pogona, uzrokovana promenom opterećenja. Povećanje opterećenja pogona pri radu na konstantnoj brzini dovodi do povećanja snage uzete iz mreže, bez promene ulazne reaktivne snage pretvarača. Ova promena je ilustrovana na slikama 17 i 18, gde su prikazane karakteristične veličine iz ispravljača i invertora (respektivno), odnosno brzina i moment pogona. Sa slika se vidi da povećanje opterećenja dovodi do povećanja aktivne komponente struje ispravljača, bez promene vrednosti reaktivne komponente. Odzivi regulatora struje motora sa vektorskim upravljanjem podešavaju se nezavisno od parametara regulatora struje ispravljača.

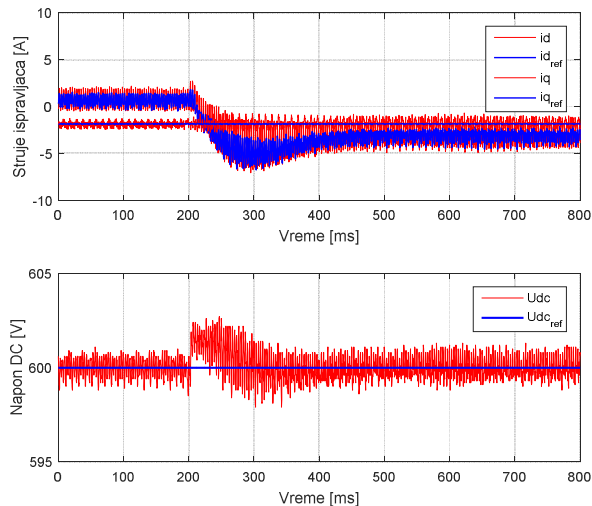
Na slikama 19 i 20 ilustrovana je promena momenta opterećenja pogona koja dovodi do pojave generatorskog režima rada pogona sa rekuperacijom energije u jednosmerno međukolo, odakle se pomoću aktivnog ispravljača vraća u mrežu. Ni u ovom prelaznom procesu ne dolazi do značajne promene reaktivne komponente struje ispravljača, dok aktivna komponenta struje postaje negativna, čime se ostvaruje rad ispravljača sa negativnom aktivnom snagom.

V. ZAKLJUČAK

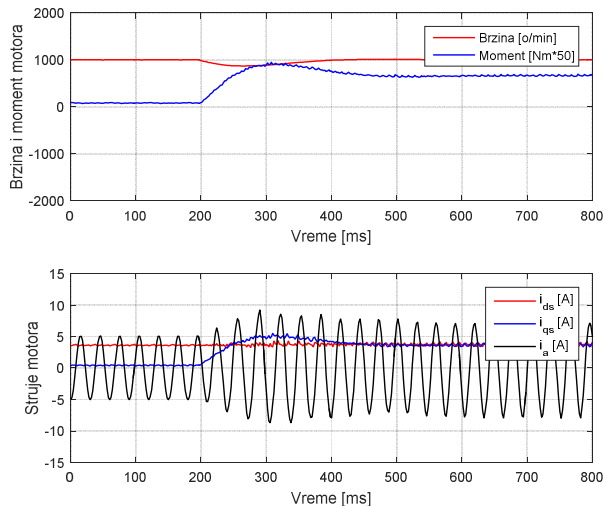
Rad prikazuje mogućnost povećanja energetske efikasnosti industrijskih elektromotornih pogona, što predstavlja kompleksan problem, s obzirom na glavne segmente u kojima energetska efikasnost može i treba da bude unapređena. Značajna ušteda energije može biti postignuta radom pogona u energetski optimalnoj radnoj tački sa stanovišta tehnološkog procesa, naravno uz zadovoljenje zahteva proizvodnje. Odabirom energetski efikasnijih komponenti pogona mogu se smanjiti neizbežni gubici u konverziji električne energije u mehaničku. Ovaj postupak ima nešto veću početnu cenu jer podrazumeva efikasnije motore i pretvarače, ali su zato



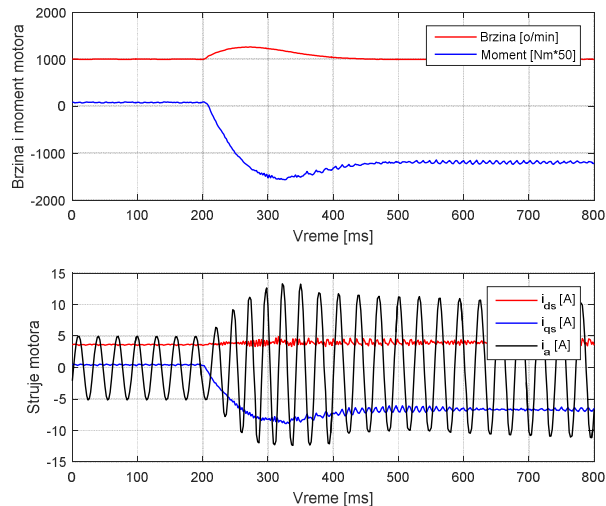
Sl. 17. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina ispravljača pri naglom povećanju opterećenja motora – motorni režim rada: referentne i ostavarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i referentni i ostvareni napon u jednosmernom međukolu



Sl. 19. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina ispravljača pri nagloj promeni opterećenja motora – generatorski režim rada: referentne i ostavarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i referentni i ostvareni napon u jednosmernom međukolu



Sl. 18. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona i invertora pri naglom povećanju opterećenja motora – motorni režim rada: brzina i moment motora, ostvarene vrednosti komponenti struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i fazna struja motora



Sl. 20. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona i invertora pri nagloj promeni opterećenja motora – generatorski režim rada: brzina i moment motora, ostvarene vrednosti komponenti struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i fazna struja motora

troškovi u radu (za energiju) značajno smanjeni, što dovodi do povoljnije ukupne ekonomske računice za korisnika.

Optimizacija gubitaka u motoru i pretvaraču je bitna samo ako su komponente pogona izabrane sa dovoljnom rezervom nominalne snage. Ovo uglavnom jeste slučaj, pošto se odabir vrši prema maksimalno planiranom radnom kapacitetu, što rezultuje čestim radom sa snagom manjom od nominalne. Moderni pretvarači, u svojim upravljačkim sistemima nude prilično jednostavan postupak kojim se ostvaruje navedeni režim rada, što ima za posledicu smanjenje gubitaka u motoru i pretvaraču, bez uticaja na ostale tehničke karakteristike pogona.

Primena regulisanih aktivnih ispravljača kao ulazne komponente frekventnog pretvarača pruža još više mogućnosti

za poboljšanje energetske efikasnosti elektromotornog pogona. Rekuperacija energije u pogonima sa vertikalnim transportom tereta, ili tokom usporavanja pogona koji imaju veliku inerciju su odlučujući faktori za upotrebu regulisanih ispravljača. Takvi pogoni rade sa prostoperiodičnom mrežnom strujom i u motornom i u generatorskom režimu. Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici, ali po potrebi može biti podešen i drugačije kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna snaga ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice kao i pogon sa aktivnim ispravljačem. Ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača. Navedene prednosti čine energetski pretvarač sa aktivnim ispravljačem najboljim izborom za primenu u pogonima, u pogledu energetske efikasnosti i kvaliteta električne energije. Međutim, cena ovakvog pogona ograničava upotrebu ove topologije

pretvarača u većem broju aplikacija, pogotovu u onima gde postoje druge mogućnosti koje su ekonomski isplativije.

ZAHVALNICA

Rad je rezultat istraživačke delatnosti autora na projektu 33016, koji je finansijski podržan od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] B. Jeftinić, S. Štatkić, M. Bebić, L. Ristić, „Multimotor controlled drives and energy efficiency in practice“, Chapter in monograph of national significance „Energy efficiency of electrical drives“, Faculty of technical sciences Čačak, University of Kragujevac, 2012. (in Serbian), ISBN: 978-86-7776-147-9, UDC 621 313, pp 219 – 337
- [2] Marian Kazmierkowski, Frede Blaabjerg, Ramu Krishnan, „Control in Power electronics – selected problems“, Academic Press Elsevier Science, 2002.
- [3] IEEE Standard 519-2014 – „IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems“, <https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>
- [4] IEC/EN 61000-3-2/A14, „Electromagnetic compatibility, part 3: Limits, section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current up to and including 16 A per phase)“, 4th Edition, May 2014.
- [5] Johann W. Kolar; Thomas Friedli, „The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part I“, IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, Volume: 28, Issue: 1, pp 176 - 198, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2197867
- [6] Sam Guccione, Mahesh M. Swamy, Ana Stankovic, „Three-Phase Pulse-Width-Modulated Boost-Type Rectifiers“, Chapter in book „The Power Electronics Handbook“ edited by Timothy L. Skvarenina, CRC Press, 2002.
- [7] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, „Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey“, *IEEE Trans. Indust. Electron.* 45, 691–703 (1998).

- [8] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, „Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors“, *IEEE Trans. Indust. Appl.* 34, 473–479 (1998).
- [9] Qing-Chang Zhong, „Virtual Synchronous Machines: A unified interface for smart grid integration“, *IEEE Power Electronics Magazine*, December 2016

ABSTRACT

Application of active rectifiers in the industrial electric drives with the goal to improve their energy efficiency is analyzed in the paper. Recuperation of braking energy in drives with vertical transport of loads or during slow-down of high inertia drives are decisive factors for use of controlled rectifiers. Such drives operate with sinusoidal input current in both motoring and regenerative regime. Grid power factor of the drive is close to unity, but can be set otherwise if required, to dynamically compensate the reactive power of other consumers on the point of common connection. This is possible only if adequate reserve of converter's rated power is available. These advantages that are experimentally tested in the paper nominate the power converter with active rectifier for the best converter for drive applications, regarding the energy efficiency. The influence of the harmonic distortion of supply voltage to the active rectifier input currents within the frequency converter in the electrical drive is illustrated based on simulation model presented in the paper. The model enables to analyze the drive either in ideal supply voltages, or dangerous, or hard to perform modes of operation.

ACTIVE RECTIFIERS APPLICATION IN ELECTRICAL DRIVES WITH HIGH ENERGY EFFICIENCY

Marko Šinik, Leosava Ristić, Milan Bebić, Saša Štatkić, Dragan Jevtić, Neša Rašić, Bogdan Brković

Simulacioni model trofaznog matričnog pretvarača

Bojan Erceg, Branko Blanuša, Đorđe Lekić

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
bojan.erceg@etf.unibl.org, branko.blanusa@etf.unibl.org, djordje.lekic@etf.unibl.org

Sažetak—U radu je opisan princip rada i matematički model trofaznog matričnog pretvarača s ciljem razvoja simulacionog modela pogodnog za analizu regulisanih elektromotornih pogona. Primjenom matričnih pretvarača izbjegava se potreba za elektrolitskim kondenzatorom u jednosmjernom međukolu, te se značajno smanjuje sadržaj viših harmonika u talasnom obliku ulazne struje. Posebna pažnja u radu je posvećena metodologiji projektovanja LC filtra na ulazu matričnog pretvarača, te opisu zaštitnih kola. Prednosti matričnog pretvarača u odnosu na standardni indirektni AC/AC pretvarač tipa ispravljač-invertor su ilustrovane simulacijom talasnih oblika ulazne struje i izlaznog napona pomoću razvijenog simulacionog modela.

Ključne riječi—matrični pretvarač; simulacioni model; ulazni LC filter; zaštitna kola.

I. UVOD

U posljednjih nekoliko decenija se bilježi stalni porast broja regulisanih elektromotornih pogona u kojima se električni motori napajaju iz energetske pretvarača. Da bi se povećala energetska efikasnost, te istovremeno smanjila cijena pogona, teži se smanjenju broja dodatnih komponenti kao što su transformatori, prigušnice, kondenzatori, otpornici za dinamičko kočenje itd [1], [2]. S druge strane, razvoj savremenih digitalnih signalnih procesora omogućio je implementaciju složenih algoritama upravljanja energetskim pretvaračima sa velikim brojem prekidačkih komponenti. S tim u vezi, primjena matričnih pretvarača danas sve više dobija na značaju, iako su teorijske osnove postavljene još prije 40 godina [3].

Matrični pretvarač je jednostepeni pretvarač koji u opštem slučaju ima niz od $m \times n$ dvosmjernih tranzistorskih prekidača za direktno povezivanje m -faznog naponskog izvora sa n -faznim opterećenjem [2]. Spada u podgrupu naizmjeničnih frekvencijskih pretvarača bez jednosmjernog međukola. Kao takav, matrični pretvarač ne zahtijeva upotrebu elektrolitskog kondenzatora velike vrijednosti kapacitivnosti, što značajno smanjuje cijenu pretvarača i povećava mu životni vijek u odnosu na standardne indirektno AC/AC pretvarače. Matrični pretvarač omogućava dvosmjerni tok energije, te je u tom pogledu ekvivalentan *back-to-back* pretvaraču tipa aktivni ispravljač-invertor i pogodan je za primjenu u regulisanim elektromotornim pogonima i električnim vozilima. Primjenom upravljačkih algoritama zasnovanih na modulaciji prostornog vektora (eng. SVPWM – *Space Vector Pulse Width Modulation*) moguće je postići prostoperiodične talasne oblike ulazne struje i izlaznog napona, te potpunu kontrolu faktora snage na ulazu matričnog pretvarača. U poređenju sa standardnim indirektnim AC/AC pretvaračima sa diodnim ispravljačem na ulazu, matrični pretvarač izaziva manja harmonijska izobličenja u priključnoj mreži [4].

U ovom radu se razmatra trofazni matrični pretvarač sa ciljem razvoja simulacionog modela pogodnog za analizu regulisanih elektromotornih pogona. Opšti princip rada, konfiguracije dvosmjernih prekidača i komutacione strategije će biti analizirane u drugom poglavlju. U trećem poglavlju će biti opisan postupak projektovanja ulaznog LC filtra, kao i topologije zaštitnih kola. Rezultati uporedne analize trofaznog matričnog pretvarača i standardnog indirektnog AC/AC pretvarača tipa ispravljač-invertor će biti dati u četvrtom poglavlju. Analiza će biti sprovedena poređenjem karakterističnih talasnih oblika ulaznih i izlaznih veličina za dva tipa opterećenja.

II. TROFAZNI MATRIČNI PRETVARAČ

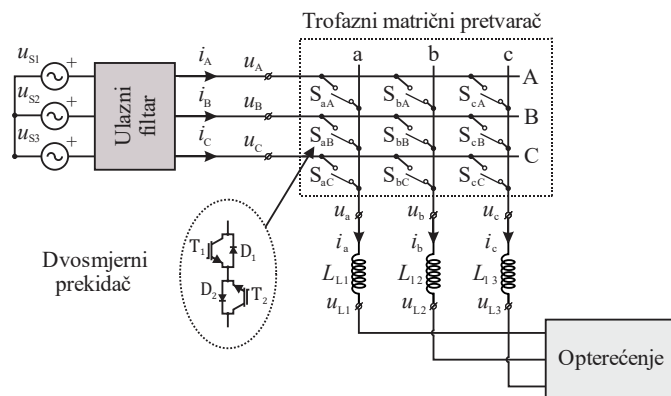
Topologija trofaznog matričnog pretvarača formirana je korišćenjem devet dvosmjernih četvorokvadrantnih prekidača složenih u matricu, kao što je prikazano na Sl. 1. Prekidači imaju mogućnost da provode struju u oba smjera i da blokiraju napon oba polariteta.

A. Opšti princip rada

Prekidačka funkcija prekidača trofaznog matričnog pretvarača definisana je sa [2], [4]:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{prekidač } S_{ij} \text{ zatvoren} \\ 0, & \text{prekidač } S_{ij} \text{ otvoren} \end{cases} \quad (1)$$

gdje $i \in \{a, b, c\}$ predstavlja oznaku izlazne faze (kolona matrice), dok $j \in \{A, B, C\}$ predstavlja oznaku ulazne faze (vrsta matrice). Pri tome je potrebno voditi računa da u svakoj koloni u datom trenutku mora biti uključen samo jedan prekidač. Na taj način se spriječava pojava kratkog spoja ulaznih faza i prekidanje izlazne struje trofaznog opterećenja.



Sl. 1. Topologija trofaznog matričnog pretvarača sa filtrom na ulazu i opterećenjem na izlazu pretvarača

Prethodno navedena ograničenja se mogu predstaviti sljedećom relacijom [2], [4]:

$$s_{iA} + s_{iB} + s_{iC} = 1, \quad i \in \{a, b, c\}. \quad (2)$$

Uzimajući u obzir navedena ograničenja, broj mogućih stanja trofaznog matičnog pretvarača se smanjuje sa 512 (2^9) mogućih na 27 dozvoljenih i ona su prikazana u tabeli I.

TABELA I. DOZVOLJENA STANJA PREKIDAČA TROFAZNOG MATIČNOG PRETVARAČA [5]

a	b	c	S _{aA}	S _{aB}	S _{aC}	S _{bA}	S _{bB}	S _{bC}	S _{cA}	S _{cB}	S _{cC}
A	A	A	1	0	0	1	0	0	1	0	0
B	B	B	0	1	0	0	1	0	0	1	0
C	C	C	0	0	1	0	0	1	0	0	1
A	C	C	1	0	0	0	0	1	0	0	1
B	C	C	0	1	0	0	0	1	0	0	1
B	A	A	0	1	0	1	0	0	1	0	0
C	A	A	0	0	1	1	0	0	1	0	0
C	B	B	0	0	1	0	1	0	0	1	0
A	B	B	1	0	0	0	1	0	0	1	0
C	A	C	0	0	1	1	0	0	1	0	0
C	B	C	0	0	1	0	1	0	0	0	1
A	B	A	1	0	0	0	1	0	1	0	0
A	C	A	1	0	0	0	0	1	1	0	0
B	C	B	0	1	0	0	0	1	0	1	0
B	A	B	0	1	0	1	0	0	0	1	0
C	C	A	0	0	1	0	0	1	1	0	0
C	C	B	0	0	1	0	0	1	0	1	0
A	A	B	1	0	0	1	0	0	0	1	0
A	A	C	1	0	0	1	0	0	0	0	1
B	B	C	0	1	0	0	1	0	0	0	1
B	B	A	0	1	0	0	1	0	1	0	0
A	B	C	1	0	0	0	1	0	0	0	1
A	C	B	1	0	0	0	0	1	0	1	0
B	A	C	0	1	0	1	0	0	0	0	1
B	C	A	0	1	0	0	0	1	1	0	0
C	A	B	0	0	1	1	0	0	0	1	0
C	B	A	0	0	1	0	1	0	1	0	0

Veza između izlaznih i ulaznih napona trofaznog matičnog pretvarača uspostavlja se preko matrice prenosa, koja predstavlja matricu stanja prekidača matičnog pretvarača u posmatranom trenutku [2], [4], [5]:

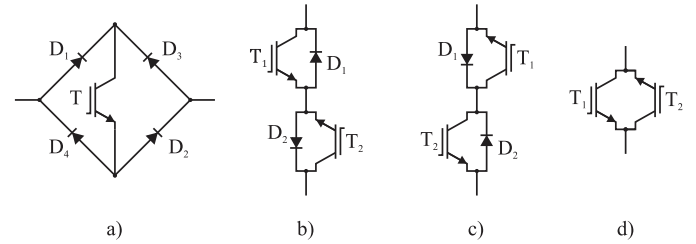
$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{aA}(t) & s_{aB}(t) & s_{aC}(t) \\ s_{bA}(t) & s_{bB}(t) & s_{bC}(t) \\ s_{cA}(t) & s_{cB}(t) & s_{cC}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Veza između ulaznih i izlaznih struja uspostavlja preko transponovane matrice prenosa [2], [4], [5]:

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{aA}(t) & s_{bA}(t) & s_{cA}(t) \\ s_{aB}(t) & s_{bB}(t) & s_{cB}(t) \\ s_{aC}(t) & s_{bC}(t) & s_{cC}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

B. Konfiguracije dvosmjernih prekidačkih ćelija

Za realizaciju matičnog pretvarača potrebni su dvosmjerni prekidači koji se dobijaju kombinacijom više jednosmjernih prekidača u vidu tzv. prekidačkih ćelija (Sl. 2).



Sl. 2. Konfiguracije dvosmjernih prekidača: (a) konfiguracija diodnog mosta sa IGBT prekidačem u središnjem dijelu, (b) konfiguracija antiparalelnih IGBT prekidača sa zajedničkim emiterom, (c) konfiguracija antiparalelnih IGBT prekidača sa zajedničkim kolektorom, (d) konfiguracija antiparalelno vezanih IGBT prekidača.

Konfiguracija sa Sl. 2 (a) koristi samo jednu tranzistorsku prekidačku komponentu za oba smjera struje, što predstavlja prednost u odnosu na ostale tri konfiguracije. Međutim, kada je prekidačka ćelija sa Sl. 2 (a) uključena, struju vode tri prekidačke komponente, jedan tranzistor i dvije diode, što povećava kondukcione gubitke [2], [4].

Konfiguracije prikazane na Sl. 2 (b) i Sl. 2 (c) se najčešće koriste pri projektovanju prekidačkih ćelija matičnih pretvarača [2]. Obje konfiguracije sastoje se od dvije diode i dva antiparalelno povezana IGBT-a. Funkcija dioda je povećanje sposobnosti blokiranja napona na prekidačkoj ćeliji, dok IGBT prekidači omogućavaju nezavisnu kontrolu smjera struje. U slučaju uključene prekidačke ćelije sa Sl. 2 (b) ili Sl. 2 (c), uvijek vode dvije prekidačke komponente, jedna dioda i jedan tranzistor, što rezultuje smanjenjem kondukcioni gubitaka u odnosu na konfiguraciju prikazanu na Sl. 2 (a). Nedostatak ove konfiguracije ogleda se u potrebi za korišćenjem međusobno izolovanih drajverskih kola za kontrolu IGBT prekidača T_1 i T_2 .

U konfiguraciji prikazanoj na Sl. 2 (d) funkciju dvosmjernog prekidača obavljaju dva antiparalelno vezana NPT-IGBT-a koji imaju sposobnost blokiranja inverznog napona na prekidaču [2]. Osnovna prednost ove konfiguracije je smanjen broj poluprovodničkih komponenti (nema dioda), a samim tim su manji i kondukcioni gubici, jer u trenutku vođenja vodi samo jedna prekidačka komponenta.

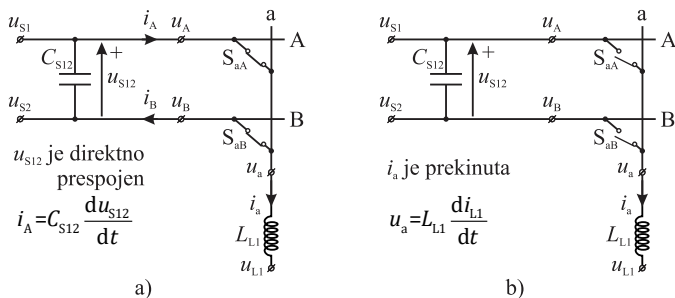
Složenost konfiguracija prekidačkih ćelija matičnog pretvarača za konfiguracije sa Sl. 2, ogleda se kroz broj upotrebljenih tranzistora, dioda i broj izolovanih drajverskih kola potrebnih za kontrolu IGBT prekidača i ona je ilustrovana tabelom II.

TABELA II. KOMPLEKSNOŠT KONFIGURACIJA PREKIDAČA [2]

Topologija prekidača	Broj tranzistora	Broj dioda	Broj drajverskih kola
Sl. 2 (a)	9	36	9
Sl. 2 (b)	18	9	18
Sl. 2 (c)	18	9	18
Sl. 2 (d)	18	0	18

C. Komutacione strategije

U skladu sa relacijom (2), dva prekidača iz iste kolone matričnog pretvarača ne smiju biti istovremeno uključena. U suprotnom bi došlo do kratkog spoja između dvije ulazne faze, Sl. 3 (a), što bi imalo za posljedicu oštećenja prekidača usljed proticanja prekomjerne struje (i_A). S druge strane, mora biti uključen jedan prekidač u svakoj koloni. U suprotnom bi došlo do prekidanja izlazne struje, što bi u slučaju pretežno induktivnog opterećenja na izlazu matričnog pretvarača dovelo do pojave prenapona na prekidačima, što je ilustrovano na Sl. 3 (b) [2], [4], [7].



Sl. 3. Nedorazumljiva stanja prekidača matričnog pretvarača: (a) kratak spoj između dvije ulazne faze, (b) prekid struje induktivnog opterećenja.

Iz navedenog se zaključuje da bi dvosmjerni prekidači morali da imaju sposobnost promjene stanja uključenosti, tako da se izbjegne pojava kratkih spojeva i iznenadnih prekida induktivnih struja opterećenja. Ova dva zahtjeva su protivrječna, jer prekidači ne mogu trenutno promijeniti svoje stanje uključenosti. Za obezbjeđenje sigurne komutacije struja, odnosno za izbjegavanje poteškoća koje su propratna pojava promjene stanja prekidača matričnog pretvarača, predloženi su različiti metodi [2]–[4], [6]–[8]:

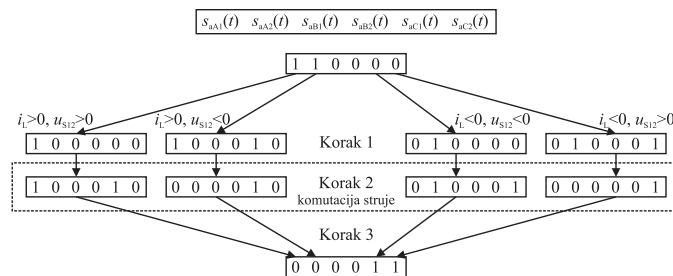
- komutaciona strategija zasnovana na postojanju mrtvog vremena,
- četvorokoračna komutaciona strategija,
- dvokoračna komutaciona strategija,
- dvokoračna komutaciona strategija sa pametnim kolom za kontrolu IGBT prekidača,
- dvokoračna komutaciona strategija sa pametnim kolom za kontrolu IGBT prekidača sa kompenzacionim vremenskim kašnjenjem,
- četvorokoračna komutaciona strategija zasnovana na mjerenju linijskog napona na ulazu pretvarača,
- METZI komutacioni metod i
- trokoračni komutacioni proces zasnovan na određivanju polariteta napona i polariteta struje opterećenja.

U nastavku će biti objašnjen trokoračni komutacioni proces zasnovan na određivanju polariteta linijskog napona na ulazu pretvarača i polariteta struje opterećenja, jer će on biti iskorišćen pri formiranju simulacionog modela trofaznog matričnog pretvarača u ovom radu. Ova komutaciona strategija podrazumijeva da su istovremeno pobuđena oba IGBT-a u prekidačkoj ćeliji koja vodi, čime se obezbijuje brza promjena smjera struje. Poznavanjem smjera struje opterećenja i polariteta ulaznog linijskog napona između prekidačke ćelije

koja se isključuje, tj. *off-going* ćelije, i prekidačke ćelije koja se uključuje, tj. *on-going* ćelije, definišu se pravila komutacije. Postoje dvije različite trokoračne komutacione sekvence koje zavise od polariteta ulaznog linijskog napona. Ako je struja opterećenja pozitivna, koriste se sljedeće dvije komutacione sekvence [2]:

- sekvenca 1 ($u_{S12} > 0$): u prvom koraku IGBT prekidač koji ne vodi struju u *off-going* ćeliji je isključen, dok je IGBT prekidač koji vodi struju u *on-going* ćeliji istovremeno uključen. U drugom koraku, IGBT prekidač u *off-going* prekidačkoj ćeliji ostaje i dalje isključen, dok je u trećem koraku IGBT prekidač koji neće voditi struju u *on-going* prekidačkoj ćeliji uključen.
- sekvenca 2 ($u_{S12} < 0$): u prvom koraku, prvo se IGBT prekidač koji ne vodi struju u *off-going* prekidačkoj ćeliji isključuje. U drugom koraku, IGBT prekidač koji vodi struju u *on-going* prekidačkoj ćeliji se uključuje. U trećem koraku, IGBT prekidač u *off-going* prekidačkoj ćeliji i dalje je isključen, a istovremeno IGBT prekidač koji neće voditi struju u *on-going* prekidačkoj ćeliji je uključen.

Dijagram stanja komutacionog procesa trokoračne komutacije zasnovane na mjerenju i određivanju polariteta struje opterećenja i polariteta linijskog napona na ulazu pretvarača između dvije prekidačke ćelije, za oba smjera struje opterećenja prikazana je na Sl. 4. Pravougaonik omeđen isprekidanom linijom pokazuje stanje prekidačke sekvence komutacije struje.



Sl. 4. Dijagram stanja trokoračnog komutacionog procesa zasnovanog na određivanju polariteta ulaznog napona pretvarača i struje opterećenja [2]

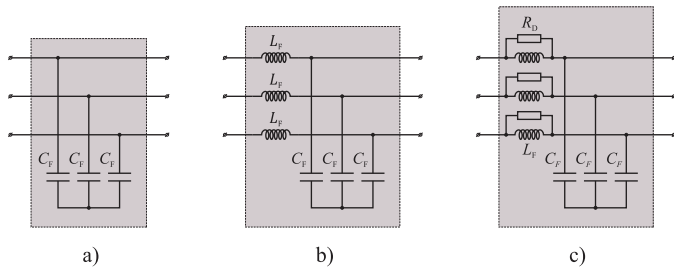
III. ULAZNI FILTAR I ZAŠTITNA KOLA MATRIČNOG PRETVARAČA

A. Ulazni filter

Ulazni filter povezuje naizmjenični izvor napajanja sa ulazom matričnog pretvarača, sprječava injektiranje viših harmonika struje prema naizmjeničnom izvoru i smanjuje fluktacije izlaznog napona tokom upravljačkog ciklusa. Ulazni filter kod matričnih pretvarača treba da ispuni sljedeće zahtjeve [4], [9]–[11]:

- prigušenje šuma izazvanog radom dvosmjernih prekidača,
- mali ugaoni pomjeraj između ulaznog napona i struje,
- mala vrijednost izlazne impedanse filtra i
- osiguranje stabilnosti cijelog sistema.

Na Sl. 5 prikazane su tipične topologije ulaznog filtra matričnog pretvarača. Da bi kapacitivni filtar sa Sl. 5 (a) zadovoljio EMI (eng. *Electromagnetic Interference*) standarde, koji se odnose na prigušenje viših harmonika u spektru izlaznog napona i ulazne struje, on mora biti većih dimenzija [4], [11]. S druge strane, kako čisto kapacitivni filtar unosi fazni pomjeraj između ulaznih struja filtra i odgovarajućih faznih napona, on se zamjenjuje sa induktivno-kapacitivnim (LC) filtrom prikazanim na Sl. 5 (b). Ako je poznat harmonijski spektar ulazne struje pretvarača, moguće je projektovati LC filtar tako da se određeni harmonici struje priguše. Zbog postojanja nesimetrije u vremenskom pomijeranju upravljačkih signala mogu se pojaviti i neželjeni subharmonici struje koje LC filtar ne prigušuje i čija vrijednost može biti znatna. Iz tog razloga se induktivnosti filtra L_F u svakoj fazi paralelno dodaje otpornik otpornosti R_D . Topologija LC filtra sa otpornikom za prigušenje je prikazana na Sl. 5 (c).



Sl. 5. Topologije ulaznog filtra: (a) kapacitivni filtar, (b) LC filtar, (c) LC filtar sa otpornikom za prigušenje

Imajući u vidu da se matrični pretvarač na ulaznoj strani može posmatrati kao strujni izvor, za ulazni filtar matričnog pretvarača obično se uzima LC filtar, sa ili bez otpornika za prigušenje. U nastavku će biti objašnjen način projektovanja ulaznog LC filtra, jer će on biti korišten pri formiranju simulacionog modela trofaznog matričnog pretvarača u ovom radu.

Kapacitivnost ulaznog LC filtra određuje se na osnovu reaktivne snage filtra koja je data izrazom [10]:

$$Q_C = 3 \cdot \omega_s \cdot C_F \cdot U_n^2 \leq 0,075 \cdot P_n, \quad (5)$$

gdje je: ω_s – ugaona učestanost naizmjeničnog izvora napajanja, C_F – kapacitivnost filtra po fazi, U_n – nominalni napon i P_n – nominalna snaga pretvarača. Relacija (5) izvedena je uz zanemarenje reaktivne snage prigušnice u sklopu ulaznog LC filtra. Iz relacije (5) dobijamo vrijednost kapacitivnosti po fazi ulaznog LC filtra [10]:

$$C_F \leq \frac{P_n}{40 \cdot \omega_s \cdot U_n^2}. \quad (6)$$

Druga karakteristična veličina ulaznog LC filtra matričnog pretvarača je rezonantna frekvencija:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_F \cdot C_F}}. \quad (7)$$

Rezonantnu frekvenciju f_{rez} treba izabrati tako da bude mnogo veća od frekvencije naizmjeničnog izvora, a manja od prekidačke frekvencije pretvarača f_{SW} . Tipično, rezonantna

frekvencija je oko 20 puta viša od frekvencije naizmjeničnog izvora i oko tri manja od prekidačke frekvencije pretvarača [9]–[11].

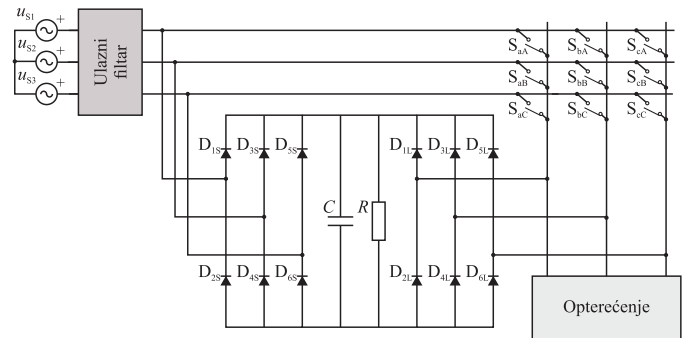
Iz relacije (7) dobijamo treću karakterističnu veličinu ulaznog LC filtra:

$$L_F > \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{rez}^2 \cdot C_F}. \quad (8)$$

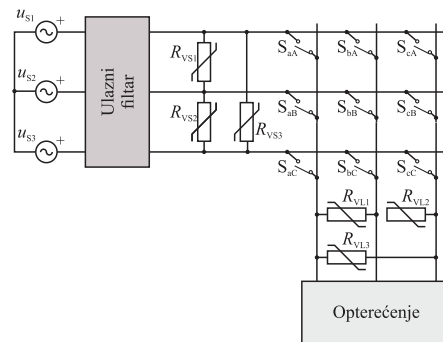
Iz navedene procedure projektovanja ulaznog LC filtra zaključujemo da mora postojati kompromis pri izboru vrijednosti kapacitivnosti i induktivnosti. Male vrijednosti kapacitivnosti kondenzatora osiguravaju visoke vrijednosti faktora snage gledano sa strane mreže, što je poželjno [9]–[11]. S druge strane, male vrijednosti kapacitivnosti zahtijevaju relativno velike vrijednosti induktivnosti prigušnice da bi se osigurala odgovarajuća rezonantna frekvencija, što rezultuje velikim padom napona na ulaznom filteru.

B. Zaštitna kola

Uloga zaštitnih kola je da spriječe negativne posljedice prenapona ili strujnih preopterećenja. Prenaponi se pojavljuju usljed smetnji u mreži ili usljed nepreciznosti u upravljanju dvosmjernim prekidačima, što može dovesti do prekida konture struje opterećenja. Ovo je naročito izraženo kada je na izlazu pretvarača povezano pretežno induktivno opterećenje. Strujno preopterećenje, takođe se javlja usljed nepreciznosti u upravljanju dvosmjernim prekidačima, kada dođe do kratkog spoja dvije ulazne faze ili usljed zemljospoja. Tipična zaštitna kola matričnih pretvarača su prikazana na Sl. 6 i Sl. 7 [2], [4].



Sl. 6. Matrični pretvarač sa zaštitnim kolom od dvanaest dioda



Sl. 7. Matrični pretvarač sa varistorima kao zaštitom od prenapona

Zaštitno na Sl. 6 sastoji se od ulaznih i izlaznih diodnih mostova i kondenzatorskog bloka, koga čine elektrolitski kondenzator i njegovo kolo za punjenje i pražnjenje. Ovo je najčešće rješenje za izbjegavanje prenapona koji dolaze iz mreže ili od motora vezanog na izlaz matičnog pretvarača. Ovakvo zaštitno kolo obezbjeđuje zaštitu matičnog pretvarača i sa ulazne i izlazne strane. U slučaju prinudne komutacije, abnormalnog rada motora ili prekidanja konture struje opterećenja, matični pretvarač se odvajaju od opterećenja i do pojave prenapona na dvosmjernim prekidačima ne dolazi, jer se akumulirana energija u induktivnostima opterećenja preko diodnog mosta prenosi u kapacitivni blok. Kondenzator u kapacitivnom bloku se prazni preko otpornika. U normalnom radu, diode u diodnim mostovima su isključene, pa zaštitno kolo nema nikakav uticaj na rad matičnog pretvarača. Prednosti ovog tipa zaštite su jednostavnost, mali hardverski zahtjevi i jednostavne strategije kontrole. Međutim, nedostatak predstavlja korišćenje dvanaest dioda.

Zaštitno kolo na Sl. 7 sastoji se od varistora povezanih na ulaz i izlaz pretvarača. Ovakva zaštita matičnog pretvarača od prenapona omogućuje uklanjanje velikog i skupog diodnog zaštitnog kola. Varistori vezani na ulaz pretvarača štite matični pretvarač od prenapona koji dolaze iz mreže, dok varistori na izlazu pretvarača štite matični pretvarač od neprecizne komutacije prekidača ili od naglog (prisilnog) isključenja pretvarača. Tokom normalnog radnog stanja, gubici snage na varistorima su zanemarljivi. Nažalost, varistori vezani u trougao nisu sami dovoljni da garantuju zaštitu IGBT-ova, pa se u ovom slučaju svaki IGBT štiti posebno, tako što se u kolo gej-t-kolektor dodaje *suppressor* dioda [2].

IV. MODEL TROFAZNOG MATIČNOG PRETVARAČA I REZULTATI SIMULACIJE

U modelu trofaznog matičnog pretvarača iskorišćena je konfiguracija prekidačkih ćelija prikazana na Sl. 2 (b). Algoritam upravljanja prekidačima zasniva se na *Indirect Space Vector Modulation*, koja je opisana u [12], [13]. Ovakav tip modulacije omogućava direktnu kontrolu ulazne struje i izlaznog napona pretvarača, što omogućava kontrolu faktora snage gledano sa strane izvora napajanja.

Rezultati simulacije sastoje se iz dva dijela. Prvi dio je simulacija trofaznog matičnog pretvarača za opterećenje u vidu konstantne impedanse, prema podacima iz tabele III, dok drugi dio daje uporednu analizu talasnih oblika ulazne struje trofaznog matičnog pretvarača i standardnog indirektnog AC/AC pretvarača tipa ispravljač–invertor za opterećenje u vidu trofaznog asinhronog motora, prema podacima iz tabele IV. U okviru poređenja talasnih oblika analizira se totalna harmonijska distorzija (eng. THD – *Total Harmonic Distortion*) ulazne struje, koja se računa prema [14]:

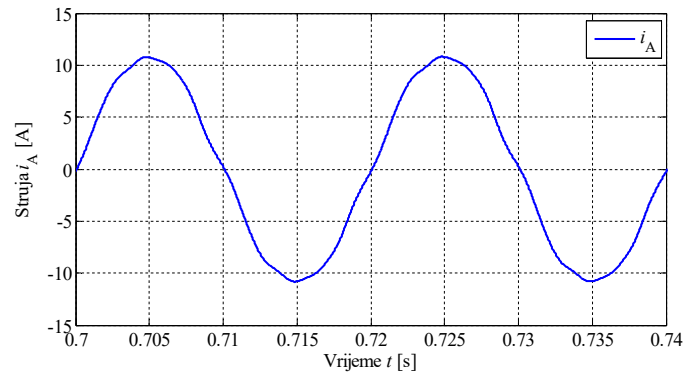
$$THD_i = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1}, \quad (9)$$

gdje je I efektivna vrijednost ulazne struje, a I_1 efektivna vrijednost osnovnog harmonika ulazne struje. U oba slučaja prekidačka frekvencija matičnog pretvarača iznosi $f_{sw} = 10$ kHz [10].

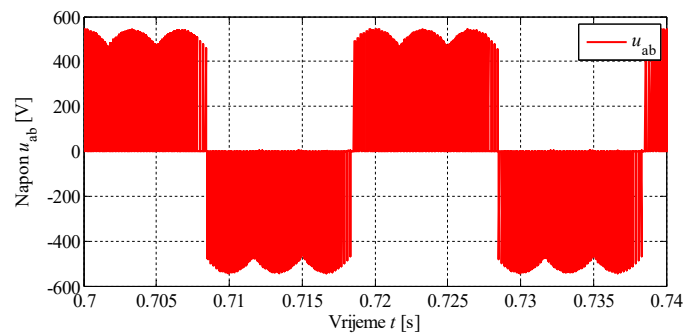
TABELA III. VRIJEDNOST ULAZNIH PARAMETARA - SIMULACIJA 1

Naizmjenični izvor napajanja	Ulazni LC filter	RL opterećenje
$U_s = 220$ V	$L_F = 0,99$ mH	$R_L = 22$ Ω
$f_s = 50$ Hz	$C_F = 4,11$ μ F	$L_L = 10$ mH

U talasnom obliku ulazne struje na Sl. 8 osim osnovnog harmonika javljaju se harmonici na učestanostima oko prekidačke učestanosti, koji po vrijednosti amplitude mogu biti uporedivi sa osnovnim harmonikom. Da bi se smanjila harmonijska distorzija ulazne struje, potrebno je koristiti ulazni filter. Totalna harmonijska distorzija ulazne struje za vrijednosti ulaznog filtra i za opterećenja iz tabele III iznosi 3,32 %. Izlazni napon svake faze matičnog pretvarača može da ima vrijednost jednog od ulaznih napona u_A , u_B , ili u_C . Na Sl. 9 prikazan je talasni oblik napona u_{ab} .



Sl. 8. Talasni oblik ulazne struje $i_A(t)$

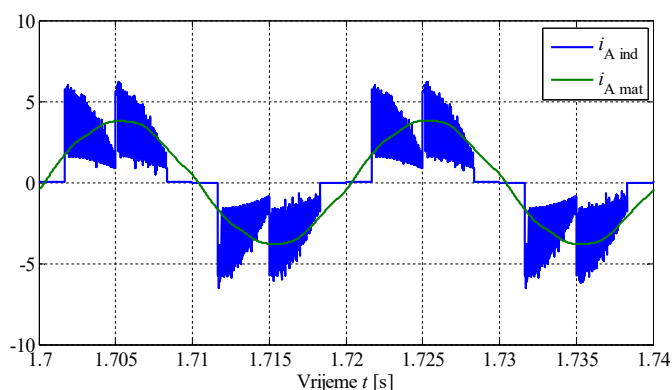


Sl. 9. Talasni oblik izlaznog napona $u_{ab}(t)$

TABELA IV. VRIJEDNOST ULAZNIH PARAMETARA - SIMULACIJA 2

Naizmjenični izvor napajanja	Ulazni LC filter	Opterećenje u vidu trofaznog asinhronog motora	
$U_s = 220$ V $f_s = 50$ Hz	$L_F = 0,49$ H $C_F = 0,827$ μ F	$U_n = 220/Y380$ V	$R_s = 10$ Ω
		$I_n = 3,6/2,1$ A	$R_r = 6,3$ Ω
		$P_n = 0,75$ kW	$L_{\sigma n} = 43,07$ mH
		$\cos\phi_n = 0,72$	$L_{\sigma r} = 40,11$ mH
		$n_n = 1390$ o/min	$L_m = 0,4212$ H
		$f_n = 50$ Hz	$p = 2$
		$J_m = 0,01$ kgm ²	

Talasi oblici ulazne struje trofaznog matičnog pretvarača i standardnog indirektnog AC/AC pretvarača tipa ispravljač-invertor za opterećenje iz tabele IV prikazani su na Sl. 10. Poređenjem dobijenih talasnih oblika vidimo da je osnovna prednost trofaznog matičnog pretvarača u odnosu na standardni indirektni pretvarač (ispravljač-invertor) prostoperiodični talasni oblik ulazne struje. Totalna harmonijska distorzija ulazne struje trofaznog matičnog pretvarača iznosi 2,77 %, dok kod indirektnog AC/AC pretvarača tipa ispravljač-invertor iznosi 68,83 % za isti tip opterećenja. Takođe, matični pretvarač ne zahtijeva velike vrijednosti kapacitivnosti kondenzatora. Vrijednost kondenzatora ulaznog filtra matičnog pretvarača u simulaciji je iznosila 0,827 μF , dok je vrijednost kondenzatora u jednosmjernom međukolu indirektnog pretvarača iznosila 50 μF .



Sl. 10. Talasni oblik ulazne struje $i_A(t)$

ZAKLJUČAK

U radu je opisan i analiziran simulacioni model trofaznog matičnog pretvarača pogodan za analizu regulisanih elektromotornih pogona, te su date njegove prednosti i mane u odnosu na standardni indirektni AC/AC pretvarač tipa ispravljač-invertor. Poređenje je izvršeno uporednom analizom talasnih oblika ulazne struje pretvarača. Korišćenje trofaznog matičnog pretvarača u regulisanim elektromotornim pogonima izaziva znatno manja harmonijska izobličenja u priključnoj mreži. Takođe, naveden je značaj ulaznog filtra trofaznog matičnog pretvarača bez kog bi ulazna struja u svom talasnom obliku imala i harmonike na učestanostima oko prekidačke učestanosti, koji po vrijednosti amplitude mogu biti uporedivi sa osnovnim harmonikom.

LITERATURA

- [1] P. Nielsen, The Matrix Converter for an Induction Motor Drive, Danfoss, 1996.
- [2] P. Szczesniak, Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology, London: Springer, 2013.

- [3] A. Alesina and M. G. Venturini, "Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 101-112, 1989.
- [4] B. L. Dokić, B. Blanuša, Ž. Ivanović, Energetski pretvarači u obnovljivim izvorima, Beograd: Akademski misao, 2013.
- [5] G. Tadra, Z. Fedyczak, P. Szcześniak, "Model Predictive Control Circuit of the Current Source Matrix Converter," in *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 3, pp. 136-145, 2015.
- [6] A. A. Venturini M, "The generalised transformer: A new bidirectional, sinusoidal waveform frequency converter with continuously adjustable input power factor," in *Power Electronics Specialists Conference*, 1980.
- [7] N. Burany, "Safe control of four-quadrant switches," in *Conference record of the IEEE industry applications conference annual meeting*, 1989.
- [8] M. Ziegler and W. Hofmann, "Semi natural two steps commutation strategy for matrix converters," in *Power electronics specialists conference*, Fukuoka, 1998.
- [9] J. Bauer, S. Fligl and A. Steimel, "Design and Dimensioning of Essential Passive Components for the Matrix Converter Prototype," *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, vol. 53, no. 3, pp. 225-235, 2012.
- [10] H. She, H. Lin, X. Wang and L. Yue, "Damped Input Filter Design of Matrix Converter," in *Power Electronics and Drive Systems*, Honolulu, 2009.
- [11] H. She, H. Lin, X. Wang and L. Yue, "Systematic Input Filter Design of Matrix Converter by Analytical Estimation of RMS Current Ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 62, no. 1, pp. 132-143, 2014.
- [12] L. Huber and D. Borojevic, "SpaceVector Modulated Three-Phase to Three-Phase Matrix Converter With Input Power Factor Correction," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 6, pp. 1234 - 1246, 1995.
- [13] S. M. Dabour and E. M. Rashad, "Analysis and implementation of space-vector-modulated three-phase matrix converter," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 8, pp. 1374 - 1378, 2012.
- [14] A. Bargini, Handbook of Power Quality, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2008.

ABSTRACT

This paper describes the operation principle and the mathematical model of a three-phase matrix converter. The developed model is suitable for simulation of controlled electric drives. Matrix converters do not require DC a bus capacitor, while the content of higher order harmonics of the input current waveform is significantly reduced. The design methodology of LC filter at the input of the matrix converter is outlined, and a description of the protective circuits is presented. Advantages of a matrix converter in comparison to a standard indirect AC / AC converter are illustrated by simulation of waveforms of the input current and output voltage using the developed simulation model.

SIMULATION MODEL OF THREE-PHASE MATRIX CONVERTER

Bojan Erceg, Branko Blanuša, Đorđe Lekić



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017

3 - 4. novembar, Banja Luka

Sesija E2

Sesija E2

Atila Juhas, Platon Sovilj, Vladimir Vujičić

SOFTVERSKA I HARDVERSKA PODRŠKA TROFAZNYM MERENJIMA U ED MREŽI84

Miloš Daković, Budimir Lutovac, Tomislav Šekara

RAZDVAJANJE POTROŠAČA ZASNOVANO NA NEINVAZIVNOM PRAĆENJU POTROŠNJE90

Dejan Ivić, Darko Šošić, Predrag Stefanov

PRIMJENA DC PORTOVA PRI ZATVARANJU PETLJI U DISTRIBUTIVNYM MREŽAMA94

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg

METOD ZA ODREĐIVANJE UTICAJA PREPREKA NA GODIŠNJU PROIZVODNJU FOTONAPONSKIH SISTEMA.....100

Danijela Vuković, Jovan Šetrajčić, Siniša Vučenović

UTICAJ TANKIH PREVLAKA NA POVEĆANJE EFIKASNOSTI FOTONAPONSKE KONVERZIJE106

Ernad Šabanović, Marko Ikić, Slobodan Lubura, Milomir Šoja

INTEGRISANI FOTONAPONSKI SISTEMI110

Milan Paripović

OPTIMIZACIJA ODRŽAVANJA NAPAJANJA TELEKOMA UVOĐENJEM NOVIH METODA I MJERENJA115

Softverska i hardverska podrška trofaznim mjerenjima u ED mreži

Atila Juhas¹, Platon Sovilj¹, Vladimir Vujičić²

¹ Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

² Institut tehničkih nauka Srpske akademije nauka i umetnosti, Beograd, Srbija

Sažetak— U uvodnom poglavlju je ukratko opisan problem prepoznavanja opterećenja (engl. – load) u proizvodnom procesu ili u elektrodistributivnoj (ED) mreži, kao i odgovarajući hardver. Kako je prepoznavanje opterećenja složen problem koji spada u oblast veštačke inteligencije, učenja i obuke, pokazalo se da je korisno efikasno vizuelizovati izmerene podatke i omogućiti operateru da nadgleda, analizira i unapređuje postupak prepoznavanja. Prikazani softver je dizajniran i realizovan upravo za tu namenu. On u dva nivoa rešava problem vizualizacije i, kako je praksa pokazala, predstavlja vrlo koristan i efikasan alat za navedenu namenu.

Ključne riječi — softver; hardver; merenje; stohastika; prepoznavanje opterećenja;

I. UVOD

Stohastička digitalna merena metoda (SDMM) [1] se karakteriše hardverom koji je ekstremno jednostavan, robustan, pouzdan i tačan. Ona omogućuje potpuno paralelna merenja i potpuno paralelnu obradu obradu mernih podataka. Kako radi sa jednostavnim dvobitnim fleš AD konvertorima, ima vrlo širok propusni opseg, sa jedne strane, a ključna operacija u obradi podataka MAC (Multiply and Accumulate) se jednostavnim hardverom izvodi u jednom taktu, sa druge strane. Posledica ove činjenice je izuzetno visoka brzina obrade izmerenih podataka i visoka efektivna rezolucija izmerenih podataka u vremenskom i frekvencijskom domenu. U radu je pokazano da ona omogućuje i vrlo efikasan nadzor nad ED mrežom i tehnološkim procesima.

II. 2. UVODNO POGLAVLJE

Električna energija je najplemenitiji vid energije i, direktno ili indirektno, ključni je faktor u većini tehnoloških procesa. Direktno – kao fino regulisana mehanička energija (energija za pogon elektromotora), ili kao fino regulisana toplotna energija (energija potrebna za grejanje i hlađenje), ili kao fino regulisana hemijska energija (energija potrebna za procese elektrolize ili sinteze). Indirektno, ne manje važna, primena je u upravljačkim elementima i sistemima koji upravljaju tehnološkim procesima (regulatori, releji, snažni tranzistori, tiristori, različita elektronska kola – bilo analogna, bilo digitalna, itd.).

Ako se mere i snimaju napon, struja, snaga i energija na ulaznom napojnom vodu tehnološkog pogona, moguće je dobiti bitne informacije o tehnološkom procesu u off-line obradi snimljenih podataka. One mogu da posluže u analizi i unapređenju procesa, a posebno, u povećanju njegove ekonomičnosti. Svako opterećenje u procesu se „potpisuje“ prilikom svog uključivanja ili isključenja i to se na snimcima jasno vidi. U slučaju jednostavnijih tehnoloških procesa, sam

rukovalac to može da vidi i analizira, ako ima odgovarajući softver za vizuelizaciju. Međutim, u slučaju vrlo složenih procesa, ili mreže procesa, moraju se razvijati algoritmi prepoznavanja opterećenja, a to spada u oblast veštačke inteligencije. Inače, precizna i detaljna kontrola i upravljanje tehnološkim procesima u realnom vremenu se vrši SCADA sistemima, a to nije predmet ovog rada.

U poslednjih dvadesetak godina su se naglo razvile metode i tehnike merenja električne snage i energije i one se primenjuju u tri tipa uređaja:

- merilima kvaliteta električne energije;
- analizatorima snage i
- „pametnim“ brojilima.

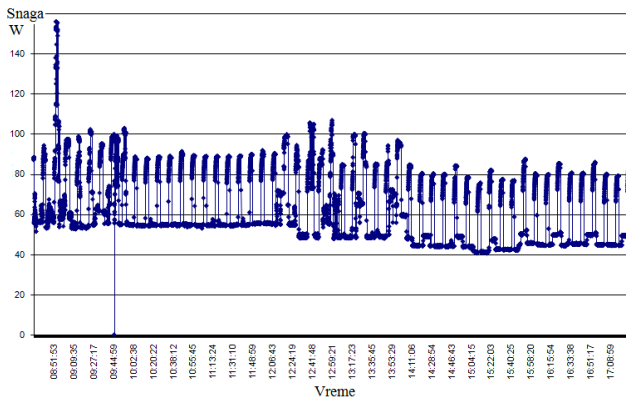
Idealno bi bilo da sva tri tipa uređaja budu objedinjena u „pametnim“ brojilima, ali bi to drastično podiglo njihovu cenu. Brojila su, inače, za dva reda veličine jeftinija od merila kvaliteta, a za red veličine od analizatora snage. Performanse, u prvom redu, brzina, preciznost i tačnost stoje u istom odnosu kao i cene.

A. INSTRUMENT VMP 20

Instrument VMP 20 je monofazni analizator snage proizveden još 1996. godine. On je kompletno domaći proizvod baziran na patentu [2], odnosno, SDMM. Direktno meri fazni napon, faznu struju, faznu aktivnu snagu i frekvenciju. Na osnovu ovih veličina se jednostavno mogu izračunati (indirektno meriti) još 6 veličina. Tokom dvadeset godina tri puta je inoviran njegov softver za podršku i najnovija verzija VMPCalc ver.2.1 je u primeni od ove godine. Tačnost merenja napona i struje je 0,5% FS, aktivne snage je 1% FS i frekvencije je 0,02% FS. Na Sl. 1 je prikazan instrument VMP 20, a na Sl. 2 je prikazan snimak prepoznatog uključivanja magnetna na uređaju za nuklearnu magnetnu rezonancu (NMR).



Sl. 1. Instrument VMP 20



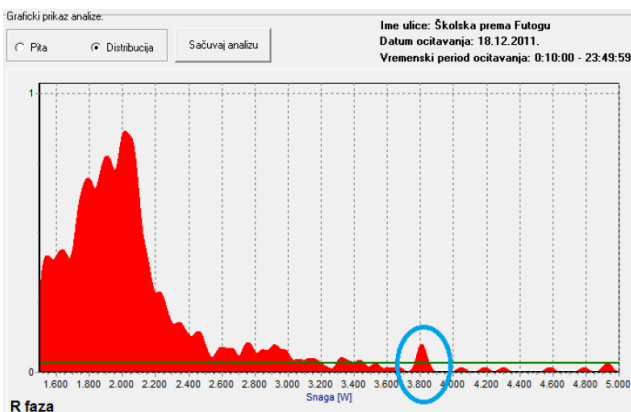
Sl. 2. Snimak uključenja magneta na uređaju za nuklearnu magnetnu rezonancu

B. INSTRUMENT MM4

Na Sl. 3 je prikazan uređaj MM4 proizveden 2013. godine. On praktično obuhvata funkcije 12 VMP 20 instrumenata četiri puta veće brzine, i predstavlja četverostruki trofazni analizator snage sa nekim elementima merenja kvaliteta električne energije [3]. Namena mu je detekcija i lociranje neregistrovane potrošnje električne energije u niskonaponskoj (NN) mreži. Ovde se radi o stotinama potrošača po vodu pa je za njega razvijen poseban softver za prepoznavanje potrošača. Na Sl. 4 je prikazan prepoznat trofazni potrošač 3x3,8 kW.



Sl. 3. Instrument MM4



Sl. 4. Prepoznavanje potrošača

C. „PAMETNA“ BROJILA

U Republici Srbiji postoji nekoliko proizvođača pametnih brojlara. Ugrađeni softver u svima njima je kompatibilan sa standardnim DLMS protokolom i nudi velike mogućnosti merenja i obračuna različitih parametara električne snage i energije. Autori su ih ispitivali u Laboratoriji za metrologiju FTN-a u Novom Sadu i uporedili ih sa VMP 20. Utvrđeno je, da mogu da se koriste kao odlični trofazni analizatori snage, odnosno za kontrolu i nadzor nad tehnološkim procesima. Ključna prednost ovih instrumenata je što su domaći, standardni, visokoserijski, odličnih metroloških i komunikacionih performansi, kao i vrlo prihvatljive cene. Za nadzor nad tehnološkim procesima treba im dodati samo PC i odgovarajući softver za podršku – trofaznu verziju VMPCalc ver.2.1: VMCalc3f+0. Operativnih iskustava sa njima autori do sad nisu imali, ali ne očekuju da će biti problema.

III. SOFTVER VMPCALC VER.2.1

A. Opis i funkcija programa

Program VMPCalc ver.2.1 je razvijen od strane prvog autora ovog rada za dodatnu obradu podataka merenih instrumentom VMP 20. Program je centralni deo softvera za obradu podataka snimljenih instrumentom VPM 20 i njihov izvoz u Excel tabele.

Monofazni instrument VMP 20 u jednoj fazi direktno meri, koristeći stohastičku digitalnu mernu metodu (SDMM), efektivne vrednosti napona i struje, aktivnu snagu i frekvenciju mrežnog napona. Izmerene vrednosti se pomoću povezanog PC računara pohranjuju u bazu podataka svake sekunde.

Program VMPCalc ver.2.1 obradom snimljenih podataka izračunava prividnu snagu, faktor snage, moduo impedanse, Fryze-ovu reaktivnu snagu, koje sa direktno merenim podacima zajedno izvozi u Excel tabele sa grafikovima.

Program VMPCalc ver.2.1, osim izvoza izmerenih i izračunatih podataka u tabele, izračunava srednje vrednosti, minimum, maksimum i standardnu devijaciju svih direktno izmerenih i izračunatih veličina, kao i maksimalne petnaestominutne prosečne vrednosti aktivne snage (vršna snaga), reaktivne snage, prividne snage i struje, koje sve zajedno snima kao kratak izveštaj obrade.

U bazi podataka je moguće uzeti proizvoljni vremenski podinterval, u kojem je moguće izračunati aktivnu energiju E_p , reaktivnu energiju E_Q i prividnu energiju E_S .

Pošto se u bazu podataka svake sekunde upisuju aktuelni mereni podaci, zapisi o snagama i -te sekunde (P_i , Q_i i S_i) brojčano su jednaki energijama za taj vremenski interval od jedne sekunde (E_{P_i} , E_{Q_i} , E_{S_i}). Energije se mogu izračunati kao prosta suma svih pojedinačnih energija unutar izabranog vremenskog intervala. Ovaj način je pogodan za računanje energija pomoću Excel tabela.

U kratkom izveštaju se koriste proračuni dobijeni programom VMPCalc ver.2.1, koji računaju srednje vrednosti aktivne snage P_{sr} , reaktivne snage Q_{sr} i prividne snage S_{sr} u vremenskom intervalu T . Energije se u ovom slučaju dobijaju

prostim množenjem srednjih vrednosti sa dužinom vremenskog intervala.

B. Korisnički interfejs programa VMPCalc ver.2.1

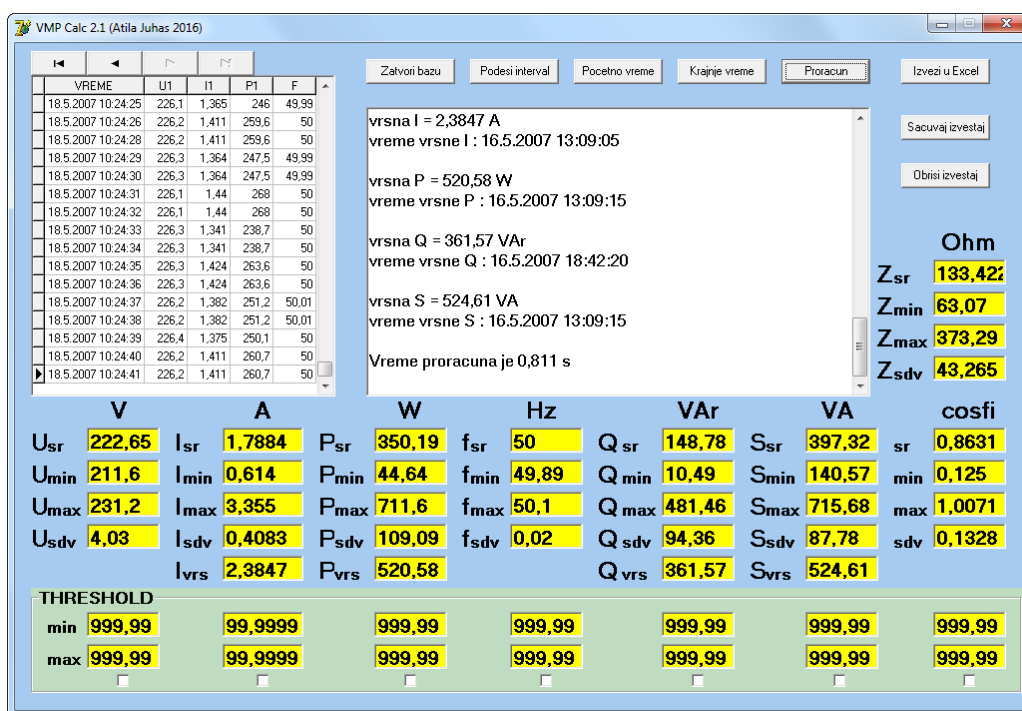
Na Sl. 5 prikazan je korisnički interfejs programa VMPCalc ver.2.1. Ispod naslovne linije nalaze se komande za korišćenje programa. Komanda „Otvori bazu“ otvara bazu podataka i vrši tabelarni prikaz cele baze u prozoru koji se nalazi ispod dugmeta. Komandama „Pocetno vreme“ i „Krajnje vreme“ se podešavaju početno i krajnje vreme intervala obrade. Komanda „Podesi interval“ nakon podešavanja granica intervala obrade vrši pripremu podataka za obradu. Nakon što je interval podešen, komanda menja naziv u „Resetuj interval“, čijim se odabirom ponovo priprema celokupna baza podataka za prikaz. Komanda „Proračun“ vrši proračun i prikaz podataka, kao i generisanje izveštaja u desnom oknu, koje je namenjeno za prikaz izveštaja. Komanda

„Izvezi u Excel“ odabrani interval podataka iz baze izvozi u Excel tabele. Komanda „Sacuvaj izveštaj“ snima izveštaj kao tekstualnu datoteku u tekućem folderu programa. Komanda „Obrisi izveštaj“ briše sadržaj prozora izveštaja.

Ispod okna za prikaz podataka iz tabele i izveštaja, nalaze se displeji za prikaz izračunatih veličina organizovanih u kolone.

Ispod displeja za prikaz izračunatih podataka, nalazi se uokvireno polje za podešavanje threshold-a. Odabirom određenih threshold-a, iz obrade se izbacuju podaci koji su ispod minimuma ili iznad maksimuma za datu veličinu. Nakon podešavanja tresholda potrebno je ponovo aktivirati komandu „Podesi interval“.

Da bi funkcionisala opcija „Izvezi u Excel“ na računaru mora biti instaliran Microsoft Office programski paket sa aplikacijom Microsoft Excel.



Sl. 5. Izgled VMPCalc ver.2.1 po završetku obrade podataka

C. Primer primene: detekcija propada napona i prorade APU-a

U ovom primeru će biti pokazana detekcija propada napona i prorade APU-a u jednoj fazi na ulazu industrijskog postrojenja.

U jutarnjim časovima 17.7.2015. napon je u vremenskom intervalu od 2 sekunde pao na 190,7V, u fazi T, što je znatno ispod dozvoljenog, odnosno desio se propad napona. Kako je napon pre i posle toga iste vrednosti, to znači da su svi potrošači ostali uključeni pre i posle tog propadnog napona. Ovaj propad pokazuje tipičnu sliku prorade APU-a. Kada APU proradi, napon pada na nulu. Postavlja se pitanje vremena na koje je podešen APU.

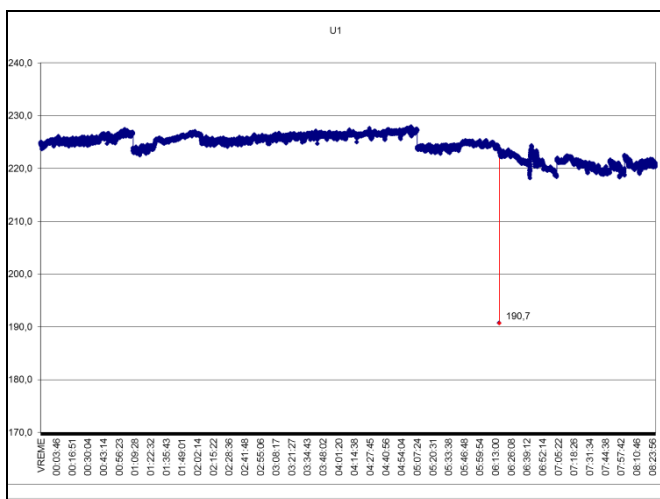
Pre i posle propada, vrednost izmerenog napona je 223,7V. Instrument je u dve sekunde izmerio napon od 190,7V. To znači, da je u dve sekunde promena srednje vrednosti napona $\Delta U = 33V$. Proradom APU-a napon pada na nulu. Ako pretpostavimo da je vreme uključenja APU-a (t) kraće od 2s, tada je zadovoljena jednačina (1) iz koje sledi (2)

$$223,7V \cdot (2s - t) = 190,7Vs \quad (1)$$

$$t = 2s - \frac{190,7Vs}{223,7V} = 0,295s \approx 0,3s \quad (2)$$

	A	B	C	D	E	F
1	DATUM	VREME	U1	I1	P1	F
22365	17.7.2015	06:16:04	223,5	0,0000	0,042	49,99
22366	17.7.2015	06:16:05	223,7	0,0000	0,042	49,99
22367	17.7.2015	06:16:06	223,7	0,0000	0,042	49,99
22368	17.7.2015	06:16:07	223,8	0,0000	0,042	49,99
22369	17.7.2015	06:16:08	223,7	0,0000	0,042	49,99
22370	17.7.2015	06:16:09	223,7	0,0000	0,042	49,99
22371	17.7.2015	06:16:10	223,5	0,0000	0,042	49,99
22372	17.7.2015	06:16:11	223,5	0,0000	0,042	49,99
22373	17.7.2015	06:16:12	223,7	0,0000	0,021	49,99
22374	17.7.2015	06:16:13	223,7	0,0000	0,021	49,99
22375	17.7.2015	06:16:14	190,7	0,0000	3,208	50
22376	17.7.2015	06:16:15	190,7	0,0000	3,208	50
22377	17.7.2015	06:16:16	223,7	0,0000	0,042	50
22378	17.7.2015	06:16:17	223,7	0,0000	0,042	50
22379	17.7.2015	06:16:18	223,7	0,0000	0,021	49,99
22380	17.7.2015	06:16:19	223,7	0,0000	0,021	49,99
22381	17.7.2015	06:16:20	223,7	0,0000	0,042	50
22382	17.7.2015	06:16:21	223,7	0,0000	0,042	50
22383	17.7.2015	06:16:22	223,7	0,0000	0,042	50
22384	17.7.2015	06:16:23	223,7	0,0000	0,042	50
22385	17.7.2015	06:16:24	223,7	0,0000	0,021	49,99
22386	17.7.2015	06:16:25	223,7	0,0000	0,021	49,99

Sl. 6. Prikaz propada napona u Excel tabeli



Sl. 7. Prikaz napona faze T sa propadom

Kako je analiza pokazala, vreme prorade APU-a je 0,3s, što je jednako standardnom podešavanju. Proverom u nadležnoj elektrodistribuciji, utvrđeno je, da je na dan 17.07.2015. na dalekovodu koji snabdeva posmatranu trafo stanicu 06:16:14 časova proradio APU u trajanju od 0,3s. Ovim je potvrđena korektnost i tačnost snimka, kao i pretpostavke o proradi APU-a.

IV. UREĐAJ MM4 I VMPCALC3F+0 VER.01

SDMM je intenzivno istraživana posle 2000. godine i otkriven je niz osobina ove metode. Posebno je istraživana njena primena u obradi signala, konkretno u primenama u ortogonalnim transformacijama [4] i u digitalnim filtrima [5] [6]. Već 2011. godine su projektovani instrumenti MM2 i MM4, dvostruki, odnosno, četvorstruki trofazni analizatori snage gde su primenjeni najnoviji rezultati u istraživanju SDMM. Početkom 2013. je „Elektrovojdinici“ isporučena

serija od 15 uređaja MM2 i 15 uređaja MM4 namenjenih detekciji i lociranju neregistrovane potrošnje električne energije u ED mreži [7][8]. Kompletan digitalni deo ovih uređaja je realizovan u jednom FPGA čipu u MM2, odnosno u dva FPGA čipa u MM4. Ovakvo integrisano rešenje je robusno, pouzdano, otporno na smetnje i pogodno za rad u teškim uslovima kakvi su u trafostanicama. Sa druge strane, FPGA rešenja su otvorena za dalji razvoj i unapređenja, što je vrlo važno kada se koristi nestandardna i još uvek do kraja neistražena metoda kakva je SDMM. Najnoviji rezultati istraživanja SDMM u merenju reaktivne snage i energije to i potvrđuju [9]. Jedan MM4 uređaj je više od 12 puta složeniji od jednog VMP 20 instrumenta. Jasno je, da softver VMPCalc ver. 2.1. ne samo da ne može biti direktno primenjen u ovom slučaju, nego mora biti temeljno rekonstruisan, doraden i unapređen. U sledeća dva podpoglavlja je u kratkim crtama prikazan unapređeni instrument MM4 i VMPCalc3F+0 ver.01, zapravo, uopšteni i unapređeni program VMPCalc ver.2.1.

A. Opis uređaja MM4

Pre nekoliko meseci je projektovano i u jednom rezervnom uređaju implementirano unapređeno rešenje instrumenta MM4. MM4 (Sl. 3) sada meri direktno 70 veličina:

1. 3 efektivne vrednosti napona (sa tačnošću 0,2 % od pune skale) [1],
2. 16 efektivnih vrednosti struje (sa tačnošću 0,2 % od pune skale)[1],
3. 12 aktivnih snaga (sa tačnošću 0,5 % od pune skale)[1],
4. 38 Furijeovih koeficijenata na učestanosti mreže (sa tačnošću 0,2 % od pune skale)[9],
5. učestanost mreže (sa tačnošću 0,02 % od pune skale) [6].

Instrument radi na sempling taktu od 0,5 MHz i ekvivalentna vršna brzina u obradi digitalnih odmeraka mu je sada 2,2 GFLOPS-a. On je sa dva USB kabla povezan sa PC računarnom za podršku. Razlog za to je dvostruk: prvi, PC omogućuje odličan vizuelni prikaz izmerenih podataka, i drugi, PC računa sve izvedene veličine, arhivira ih i/ili šalje višem hijerarhijskom nivou.

Merenje efektivne vrednosti, aktivne snage i energije, primenjeno u MM4, se vrši dvobitnim fleš AD konvertorima, na osnovu čega se može napraviti izuzetno jednostavan uređaj. MM4. Stoga, on ima vrlo mali broj izvora sistematske greške koje je lako identifikovati i eliminisati. Dakle, merenje je vrlo tačno [10]. Pošto je u pitanju fleš AD konvertor, moguće je meriti na vrlo visokom sempling taktu, pa je i preciznost vrlo velika [9]. Kako MM4 meri sumu snaga i energija, a snage i energije sadrže slučajnu grešku, moguće je primeniti centralnu graničnu teoremu, pa je ukupna energija koju meri jedan MM4 $\sqrt{3 \cdot 4} \approx 3,5$ puta preciznije izmerena od, inače precizno merene pojedinačne (fazne) energije [9]. Na sempling taktu od 10MHz i na nivou od jednog dana, preciznost merenja srednje fazne snage je bolja od 0,00014% pune skale, dok je ukupna srednja snaga koju meri MM4, na nivou dana, preciznija od 0,000028% pune skale. U dinamičkom opsegu od 60 dB, što je

uobičajeno za struju, preciznost merenja srednje snage je bolja od 0,02%, ali ne od punog opsega, nego od merene vrednosti. Jasno je da se ova merenja vrše u vremenskom domenu.

Merenje harmonika, faktora izobličenja, reaktivne snage i energije takođe je bazirano na dvobitnom fleš AD konvertoru i ima sve gore navedene dobre osobine: veliku tačnost, veliku preciznost i vrlo veliku preciznost sumarnih merenja. Merenje se sada vrši u frekvencijskom domenu.

Ključno unapređenje je merenje Budeanuove reaktivne snage na osnovnoj učestanosti, koju ćemo označiti sa Q_1 . Ako su a_1 i b_1 Furijeovi koeficijenti faznog napona na učestanosti mreže, a c_1 i d_1 Furijeovi koeficijenti fazne struje na učestanosti mreže, onda je Q_1 , fazna Budeanuova reaktivna snaga na učestanosti mreže, osnovna komponenta reaktivne snage, data sa (3):

$$Q_1 = \frac{a_1 \cdot d_1 - b_1 \cdot c_1}{2} \quad (3)$$

MM4 preko izmerenih Furijeovih koeficijenata omogućuje PC-ju izračunavanje osnovne komponente 12 Budeanuovih reaktivnih snaga i time utvrđivanje prirode 12 monofaznih opterećenja: da li su induktivna, kapacitivna, mešovita, nelinearna itd. Prepoznavanje opterećenja (trošila) je time dobilo vrlo moćan kriterijum i alat, pa MM4 postaje praktično univerzalno primenljiv.

Softver VMPCalc3F+0 ver.01 obuhvata sve pobrojane funkcije VMPCalc ver. 2.1., ali trofazno, i snabdeven je, u ovoj verziji, merenjem i prikazom osnovne fazne komponente reaktivne snage. U primeru koji sledi se to jasno vidi.

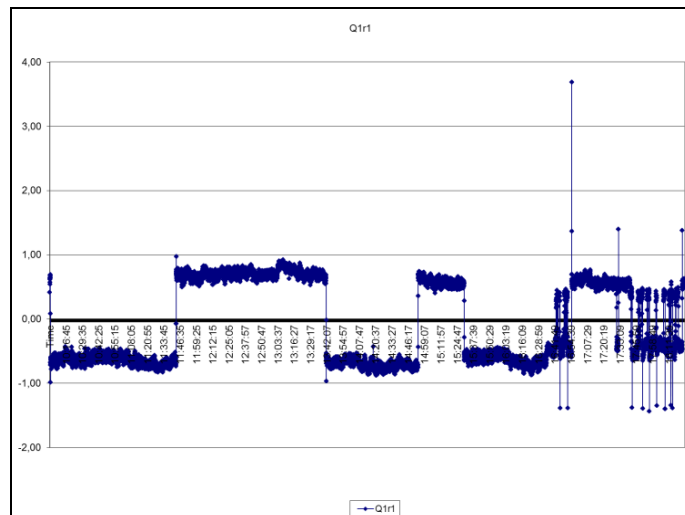
B. Primer primene: analiza rada paralelnog kapacitivnog kompenzatora

Prvu praktičnu proveru su, novi MM4 i novi softver VMPCalc3F+0 ver.01, u proveru efikasnosti kompenzacije reaktivne snage imali u jednoj fabrici procesne industrije. Za prikaz je izabrana faza R_1 na prvom trofaznom priključku.

Sl. 8. Prokazuje Budeanuovu reaktivnu snagu u fazi R_1 . Tabela 1. prikazuje kratak izveštaj i analizu snimka u obuhvaćenom vremenskom intervalu.

TABELA I. TABELARNI PRIKAZ IZVEŠTAJA ANALIZE FAZE R_1

	Unit	Average	Min	Max	Stdev
U	V	59,89	58,14	60,51	0,24
I	A	0,1276	0,1090	0,2520	0,0088
P	W	7,51	6,43	9,17	0,51
F	Hz	50,00	49,92	50,07	0,02
Q	var	1,37	0	11,43	0,28
QI	var	-0,08	-1,44	3,68	0,63
S	VA	7,64	6,51	14,65	0,53
PF	-	0,9836	0,6259	1,0070	0,0062
Z	Ω	471,586	230,714	551,101	32,897



Sl. 8. Budeanuova reaktivna snaga faze R_1

V. DISKUSIJA

Na Sl. 8 je prikazana Budeanuova reaktivna snaga u fazi R_1 , odnosno, rad paralelnog kapacitivnog kompenzatora. Srednja vrednost Budeanuove reaktivne snage na mrežnoj učestanosti, koja jedino i može da se kompenzuje paralelnim kapacitivnim kompenzatorom je, kako se vidi u Tabeli 1, -0.08 var-a i praktično je zanemarljiva. Drugim rečima: kompenzovana je. Na dužem vremenskom intervalu bi se dobio realističniji prikaz i, vrlo verovatno, još povoljniji po korisnika. Nelinearni faktor snage PF_{avg} je takođe odličan, a srednja reaktivna snaga Q_{avg} , zapravo Fryze-ova, je nešto veća od one koju meri reaktivno brojiilo, ali je to i za očekivanje, jer je Fryze-ova reaktivna snaga najveća reaktivna snaga i nju treba kompenzovati sa stanovišta elektrodistribucije. Najnoviji razvoj u toj oblasti ide u pravcu njenog kompletnog kompenzovanja [11] [12]. Kompenzatori tada postaju složeni snažni uređaji energetske elektronike. To je, gledano sa stanovišta ovog rada, ipak posebna tema.

VI. ZAKLJUČAK

U radu su prikazana tri merna instrumenta koji su rezultat domaće pameti, znanja i razvoja. Oni omogućuju, primenom odgovarajućeg, takođe domaćeg softvera, za bar red veličine jeftiniji, a ništa manje pouzdniji nadzor, ne samo u ED mreži, nego i nad tehnološkim procesima. Zbog svoje značajno niže cene, oni mogu da se koriste i kao dopunski, redundantni sistemi kada su primenjeni SCADA sistemi, veoma povećavajući robustnost i pouzdanost nadzora i kontrole.

Softver VMPCalc3F+0 ver.01., centralna tema ovog rada, je prikazan u svom razvojnom, vremenskom kontekstu, preko svog prethodnika monofaznog VMPCalc ver. 2.1, i jednog upečatljivog primera svoje primene – merenja fundamentalne komponente Budeanuove reaktivne snage. Glavni kvaliteti ovog novog softvera, odlična vizuelizacija i kratak izveštaj, odnosno kratka intuitivna i informativna analiza mernih podataka, se jasno vide u datom primeru primene. Snimak merenja u primeru je pokazao vrlo korektan rad paralelnog kapacitivnog kompenzatora. Opisani softver može biti primenjen ne samo u

slučaju primene trofaznih analizatora snage MM2 i MM4, nego i u slučaju primene pametnih brojila.

LITERATURA

- [1] V. Vujičić et al., „Low Frequency Stochastic True RMS Instrument“, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 2, pp. 467-470, Apr. 1999.
- [2] Vladimir Vujičić, Slobodan Milovančev, „Patent P-742/95, Digitalni instrument za merenje proizvoda dva analogna periodična signala“, Zavod za intelektualnu svojinu Beograd.
- [3] Vladimir Vujičić, „Patent P-628/96, Digitalni instrument za merenje harmonika“, Zavod za intelektualnu svojinu Beograd.
- [4] V. Pjevalica and V. Vujičić „Further Generalization of Low-Frequency True- RMS Instrument“, in Proc. IMTC, May 2005, pp. 1008–1011.
- [5] A. Radonjić, P. Sovilj and V. Vujičić, “Measurement Uncertainty Bounds of DSM Method”, Proc. IEEE Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) 2012, pp. 572-573, July 2012.
- [6] A. Radonjić, P. Sovilj and V. Vujičić, “Stochastic Measurement of Power Grid Frequency Using a Two-Bit A/D Converter”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 1, pp. 56-62, Jan. 2014.
- [7] V. Vujičić, Z. Mitrović, S. Galić, V. Kulpinski, „Sistem za detekciju i merenje neregistrovane potrošnje električne energije – iskustva iz primene“, Konferencija Energetika 2015, Zlatibor, mart 2015.
- [8] D. Davidović, S. Mijušković, Z. Mitrović, P. Sovilj, V. Vujičić, „Optimalni redundantni merni sistem za nadzor tokova električne snage i energije“, Konferencija Energetika 2017, Zlatibor, mart 2017.
- [9] P. Sovilj, B. Vujičić, A. Radonjić, D. Pejić, V. Vujičić, „Stochastic Measurement of Reactive Power Using a Two-Bit A/D Converter“, 21st IMEKO TC4 International Symposium and 19th International Workshop on ADC Modelling and Testing Understanding the World through Electrical and Electronic Measurement Budapest, Hungary, September 7-9, 2016.
- [10] M. Urekar et al., “Accuracy Improvement of the Stochastic Digital Electrical Energy Meter“, *Measurement*, vol. 98, pp. 139-150, Feb. 2017.
- [11] H. Lev-Ari and A. Stanković, „A Decomposition of Apparent Power in Polyphase Unbalanced Networks in Nonsinusoidal Operation“, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 438-440, Feb. 2006.
- [12] H. Lev-Ari and A. Stanković (2015, Sept.). „Electric Power Quality“, [Online] Available: http://web.eecs.utk.edu/~dcostine/ECE620/Fall2015/lectures/CURRENT_talk_combined.pdf.

ABSTRACT

The introductory chapter briefly describes the problem of load-recognition in the production process or in the power grid. As this is a complex problem that belongs to the field of artificial intelligence and learning and training, it has been useful to efficiently visualize the measured data and enable the operator to monitor, analyze and improve the recognition process. Presented software was designed and implemented exactly for this purpose. In two levels, it solves the problem of visualization and, as practice has shown, is a very useful and effective tool for this purpose.

SOFTWARE AND HARDWARE FOR SUPPORT TO THREE-PHASE MEASUREMENTS IN THE POWER GRID

Atila Juhas, Platon Sovilj, Vladimir Vujičić

juhiatti@gmail.com , platon@uns.ac.rs , vujicicv@uns.ac.rs

Razdvajanje potrošača zasnovano na neinvazivnom praćenju potrošnje

Miloš Daković¹, Budimir Lutovac¹, Tomislav Šekara²

¹ Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora,

² Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

milos@ac.me, budo@ac.me, tomi@etf.rs

Sažetak—Predložen je metod za neinvazivno praćenje rada potrošača u složenom sistemu. Polazna informacija je signal ukupne aktivne snage u zavisnosti od vremena. Razdvajanje potrošača je izvršeno analizom promjena snage u susjednim mjernim trenucima. Metod je primijenjen na simulirane i realne podatke.

Ključne riječi—Neinvazivno praćenje potrošnje, Razdvajanje potrošača, Analiza efikasnosti, Elektroenergetski sistem, Digitalna obrada signala

I. UVOD

Razdvajanje i analiza rada pojedinačnih potrošača neinvazivnim metodama je aktuelna istraživačka tema u oblasti energetske efikasnosti već dugi niz godina [1]–[4]. Razvojem metoda digitalne obrade signala [5], mjernih uređaja i računarskih sistema za analizu podataka omogućena je praktična implementacija sistema za monitoring i analizu potrošnje. Ovakvi sistemi daju informacije koje se mogu iskoristiti u planskom smanjenju potrošnje i povećavanju energetske efikasnosti potrošača električne energije.

Primjenom klasičnih metoda digitalne obrade signala predložena je jednostavna i efikasna procedura za analizu signala snage i razdvajanja potrošnje pojedinih potrošača iz zbirnog signala. U radovima [3], [4] za rješavanje ovog problema korišćeni su metodi teorije grafova.

U odjeljku II je uveden model signala snage. Predložena procedura je uvedena u odjeljku III. Rezultati dobijeni primjenom predložene metode na simulirane i realne podatke su dati u odjeljku IV.

II. MODEL SIGNALA

Signal dobijen mjerenjem angažovane snage se može modelovati funkcijom koja je po djelovima ravna, a promjene vrijednosti se dešavaju u trenucima uključivanja, (porast funkcije) odnosno isključivanja (pad funkcije) potrošača. Ovaj model podrazumijeva da svi potrošači imaju konstantnu snagu.

Angažovana aktivna snaga jednog potrošača $p^{(k)}(t)$ se može modelovati kao

$$p^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} P^{(k)} \left(h(t - t_{on}^{(k)}(n)) - h(t - t_{off}^{(k)}(n)) \right) \quad (1)$$

gdje je $P^{(k)}$ snaga posmatranog potrošača, N_k broj uključivanja potrošača u posmatranom vremenskom intervalu, $h(t)$ je jedinična Hevisajdova funkcija, $t_{on}^{(k)}(n)$ su trenuci uključivanja potrošača, a $t_{off}^{(k)}(n)$ su odgovarajući trenuci isključivanja potrošača takvi da vrijedi $t_{on}^{(k)}(1) < t_{off}^{(k)}(1) < t_{on}^{(k)}(2) < t_{off}^{(k)}(2) < \dots < t_{on}^{(k)}(N_k) < t_{off}^{(k)}(N_k)$. Dakle, potrošač je aktivan u N_k neprekidajućih vremenskih intervala $(t_{on}^{(k)}(n), t_{off}^{(k)}(n))$, $n = 1, 2, \dots, N_k$.

Izraz (1) se može napisati u obliku

$$p^{(k)}(t) = P^{(k)} a^{(k)}(t) \quad (2)$$

gdje je

$$a^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} \left(h(t - t_{on}^{(k)}(n)) - h(t - t_{off}^{(k)}(n)) \right) \quad (3)$$

prekidačka funkcija koja uzima vrijednost 1 kada je potrošač uključen i 0 kada je potrošač isključen.

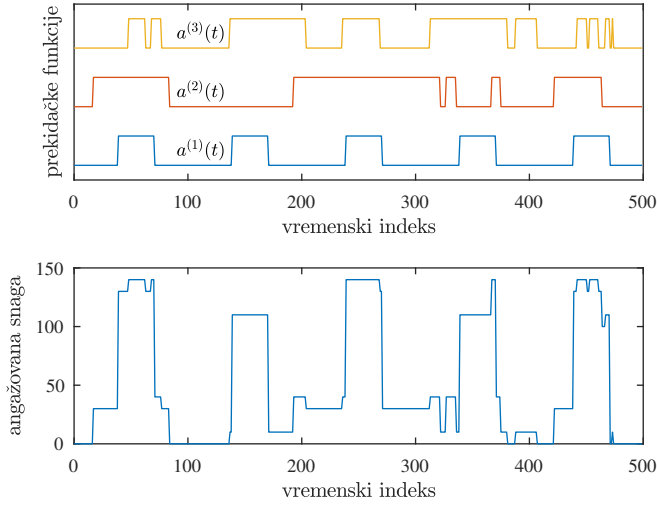
U slučaju K potrošača ukupna angažovana snaga se modeluje kao zbir pojedinačnih snaga

$$p(t) = \sum_{k=1}^K p^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^K P^{(k)} a_n^{(k)}(t) \quad (4)$$

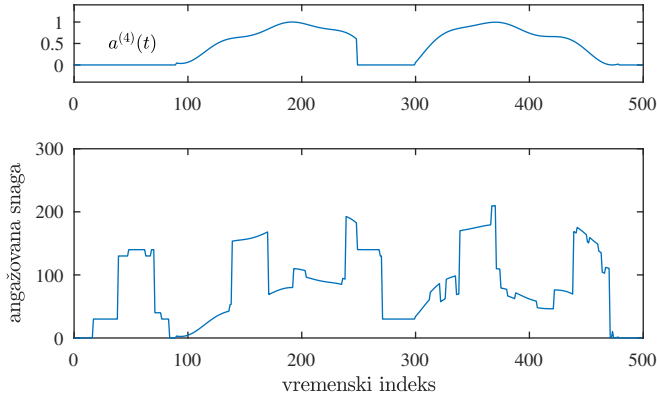
Na slici 1 je prikazan primjer signala $p(t)$ za slučaj $K = 3$ potrošača čije su snage $P^{(1)} = 10\text{W}$, $P^{(2)} = 100\text{W}$ i $P^{(3)} = 30\text{W}$. U gornjem dijelu slike su prikazane prekidačke funkcije za tri posmatrana potrošača a u donjem dijelu je data ukupna angažovana snaga $p(t)$.

Dodatno se u model mogu uključiti i potrošači promjenljive snage. U tom slučaju se angažovana snaga modeluje funkcijom koja može imati diskontinuitete (u trenucima uključivanja ili isključivanja potrošača), a pored toga ima i kontinualnu promjenu angažovane snage u intervalu od uključivanja do isključenja potrošača.

Matematički se ovakav potrošač može modelovati formulom (2) pri čemu je $P^{(k)}$ maksimalna snaga posmatranog potrošača, a prekidačka funkcija $a^{(k)}(t)$ može uzeti bilo koju vrijednost od 0 do 1. Njene vrijednosti se mogu tumačiti kao procenat



Slika 1. Primjer signala angažovane snage za slučaj tri potrošača. Prekidačke funkcije individualnih potrošača su prikazane u gornjem, a ukupna angažovana snaga u donjem dijelu grafika.



Slika 2. Primjer signala angažovane snage za slučaj tri potrošača konstantne snage i jednog potrošača promjenljive snage. Prekidačka funkcija potrošača promjenljive snage je prikazana u gornjem, a ukupna angažovana snaga u donjem dijelu grafika.

maksimalne snage potrošača angažovan u posmatranom vremenskom trenutku. Matematički model prekidačke funkcije je

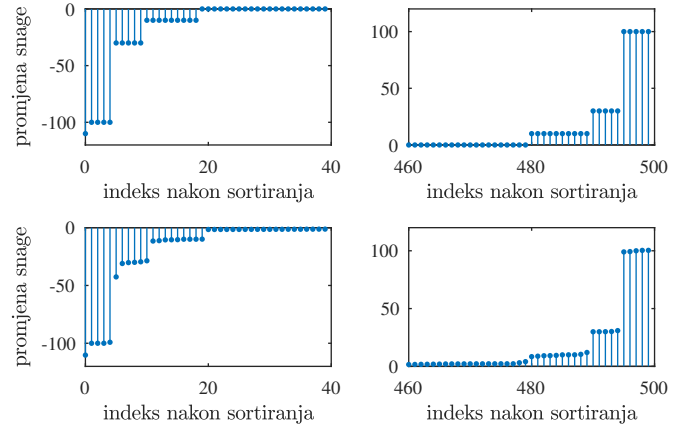
$$a^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} b_n^{(k)}(t - t_{on}^{(k)}(n)) \left(h(t - t_{on}^{(k)}(n)) - h(t - t_{off}^{(k)}(n)) \right) \quad (5)$$

gdje je snaga potrošača u n -tom intervalu modelovana funkcijom $b_n^{(k)}(t)$ koja uzima vrijednosti od 0 do 1.

Na slici 2 je prikazan prethodno analizirani slučaj (slika 1) sa jednim potrošačem promjenljive snage čija je maksimalna snaga $P^{(4)} = 70W$. Potrošač je aktivan u dva vremenska intervala.

III. PROBLEM RAZDVAJANJA POTROŠAČA

Pretpostavimo da je snaga mjerena u diskretnim vremenskim trenucima t . Posmatrajmo promjene u signalu snage. Promjenu



Slika 3. Promjene u signalu snage za slučaj sa slike 1 (gornji dio) i za slučaj sa slike 2 (donji dio). Promjene su sortirane u neopadajući niz vrijednosti. Prikazan je samo početni (lijevo) i krajnji (desno) dio sortiranog niza vrijednosti.

možemo izračunati kao razliku uzastopnih izmjerenih vrijednosti

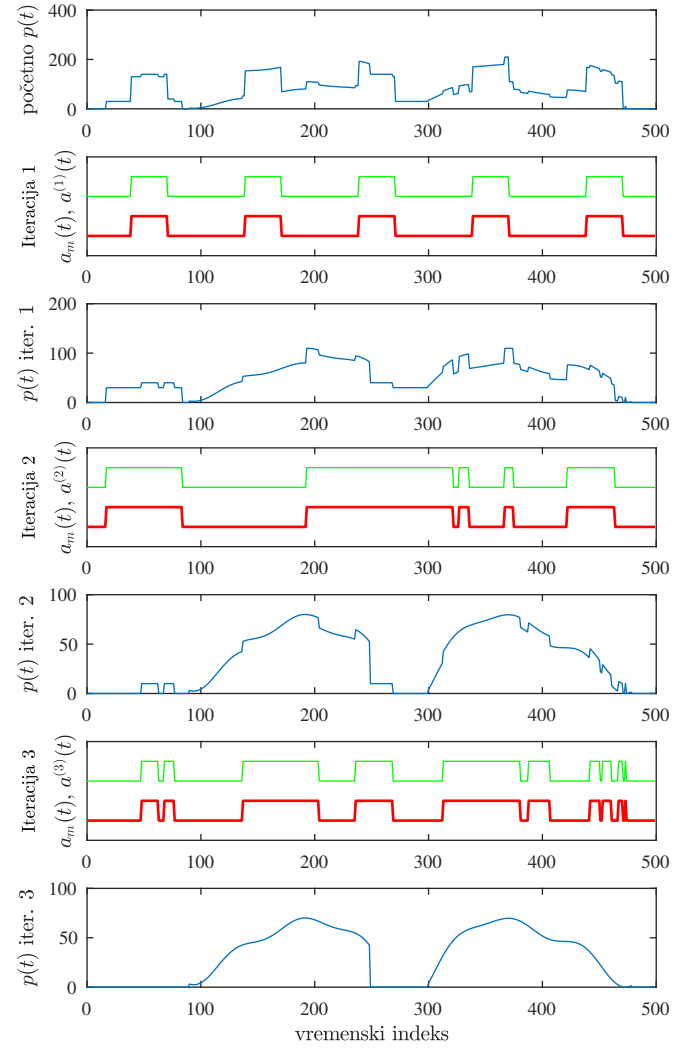
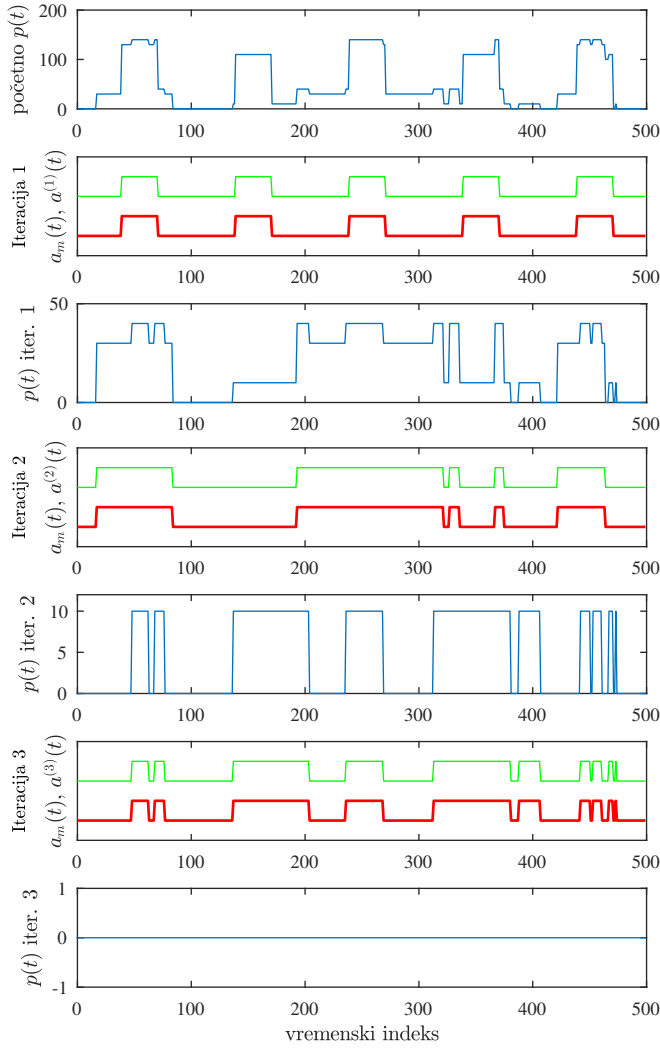
$$\Delta p(t) = p(t) - p(t - 1) \quad (6)$$

Na taj način dobijamo diskretni niz vrijednosti. Sortirajmo niz $\Delta p(t)$ u neopadajući poredak. Za primjere navedene u prethodnoj sekciji, (slike 1 i 2 sortirane vrijednosti promjene snage su prikazane na slici 3. Radi jasnoće prikaza dat je početak i kraj sortiranog niza, dok su vrijednosti sa indeksima od 40 do 460 jednake nuli u prvom slučaju, odnosno zanemarljivo male u drugom slučaju.

Analizom grafika sa slike 3 lako je doći do zaključka da u posmatranom sistemu postoje tri potrošača konstantne snage, možemo očitati i snagu pojedinačnih potrošača, kao i broj uključenja, odnosno isključenja. Uključivanje potrošača promjenljive snage (donji grafici) se odražava kao smetnja u detekciji potrošača konstantne snage, mada je u posmatranom slučaju vizuelnim pregledom sortiranih promjena snage i dalje moguće jasno odvojiti potrošače 1, 2 i 3, njihove trenutke uključenja i isključenja. Postavlja se pitanje: da li je moguće automatizovati proceduru klasifikacije potrošača i detekcije odgovarajućih prekidačkih funkcija na osnovu poznatog signala ukupne angažovane snage?

Posmatrajmo slučaj kada je su broj potrošača i njihove snage poznate. Bez umanjena opštosti, smatramo da su na početku i na kraju posmatranog vremenskog intervala svi potrošači isključeni. Postupak detekcije prekidačkih funkcija pojedinačnih potrošača i dekompozicije signala ukupne angažovane snage $p(t)$ na pojedinačne potrošače je sledeći:

- 1) Posmatrajmo potrošač sa najvećom snagom P_m . Pođimo od kraja niza $p(t)$ i tražimo trenutak kada je promjena snage $\Delta p(t)$ bila manja ili jednaka od $-P_m$ (tražimo trenutak isključenja potrošača). Za svaki vremenski trenutak koji ne zadovoljava ovaj uslov stavljamo $a_m(t) = 0$.



Slika 4. Rezultati dobijeni analizom primjera sa slike 1. Prikazana je početna snaga $p(t)$. Za svaki od tri iterativna koraka nacrtana je estimirana prekidačka funkcija (deblja linija crvene boje), tačna prekidačka funkcija (tanja linija zelene boje) i snaga preostala nakon eliminacije analiziranog potrošača.

Slika 5. Rezultati dobijeni analizom primjera sa slike 2. Prikazana je početna snaga $p(t)$. Za svaki od tri iterativna koraka nacrtana je estimirana prekidačka funkcija (deblja linija crvene boje), tačna prekidačka funkcija (tanja linija zelene boje) i snaga preostala nakon eliminacije analiziranog potrošača.

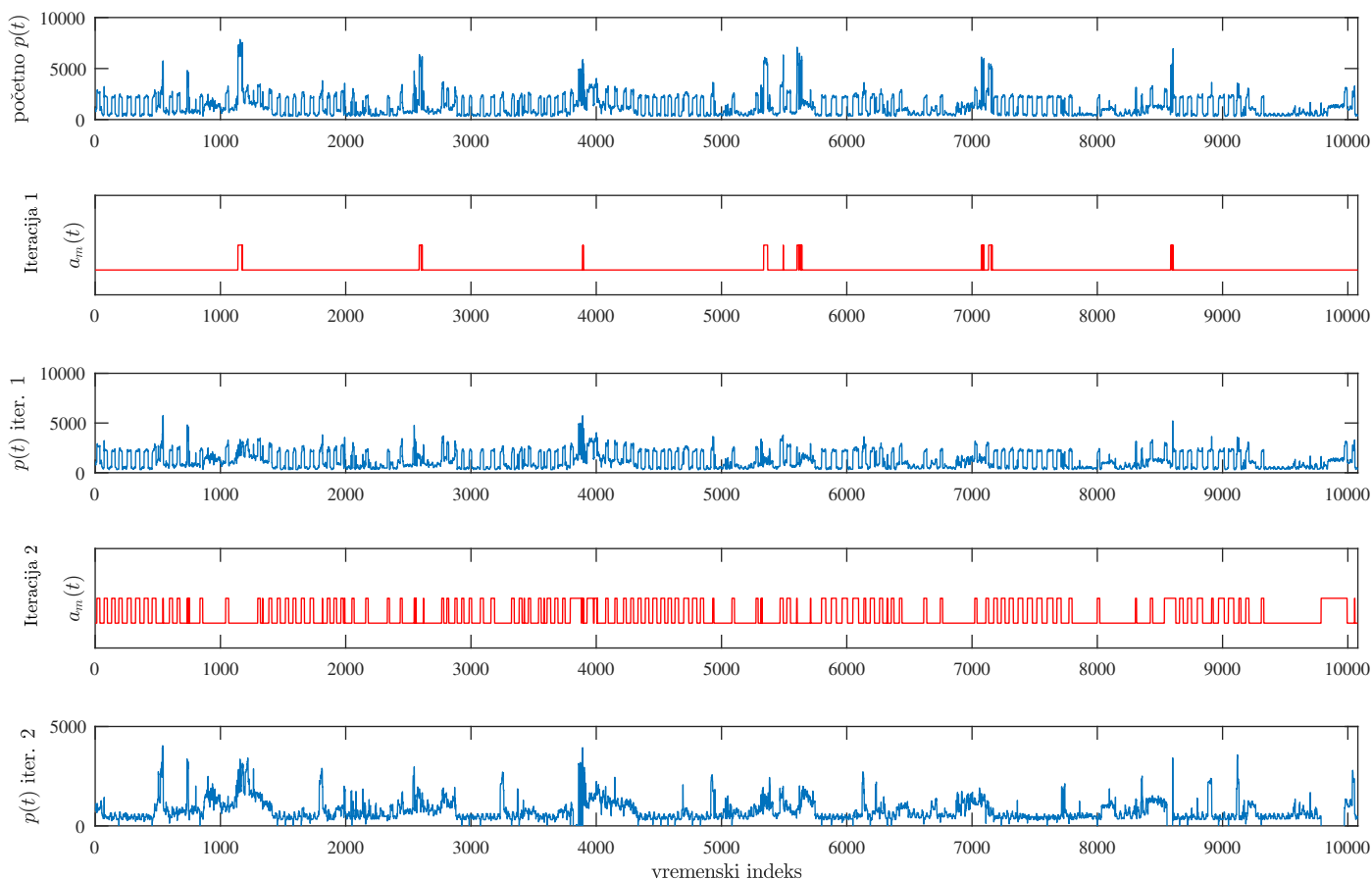
- 2) Sada tražimo vremenski trenutak uključivanja potrošača krećući se prema početku niza $p(t)$ i provjeravajući da li je promjena snage $\Delta p(t)$ približno jednaka P_m , odnosno trenutak kada je $|\Delta p(t) - P_m| < \kappa P_m$ gdje je $0 < \kappa < 1$ parametar kojim definišemo približnu jednakost posmatranih veličina. Za svaki vremenski trenutak koji ne zadovoljava ovaj uslov postavljamo $a_m(t) = 1$.
- 3) Vraćamo se na korak 1 sve dok ne dođemo do početka niza $p(t)$.
- 4) Kada je cijeli niz $p(t)$ obrađen u nizu $a_m(t)$ imamo estimiranu prekidačku funkciju posmatranog potrošača. Signal snage $p(t)$ možemo dekomponovati na dva signala $p_1(t) = a_m(t)P_m$ i $p_2(t) = p(t) - p_1(t)$. Na taj način smo snagu najjačeg potrošača izdvojili u poseban signal $p_1(t)$, a snaga ostalih potrošača je u signalu $p_2(t)$.
- 5) Ponavljamo proceduru od prvog koraka, pri čemu umjesto signala $p(t)$ koristimo novodobijeni signal $p_2(t)$ a

iz skupa analiziranih potrošača izbacujemo potrošač čiji smo prekidačku funkciju estimirali.

Opisana procedura je prilagođena off-line obradi podataka (krećemo od kraja niza $p(t)$ prema njegovom početku). Razlog za takvu odluku je taj što snaga mnogih realnih potrošača ne dostiže trenutno stacionarnu vrijednost prilikom uključivanja, dok trenutak isključenja potrošača ne prati prelazni proces, odnosno on se odvija trenutno.

IV. REZULTATI

Navedena procedura je primijenjena na simulirane primjere prikazane na slikama 1 i 2. Rezultati dekompozicije u prvom slučaju su prikazani na slici 4 a u drugom slučaju na slici 5. Na prvom podgrafiku je dat početni signal $p(t)$. Nakon toga za svaku iteraciju su prikazani estimirana prekidačka



Slika 6. Rezultati dobijeni analizom realnih podataka iz AMPds [6] baze. Analizirana su dva potrošača snage 4500W i 1800W, estimirane su odgovarajuće prekidačke funkcije i dobijen signal snage sa eliminisanim uticajem detektovanih potrošača

funkcija $a_m(t)$, stvarna prekidačka funkcija posmatranog potrošača i signal preostale snage nakon eliminacije posmatranog potrošača. Korišćen je faktor sličnosti $\kappa = 0.25$.

Vidimo da u posmatranim slučajevima imamo potpuno tačnu estimaciju prekidačkih funkcija potrošača konstantne snage. U prvom slučaju preostala snaga, na kraju procesa, je jednaka nuli. U drugom slučaju snaga potrošača sa promjenljivom snagom je ostala na kraju iterativnog procesa.

Predložena procedura je primijenjena i na realne podatke. Korišćeni si podaci iz AMPds baze [6] koji se odnose na aktivnu angažovanu snagu domaćinstva. Podaci su dostupni u širokom vremenskom razdoblju, a u ovom radu su korišćeni podaci sedmodnevnog mjerenja. Mjerenje snage je vršeno svakog minuta. Rezultati su prikazani na slici 6.

Statističkom analizom sortiranog signala promjena snage došli smo do zaključka da u sistemu postoje potrošači čija je snaga približno 4500W i 1800W pa je predložena procedura provedena u dvije iteracije. Sa slike 6 se vidi kako detekcija potrošača utiče na to da se u preostalom signalu snage prepoznaju detalji koji su bili maskirani ponašanjem ovih potrošača.

V. ZAKLJUČAK

U radu je predložena procedura za analizu aktivnosti potrošača bazirana na neinvazivnom mjerenju ukupne angažovane snage u sistemu. Razvijen je matematički model signala snage. Predloženi metod je ilustriran simuliranim primjerima i primijenjen na realni slučaj mjerenja snage u domaćinstvu. Dobijeni rezultati pokazuju efikasnost predloženog metoda.

LITERATURA

- [1] G. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *IEEE Proc.*, vol 80, pp. 1870-1891, 1992.
- [2] S. Đorđević, M. Dimitrijević, D. Stevanović, S. Bojanić, "Novi metod za detekciju događaja u neinvazivnom monitoringu potrošnje", *ENEF 2015*, Banja Luka, 25-26. sept. 2015, pp. 132-135.
- [3] K. He, L. Stanković, J. Liao and V. Stanković, "Non-Intrusive Load Disaggregation using Graph Signal Processing," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 99, doi: 10.1109/TSG.2016.2598872
- [4] B. Zhao, L. Stanković, V. Stanković, "Blind non-intrusive appliance load monitoring using graph-based signal processing," *IEEE GlobalSIP*, Orlando, FL, 2015, pp. 68-72. doi: 10.1109/GlobalSIP.2015.7418158
- [5] Lj. Stanković, *Digital Signal Processing with Selected Topics*, CreateSpace Independent Publishing Platform, An Amazon.com Company, 2015.
- [6] S. Makonin, B. Ellert, I. V. Bajic, F. Popowich, "Electricity, water, and natural gas consumption of a residential house in Canada from 2012 to 2014," *Scientific Data*, vol. 3, no. 160037, pp. 1-12, 2016.

Primjena DC portova pri zatvaranju petlji u distributivnim mrežama

Dejan Ivić, Darko Šošić, Predrag Stefanov

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija
dejan.ivic@yahoo.com, sosic@etf.rs, stefanov@etf.rs

Sažetak—Savremeni distributivni sistemi, osim osnovne uloge snabdjevanja potrošača dovoljnom količinom kvalitetne električne energije, imaju ulogu obezbijediti što efikasniju integraciju obnovljivih izvora energije kao i njihovo nesmetano učešće na deregulisanom tržištu električne energije. U takvom okruženju, prilagođenje postojećih sistema, iskorišćenje postojećih resursa i odgađanje investicija predstavljaju jedan od osnovnih zadataka pri eksploataciji distributivnih sistema. U ovom radu predložena je metodologija za zatvaranje petlji u distributivnim mrežama korišćenjem uređaja energetske elektronike. Predložena metodologija u svojoj osnovi podrazumjeva koordinaciju lokalnog upravljanja pretvaračima energetske elektronike i centralizovanog upravljanja na nivou DMS-a a sve s ciljem adekvatnog određivanja referentnih vrijednosti neophodnih za efikasno upravljanje uređajima energetske elektronike. Upravljački algoritmi, predloženi u ovom radu, testirani su pomoću računarskih simulacija na standardnoj IEEE 33 test mreži. Rezultati simulacija i izvedeni zaključci predstavljaju polaznu osnovu pri analizama efikasnosti i isplativosti primjene uređaja energetske elektronike pri zatvaranju petlji u distributivnim mrežama.

Ključne riječi—petljaste distributivne mreže; primjena DC portova u distributivnim mrežama; upravljački algoritmi u distributivnim sistemima;

I. UVOD

Koncept inteligentnih elektroenergetskih mreža sve više se realizuje u distributivnim mrežama srednjeg i niskog napona. Visok stepen automatizacije savremenih distributivnih sistema omogućava efikasnu integraciju distribuiranog generisanja i prilagođenje upravljačkih sistema promjenama nastalim usljed integracije distribuiranih generatora [1]. Primjena savremenih uređaja energetske elektronike omogućila je da se ponovo razmatraju petljaste topologije distributivnih mreža te da se zatvaranjem petlji na srednjem pa čak i niskom naponu izvrši rasterećenje distributivnih vodova i omogući plasman energije proizvedene pomoću distribuiranih generatora.

U konvencionalnim distributivnim mrežama (bez distribuiranog generisanja), radikalne topologije i sa samo jednim smjerom snage – od napojnog čvora ka potrošačima, zatvaranje petlji je izbjegavano prevashodno zbog povećanja struje kvara i pojave inverznih tokova snaga. S obzirom da integracija distribuiranih generatora neminovno donosi promjenu smjera tokova snaga po distributivnim vodovima neophodno je izvršiti prilagođenje upravljačkih algoritama i relejne zaštite. Sa tog aspekta, prilagođenjem mreže integraciji distribuiranih generatora, istovremeno je omogućeno i

upravljanje sistemom sa zatvorenim petljama [2]. Problem povećanja struja kvara usljed zatvaranja petlji u mreži efikasno se može riješiti primjenom uređaja energetske elektronike koji ograničavaju struju kvara ili čak u potpunosti sprečavaju njenu propagaciju.

U nastavku rada opisan je metod za zatvaranje petlji u distributivnim sistemima koji omogućava potpunu kontrolu tokova snaga između čvorova u mreži čijim povezivanjem se dobija razmatrana petlja. Ovakav način zatvaranja petlji u svojoj osnovi podrazumjeva primjenu energetskih pretvarača tj. *back to back* konvertora. Primjenom ovih uređaja omogućava se kontrola tokova snaga između poveznih čvorova te rasterećenje pojedinih distributivnih vodova, a sa druge strane javljaju se dodatni gubici u pretvaračima koje je nemoguće izbjeći [3], [4].

II. PRIMJENA PRETVARAČA ENERGETSKE ELEKTRONIKE PRI ZATVARANJU PETLJI U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Kao što je već spomenuto, primjenom uređaja energetske elektronike eliminišu se neželjeni efekti zatvaranja petlji u mrežama srednjeg i niskog napona. U tu svrhu najčešće se koriste takozvani *back to back* konvertori pomoću kojih se formiraju tzv. DC portovi. Detaljni principi rada kao i interni upravljački algoritmi za ovu vrstu konvertora mogu se pronaći u referencama [5],[6].

Za adekvatnu primjenu uređaja energetske elektronike neophodno je lokalnim kontrolerima obezbijediti referentne vrijednosti na osnovu kojih se postižu željeni režimi rada pretvarača kao i željeno stanje u distributivnoj mreži. Određivanje navedenih referentnih vrijednosti upravljačkih promjenjivih nemoguće je bez modelovanja uređaja energetske elektronike i inkorporiranja dobijenih modela u algoritme za proračune tokova snaga. Modelovanje uređaja energetske elektronike za potrebe proračuna tokova snaga detaljno je opisano u nastavku ovog poglavlja.

A. Modelovanje DC portova pri proračunima tokova snaga

S obzirom na karakteristike konvertora i činjenicu da njihova primjena omogućava nezavisno upravljanje aktivnom snagom u jednom od poveznih čvorova i reaktivnom snagom u oba povezna čvora pri proračunima tokova snaga DC port najlakše je modelovati pomoću injektiranja snaga u poveznim čvorovima. Za jasnije objašnjenje korišćenog modela potrebno je analizirati uprošćenu blok-šemu DC porta koje povezuje dva nezavisna distributivna fidera prikazanu na Sl. 1.

Uvažavajući analizu rada pretvarača opisanu u [5] i [7] reaktivna snaga se ne prenosi kroz razmatrano DC kolo te su injektiranja reaktivne snage u poveznim čvorovima, l i m nezavisna dok za injektiranja aktivnih snaga važi relacija:

$$P_m + P_l + P_{mgub} + P_{lgub} = 0, \quad (1)$$

gdje P_{mgub} i P_{lgub} predstavljaju gubitke u pretvaračima povezanim u čvorove m i l , respektivno. Imajući u vidu da reaktivna snaga injektiranja u poveznim čvorovima zavisi samo od odgovarajućih vektora napona, termička ograničenja pretvarača mogu se uvažiti kao:

$$\sqrt{P_l^2 + Q_l^2} \leq (S_{konvertora}^{nominalno})^2, \quad (2)$$

$$\sqrt{P_m^2 + Q_m^2} \leq (S_{konvertora}^{nominalno})^2.$$

Prethodne jednakosti (1) i (2) predstavljaju osnovni model DC porta u proračunima tokova snaga. Za efikasnu primjenu ovako definisanog modela neophodno je poznavati gubitke u pretvaračima. Gubici u pretvaračima detaljnije su razmatrani u narednom paragrafu.

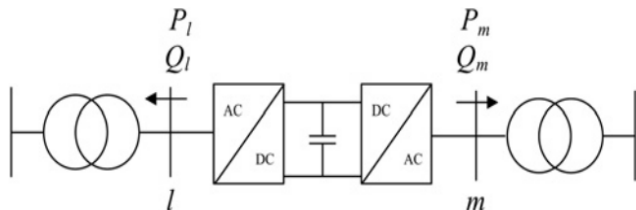
B. Modelovanje gubitaka u pretvaračima

Egzaktno modelovanje gubitaka u pretvaračima predstavlja kompleksan problem za čije rješavanje je neophodno koristiti softverske alate koji bi omogućili modelovanje tranzijentnih pojava u tranzistorima i diodama. Egzaktno modelovanje gubitaka u pretvaračima zahtijeva i angažovanje značajnih računarskih resursa što je još jedan od razloga zbog koga se precizni modeli pretvarača ne koriste za potrebe analize rada i upravljanja distirbutivnim sistemima.

Umjesto egzaktnih modela gubitaka u pretvaračima u praksi se najčešće koriste modeli gubitaka koji reprezentuju zavisnost gubitaka aktivne snage u pretvaračima od struje kroz prekidačke elemente. Jedan od najčešće korišćenih modela može se formulisati pomoću relacije (3):

$$P_{gubitaka} = aI^2 + bI + c, \quad (3)$$

gdje I predstavlja faznu struju kroz prekidačke elemente (par tranzistor-dioda). Koeficijenti a, b , i c prevashodno zavise od karakteristika prekidačkih elemenata korišćenih za realizaciju pretvarača. Većina proizvođača ove koeficijente daju kao kataloške podatke. S obzirom da se jedan trofazni pretvarač sastoji od šest parova tranzistor-dioda [8] prethodnu jednakost neophodno je dopuniti pa se dobija:



Sl. 1. Uprošćena blok-šema DC porta

$$P_{gubitaka} = 6(aI^2 + bI + c) \quad (4)$$

Pri računanju ukupnih gubitaka u DC portu neophodno je imati u vidu da broj pretvarača u portu zavisi od broja fidera koje se želi povezati u petlju. Shodno tome, za računanje ukupnih gubitaka u DC portu, prethodnu jednačinu neophodno je pomnožiti sa ukupnim brojem pretvarača.

Osim prethodno opisanog modela gubitaka u pretvaračima u praksi se vrlo često koristi i njegova uprošćena forma dobijena linearizacijom. Linearizovani model gubitaka u pretvaraču može se izraziti kao:

$$P_{gubitaka} = kI + c, \quad (5)$$

gdje je:

$$k = (P_{gubitaka}^{nominalno} - c) / I_{nominalno}, \quad (6)$$

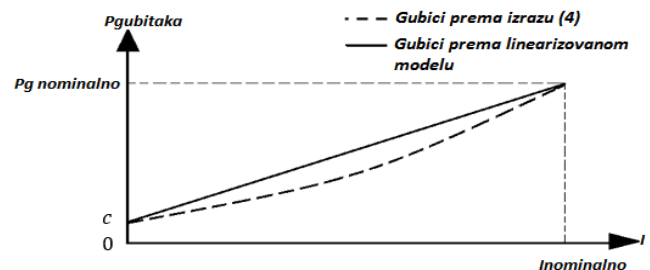
a c predstavlja gubitke u pretvaraču nezavisne od opterećenja. Razlika između linearizovanog modela gubitaka i modela definisanog jednačinom (4) ilustrovana je na Sl. 2. Pri daljnjim analizama i simulacijama u sklopu ovog rada uvažavan je linearizovani model gubitaka u pretvaračima. S obzirom na dimenzije i karakteristike mreže te karakteristike potrošača, ovakvo pojednostavljenje ne utiče na kvalitativne zaključke dobijene na osnovu rezultata simulacija.

III. OPTIMIZACIJA – FORMULACIJA PROBLEMA

Zatvaranjem petlji pomoću DC portova u distributivnoj mreži dobija se mogućnost djelimičnog upravljanja tokovima snaga po pojedinim vodovima. Adekvatnim definisanjem referentnih vrijednosti snaga koje se injektiraju u čvorovima na koje je povezan DC port može se postići željeno stanje u mreži. Pri postavljanju problema optimizacije neophodno je jasno definisati cilj koji se želi postići optimizacijom (kriterijumska funkcija), ograničenja koja moraju biti ispunjena u normalnim radnim režimima kao i modalitete kojima je moguće postići postavljeni cilj tj. željeno stanje u mreži.

A. Upravljačke promjenjive

Analizirajući model pretvarača opisan u prethodnom poglavlju kao i detaljne modele opisane u [5] lako se može zaključiti da su injektiranja reaktivnih snaga iz DC porta nezavisna kao i jedna od aktivnih snaga injektirana u mrežu. Injektiranje aktivne snage na drugom kraju porta (drugi povezni čvor) lako se izračunava pomoću relacije (1).



Sl. 2. Razmatrani modeli gubitaka u pretvaračima

Prethodno navedene nezavisne promjenjive neophodno je uključiti u proračune tokova snaga a dalje i u optimizacione algoritme u kojima figurišu kao upravljачke promjenjive. U slučaju DC porta koji spaja dva distributivna fidera (prikaz na Sl.1) vektor upravljачkih promjenjivih ima oblik:

$$x = \begin{bmatrix} P_l \\ Q_l \\ Q_m \end{bmatrix}. \quad (7)$$

U slučaju da DC port povezuje n fidera u petlju razmatranja su analogna te u vektoru upravljачkih promjenjivih figuriše ukupno $2n$ injektiranja reaktivnih snaga i $2n-1$ injektiranja aktivnih snaga u poveznim čvorovima.

B. Ograničenja pri optimizaciji

Kao što je već spomenuto pri optimizacionom postupku moraju se definisati ograničenja koja će biti zadovoljena u svakom od normalnih radnih režima. U razmatranom slučaju ograničenja se mogu podijeliti u dvije grupe: ograničenja mreže i ograničenja konvertora korišćenih za realizaciju DC porta.

Ograničenja mreže proizilaze iz karakteristika razmatrane mreže (karakteristike vodova i razvodnih postrojenja) i jednačina za proračun tokova snaga. Ograničenja mreže se dalje mogu klasifikovati u dvije grupe: ograničenja tipa jednakosti i ograničenja tipa nejednakosti. U ograničenja mreže tipa jednakosti spadaju jednačine za proračune tokova snaga koje se mogu prikazati kao:

$$P_i^{gen} - P_i^p = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + V_j B_{ij} \sin(\theta_{ij})), \quad (8)$$

$$Q_i^{gen} - Q_i^p = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - V_j B_{ij} \cos(\theta_{ij})), \quad (9)$$

gdje $i, j=1, 2, 3, \dots, m$ označavaju čvorove u mreži, P_i^{gen}, Q_i^{gen} označavaju proizvodnju a P_i^p, Q_i^p potrošnju aktivne i reaktivne snage u i -tom čvoru. Oznake G_{ij}, B_{ij} , odnose se na realni i imaginarni dio elementa matrice admitansi čvorova na poziciji i, j a $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ označava razliku faznih stavova napona čvorova i i j . Suštinski jednačine (8) i (9) predstavljaju jednačine balansa snaga u čvorovima mreže koje u svakom momentu moraju biti ispunjene.

Ograničenja mreže tipa nejednakosti odnose se na termička ograničenja vodova kao i na ograničenja napona u čvorovima mreže. Ograničenja mreže tipa nejednakosti mogu se predstaviti izrazima:

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{max}, \quad (10)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad (11)$$

gdje $I_{ij}^{max}, V_i^{min}, V_i^{max}$ označavaju granične vrijednosti struja po vodovima i napona u čvorovima mreže respektivno.

Ograničenja konvertora odnose se na termička ograničenja konvertora i ograničenje balansa aktivne snage u DC portu. Termička ograničenja konvertora su ograničenja tipa nejednakosti i mogu se predstaviti izrazom (2). Uslov balansa aktivne snage u DC portu (kroz DC link) predstavlja ograničenje tipa jednakosti i predstavljeno je jednačinom (1).

C. Formiranje kriterijuma optimizacije i kriterijumske funkcije

Uloga kriterijuma optimizacije jeste da se nedvosmisleno definiše cilj optimizacionog postupka tj. da se na osnovu definisanog kriterijuma da kvalitativna ocjena svakog od potencijalnih rješenja. Zavisno od željenog cilja kriterijumi optimizacije mogu biti različiti a za potrebe analiza rada distributivnih mreža sa DC portovima razmatrani su kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage i kriterijum optimalne raspodjele opterećenja po vodovima u mreži.

Kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage može se definisati kao:

$$\min(F_g) = \min(P_{gubitaka}^{mreze} + P_{gubitaka}^{konvertora}). \quad (12)$$

U slučaju da se kao kriterijum optimizacije razmatra optimalno opterećenje vodova u razmatranoj mreži za svaki od vodova potrebno je naći indeks opterećenja kao:

$$LI_k = (I_k / I_k^{nominalno})^2, \quad (13)$$

gdje $k=1, 2, 3, \dots, n$ broj grana (vodova u mreži). Nakon računanja indeksa opterećenja vodova u mreži kriterijum optimalne raspodjele opterećenja može se definisati kao:

$$\min\left(\sum_{k=1}^n LI_k\right). \quad (14)$$

Nakon definisanja kriterijuma optimizacije slijedi formiranje kriterijumske funkcije koja mora uvažavati i ograničenja tipa nejednakosti definisana u prethodnom odjeljku dok se ograničenja tipa jednakosti uvažavaju kroz proračune tokova snaga u mreži. Integracija ograničenje tipa nejednakosti u kriterijumsku funkciju vrši se pomoću penalnih funkcija definisanih za svako od ograničenja ponaosob. Penalna funkcija u slučaju narušavanja termičkih ograničenja vodova može se definisati kao:

$$PF_I = \sum_{k=1}^n \Delta I_k, \quad (15)$$

gdje je:

$$\Delta I_k = \begin{cases} I_k - I_k^{max}, & \text{za } I_k > I_k^{max} \\ 0, & \text{za } I_k \leq I_k^{max} \end{cases}. \quad (16)$$

Penalna funkcija za ograničenja vrijednosti modula napona u čvorovima mreže može se izraziti na sljedeći način:

$$PF_V = \sum_{i=1}^m \Delta V_i, \quad (17)$$

gdje je:

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_i^{\max} & V_i > V_i^{\max} \\ V_i^{\min} - V_i & V_i^{\min} > V_i \\ 0 & \text{za ostale vrednosti } V_i \end{cases} \quad (18)$$

Kada je riječ o penalnoj funkciji vezanoj za termička ograničenja konvertora, ona se može zapisati kao:

$$PF_{konvertora} = \sum_{h=1}^p \Delta S_h, \quad (19)$$

gdje je:

$$\Delta S_h = \begin{cases} S_h - S_h^{nominalno} & S_h > S_h^{nominalno} \\ 0 & S_h \leq S_h^{nominalno} \end{cases} \quad (20)$$

a p označava ukupan broj pretvarača koji formiraju DC port.

Poznavajući kriterijum optimizacije i penalne funkcije, definisane za svako od ograničenja, moguće je formirati kriterijumsku funkciju kao:

$$F_1 = (P_{gubitaka}^{mreze} + P_{gubitaka}^{konvertora}) + \lambda_I PF_I + \lambda_V PF_V + \lambda_C PF_{konvertora}, \quad (21)$$

u slučaju da je kao kriterijum optimizacije definisana minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage odnosno:

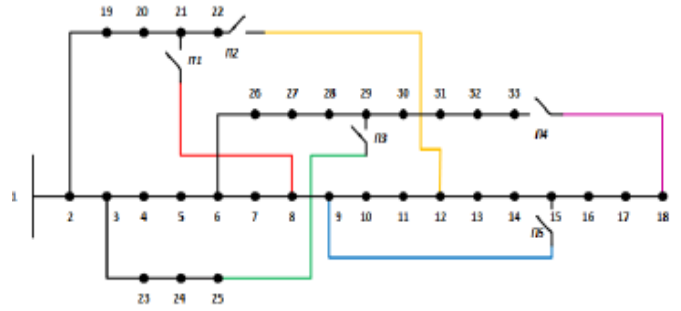
$$F_2 = \sum_{k=1}^n LI_k + \lambda_I PF_I + \lambda_V PF_V + \lambda_C PF_{konvertora}, \quad (22)$$

u slučaju da je za kriterijum optimizacije definisan optimalni balans opterećenja po granama mreže. Koeficijenti λ_I , λ_V , λ_C predstavljaju penalizacione faktore kojima se modeluje uticaj narušavanja definisanih ograničenja na kriterijumsku funkciju. Adekvatnim izborom ovih faktora praktično se eliminišu rješenja optimizacije koja ne zadovoljavaju definisana ograničenja [9].

Model opisan u prethodnim paragrafima moguće je implementirati korišćenjem neke od meta-heurističkih optimizacionih metoda. Važno je napomenuti da izbor optimizacione metode ne zavisi od definisanog modela već isključivo od željenih performansi te u ovom slučaju optimizaciona metoda predstavlja alat za implementaciju i testiranje predloženog modela.

IV. REZULTATI SIMULACIJA

Predloženi model primjene DC porta u distributivnim mrežama testiran je na IEEE 33 test mreži prikazanoj na Sl. 3. Prikazana mreža modifikovana je na način da su na mjesta normalno otvorenih prekidača postavljeni DC portovi. Ovakav izbor lokacije DC portova je opravdan s obzirom da je u praksi najjednostavnije instalirati DC portove u dijelovima razvodnih postrojenja koji su namijenjeni za rekonfiguraciju mreže. Nominalna prividna snaga konvertora (a samim tim i DC porta) fiksirana je na vrijednos od 3 MVA. Ovako usvojena vrijednost u skladu je sa parametrima realnih konvertora koji se trenutno nude na tržištu.



Sl. 3. IEEE 33 distributivna test mreža

Zbog pojednostavljenja analiza pri modelovanju gubitaka u konvertorima korišćen je linearizovani model.

Kao metoda optimizacije, korišćena pri simulacijama, odabrana je optimizacija zasnovana na algoritmu sivih vukova – *Grey Wolf Optimizer*. Navedena metoda optimizacije detaljno je opisana u [10]. Metoda optimizacije bazirana na algoritmu sivih vukova predstavlja kompromis između performansi i preciznosti sa jedne, i jednostavnosti i neophodnih računarskih resursa sa druge strane. Izbor metode optimizacije ne utiče na krajnje zaključke te je za implementaciju modela moguće koristiti i neku drugu optimizacionu metodu. Za proračun tokova snaga u mreži korišćen je modifikovani algoritam, baziran na matrici impedansi čvorova mreže, detaljno opisan u [11]. Slično kao i pri izboru metoda optimizacije, izbor algoritma za proračun tokova snaga zavisi od željenih performansi i preciznosti te se umjesto navedenog algoritma mogao koristiti i neki drugi algoritam razvijen za proračune tokova snaga u distributivnim mrežama [12].

Pri izvođenju simulacija razmatrana su oba opisana kriterijuma optimizacije, a variran je i broj DC portova u mreži. Dobijeni rezultati poređeni su kako međusobno tako i sa baznim stanjem u mreži (potpuno radijalna topologija). Za svaki od vodova u mreži definisana su termička ograničenja a ograničenja napona usvojena su kao: $V_{\min}=0,9$ r.j. i $V_{\max}=1,05$ r.j.

A. Minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage

U prvom slučaju kao kriterijum optimizacije usvojena je minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži. Razmatrane su tri konfiguracije mreže: jedan DC link između čvorova 22 i 12, dva DC linka i to jedan između čvorova 12 i 22 i drugi između čvorova 25 i 29. Kao treći, granični, slučaj razmatrano je prisustvo 5 DC portova u mreži odnosno slučaj kada su sve petlje u mreži zatvorene koristeći DC linkove. Rezultati simulacija prikazani su u tabeli 1.

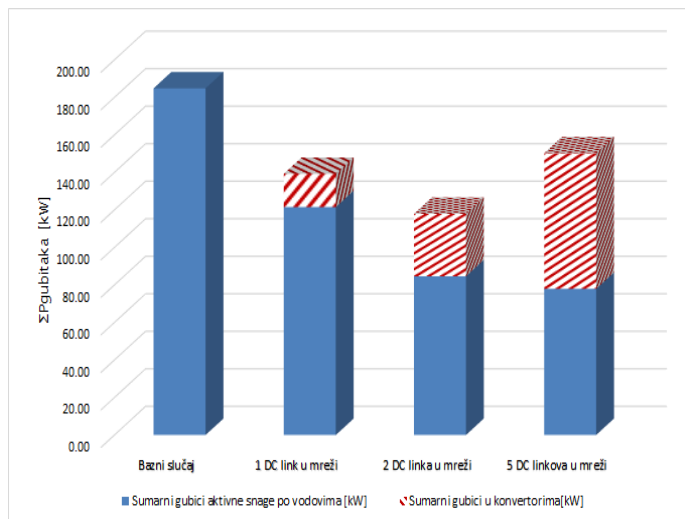
Analizirajući rezultate prikazane u tabeli 1 jasno se uočava kako dodavanjem petlji zatvorenih pomoću DC linkova opadaju gubici u distributivnim vodovima a javljaju se gubici u konvertorima. Struktura ukupnih gubitaka aktivne snage za razmatrane karakteristične slučajeve prikazana je na Sl. 4. Zatvaranjem jedne petlje u mreži ukupni gubici aktivne snage smanjuju se za više od 24% u odnosu u na bazni slučaj. Udio gubitaka u konvertorima u ukupnim gubicima u ovom slučaju iznosi 14,6%.

TABELA I. REZULTATI SIMULACIJA – MINIMIZACIJA SUMARNIH GUBITAKA AKTIVNE SNAGE

	Bazni slučaj	1 DC link u mreži	2 DC linka u mreži	5 DC linkova u mreži
Sumarni gubici aktivne snage po vodovima [kW]	184,7572	121,5028	84,5903	77,8684
Sumarni gubici u konvertorima [kW]	-	17,7192	33,2780	72,2986
Minimalna vrijednost napona u mreži	0,9176 r.j. čvor 18	0,9381 r.j. čvor 33	0,9641 r.j. čvor 33	0,969 r.j. čvor 32

Također, iz rezultata simulacija vidljivo je značajno poboljšanje naponskog profila u mreži. Minimalni napon sa 0,9176 r.j. u baznom slučaju povećava se na 0,969 r.j. u slučaju sa 5 DC linkova u mreži. Maksimalna vrijednost napona u svim simuliranim slučajevima ne prelazi 1,00 r.j. (vrijednost održavana u napojnom čvoru) što je direktna posljedica ograničenja usvojenih pri simulacijama. Povećanjem broja petlji u mreži tj. povećanjem broja DC portova u mreži ukupni gubici aktivne snage u mreži i dalje se smanjuju ali dolazi do značajnog porasta gubitaka u konvertorima. Ovakav rezultat je i očekivan s obzirom da porastom broja petlji raste i broj konvertora neophodnih za njihovo zatvaranje te gubici u konvertorima imaju značajne vrijednosti. Kao granični slučaj analizirana je topologija sa 5 petlji u mreži tj. 5 DC portova jedinične nominalne snage 3 MVA. U ovom slučaju gubici u vodovima su značajno manji u odnosu na bazni slučaj. Na uštrb smanjenja gubitaka po vodovima za više od 57% povećani su gubici u konvertorima koji su približno jednaki gubicima u distributivnim vodovima.

Iz prethodno navedenih rezultata mogu se generalizovati sljedeći zaključci. Dodavanjem petlji u mreži pomoću DC portova moguće je značajno smanjiti gubitke u distributivnim vodovima i na taj način izvršiti neophodna rasterećenja. Međutim, usljed dodavanja DC portova javljaju se gubici u konvertorima koji utiču na sumarne gubitke u mreži.



Sl. 4. Struktura ukupnih gubitaka aktivne snage

U slučaju velikog broja konvertora smanjenje gubitaka u vodovima vrši se na način da se dio tih gubitaka eliminiše usljed rasterećenja vodova a istovremeno rastu gubici u konvertorima koji mogu biti jednaki ili čak i veći od gubitaka u vodovima. Pri ovoj analizi važno je napomenuti da gubici u konvertorima zavise i od nominalne snage samih konvertora te se adekvatnim dimenzionisanjem konvertora ovi gubici mogu redukovati. Izbor tipa konvertora i njegovi parametri prevashodno zavise od željenih performansi sa jedne i finasijskih ograničenja sa druge strane te nisu tema ovog rada.

B. Preraspodjela opterećenja vodova u mreži

Drugi dio simulacija realizovan je uvažavajući balans opterećenja distributivnih vodova kao kriterijum optimizacije. Za svaki od vodova u mreži usvojene su termičke granice te je relativno opterećenje vodova računato za svaki od prethodno navedenih slučajeva (bazni slučaj, 1 DC link u mreži, 2 DC linka i 5 DC linkova u mreži). Rezultati simulacija prikazani su u tabeli 2. Iz rezultata prikazanih u tabeli 2 lako se uočava da se značajno rasterećenje vodova postiže već dodavanjem samo jednog DC linka u mreži. Zatvaranjem petlji pomoću DC linkova u mreži dobija se potpuna preraspodjela opterećenja te se opterećenje sa napojne grane (između čvorova 1 i 2) rapodjeljuje na ostale grane u mreži. Pri tome, grane koje su direktno povezane sa čvorovima na koje su vezani DC linkovi postaju najopterećenije grane u mreži.

Preraspodjelom opterećenja vodova u mreži značajno se poboljšava i naponski profil mreže što je ilustrovano na Sl. 5. Poboljšanje naponskih prilika u mreži direktna je posljedica rada DC portova a osim snage koja se injektira ka mreži značajno zavisi i od lokacije DC porta kao i od karakteristika potrošača u mreži.

V. ZAKLJUČAK

Primjenom uređaja energetske elektronike omogućava se zatvaranje petlji u distributivnim mrežama uz mogućnost kontrole tokova snaga u određenim dijelovima mreže. Predložena upravljačka strategija omogućava integraciju DC portova u proračune tokova snaga bez detaljnog modelovanja energetskih pretvarača što značajno smanjuje neophodne računarske resurse i znatno olakšava implementaciju upravljačkog algoritma.

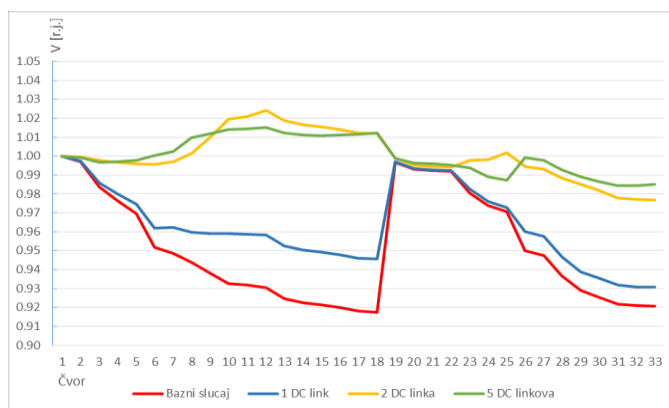
Optimizacioni okvir opisan u prethodnim poglavljima primjenjiv je bez obzira na to koja se metoda optimizacije koristi za njegovu realizaciju. Kriterijumi optimizacije postavljeni su na način da se prikažu različiti efekti koji se mogu postići zatvaranjem petlji pomoću DC linkova u distributivnim mrežama.

Na osnovu računarskih simulacija demonstriran je uticaj DC linkova na prilike u mreži. Kao glavna prednost primjene DC linkova javlja se značajno rasterećenje distributivnih vodova te povećanje efikasnosti distributivne mreže. Rasterećenjem postojećih resursa odgađaju se investicije u proširenje distributivne mreže te se otvara mogućnost eventualnog plasmana dodatne energije proizvedene iz distribuiranih generatora.

TABELA II. RELATIVNA OPTEREĆENJA VODOVA

Grana (vod)		Bazni slučaj	1 DC link u mreži	2 DC linka u mreži	5 DC linkova u mreži
Čvor 1	Čvor 2	I [%]	I [%]	I [%]	I [%]
1	2	92.41%	82.80%	21.62%	27.16%
2	3	81.88%	70.63%	11.50%	17.40%
3	4	58.81%	47.44%	10.34%	3.75%
4	5	55.88%	44.62%	8.55%	6.61%
5	6	54.46%	43.21%	7.81%	8.00%
6	7	25.54%	22.74%	14.68%	28.06%
7	8	20.63%	20.04%	19.28%	32.49%
8	9	15.69%	18.26%	23.90%	9.13%
9	10	14.30%	17.79%	25.22%	5.88%
10	11	12.99%	17.43%	26.54%	7.03%
11	12	11.87%	17.50%	27.63%	8.13%
12	13	10.53%	10.44%	10.30%	6.95%
13	14	9.09%	9.00%	8.86%	6.14%
14	15	5.91%	5.91%	5.93%	5.19%
15	16	4.76%	4.73%	4.68%	5.48%
16	17	3.44%	3.41%	3.37%	6.19%
17	18	2.24%	2.17%	2.05%	7.07%
2	19	26.24%	32.54%	26.14%	24.10%
19	20	19.69%	26.49%	19.58%	18.01%
20	21	13.13%	20.74%	13.01%	12.42%
21	22	6.51%	15.62%	6.45%	8.44%
3	23	42.63%	42.66%	3.58%	38.37%
23	24	38.26%	38.30%	4.87%	34.47%
24	25	19.38%	19.38%	23.24%	18.13%
6	26	68.85%	68.02%	46.04%	46.00%
26	27	65.39%	65.06%	43.12%	43.02%
27	28	62.30%	62.00%	40.25%	40.07%
28	29	59.61%	59.80%	37.41%	37.16%
29	30	53.16%	52.85%	51.00%	40.33%
30	31	23.19%	23.23%	23.48%	21.42%
31	32	14.92%	14.96%	15.21%	15.54%
32	33	2.77%	2.80%	3.00%	10.88%

Kao osnovni nedostatak primjene DC linkova u distributivnim mrežama figurišu gubici u energetskim pretvaračima. Gubici u pretvaračima zavise kako od karakteristika pretvarača tako i od njihovog opterećenja i od željenog režima rada. Povećanjem broja DC linkova u mreži dolazi do značajnog porasta gubitaka u pretvaračima (usljed porasta neophodnog broja energetskih pretvarača), poskupljuje realizaciju sistema, a sa druge strane ne dovodi do značajnijeg smanjenja ukupnih gubitaka. Odabir broja DC linkova u mreži i njihovo pozicioniranje predstavlja složenu problematiku te može poslužiti kao proširenje naučno-istraživačkog rada u ovoj oblasti.



Sl. 5. Naponski profil mreže

VI. LITERATURA

- [1] R. C. Dugan, „Challenges in Considering Distributed Generation in the Analysis and Design of Distribution Systems“, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 2008.
- [2] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, T. Green, „Operating principle of Soft Open Points for electrical distribution network operation“, Applied Energy no. 164, 2016, pp. 245-257.
- [3] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, T. Green, „Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation“, Applied Energy no. 165, 2016, pp. 36-47.
- [4] C. Wang, G. Song, P. Li, H. Ji, J. Zhao, J. Wu, „Optimal Configuration of Soft Open Point for Active Distribution Network Based on Mixed-integer Second-order Cone Programming“, Applied Energy Symposium and Forum, REM2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid, Maldives April 2016.
- [5] A. Yazdani and R. Iravani, „Voltage-sourced Converters in Power Systems“. Wiley-Blackwell, 2010.
- [6] N. Okada, „A method to determine the distributed control setting of looping devices for active distribution systems“, in Proc. IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1–6.
- [7] E. Romero-Ramos, A. Gómez-Expósito, A. Marano-Marcolini, and J. Maza-Ortega, „Assessing the loadability of active distribution networks in the presence of DC controllable links“, Generation, Transmission and Distribution, IET, vol. 5, no. 11, pp. 1751–8687, Nov. 2011.
- [8] Branko Dokić, „Energetska elektronika – pretvarači i regulatori“, Akademiska misao, Beograd 2007.
- [9] Narayan S. Rau, „Optimization principles, Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry“, IEEE Press Power Engineering Series, A John Wiley & Sons Inc Publication
- [10] D. Šošić, „Metode određivanja raspoloživog prenosnog kapaciteta u visokonaponskim prenosnim mrežama elektroenergetskog sistema“, doktorska disertacija, ETF Beograd 2015.
- [11] D. Ivić, D. Macanović, D. Šošić, P. Stefanov, „Weakly meshed distribution networks with distributed generation — power flow analysis using improved impedance matrix based algorithm“, The International Symposium on Industrial Electronics – INDEL, Banja Luka 2016.
- [12] D. Shirmohammadi, H. M. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, "A Compensation based Power Flow for weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 3, pp. 753-762, 1988.

ABSTRACT

Except the basic role, to deliver enough quantity of electric energy at proposed quality level, modern distribution systems have to enable easy integration of distributed generators and their participating in deregulated energy market. In that circumstances, adjusting and exploiting existing resources in order to avoid and postpone reinforcement investments are classified as main goals during distribution system's exploitation. Methodology for closing loops using power electronics devices is proposed in this paper. Coordination between local control of power electronics devices and centralized DMS control define a core of proposed control strategy whose main purpose is achieving referent values for power electronics local controllers. Control algorithms proposed in this paper are tested on IEEE 33 bus network using computer simulations. Conclusions derived based on simulation results can serve as starting points for future efficiency and cost-benefit analysis.

DC SOFT OPEN POINTS -IMPLEMENTATION FOR CLOSING LOOPS IN DISTRIBUTION NETWORKS

Dejan Ivic, Darko Sosic, Predrag Stefanov

Metod za određivanje uticaja prepreka na godišnju proizvodnju fotonaponskih sistema

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, BiH
cedomir.zeljkovic@etf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org, bojan.erceg@etf.unibl.org

Sažetak—Tema rada je metodologija za određivanje godišnje proizvodnje fotonaponskih sistema uz uvažavanje uticaja okolnih objekata koji prave sjenku. Odabrani su prigodni matematički modeli kojima se adekvatno uvažavaju geometrijske i energetske karakteristike sistema. Procjena godišnje proizvodnje izvršena je u skladu sa principom tipične meteorološke godine za razmatranu lokaciju, a navedene su i smjernice ka proširenju metodologije gdje bi takođe bile uvažene i stohastičke karakteristike iradijance na površini Zemlje. Opisani matematički modeli i predloženi algoritam su implementirani softverski, te je izvršeno njihovo testiranje na ilustrativnom primjeru.

Ključne riječi—fotonaponski sistemi; uticaj prepreka; softverski alat; praktična primjena.

I. UVOD

Fotonaponska tehnologija za proizvodnju električne energije u posljednjim decenijama doživljava rapidan razvoj. Do kraja 2016. godine globalna instalirana snaga dostigla je vrijednost od minimalno 303 GW, a svjetski lideri su Kina (78 GW), Japan (42,8 GW), Njemačka (41,8 GW) i SAD (40,3 GW) [1]. Republika Srpska, budući da je locirana na jugu Evrope, ima odlične predispozicije za proizvodnju energije iz fotonaponskih sistema [2]. Otežavajuću okolnost za masovniju primjenu ove tehnologije predstavlja relativno niska maloprodajna cijena električne energije koja se dobija iz konkurentskih konvencionalnih izvora - termoelektrana i velikih hidroelektrana. Do napretka u posljednjih nekoliko godina je ipak došlo zahvaljujući mjerama podsticaja. Prema podacima informativnog karaktera koje je objavila Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske, u septembru 2017. godine u sistemu podsticaja radi pedesetak solarnih elektrana sa ukupnom instalisanom snagom od nešto preko 5 MW [3]. Očigledno je da u apsolutnom iznosu instalirana snaga u poređenju sa dostignućima svjetskih lidera i dalje ima praktično zanemarljivu vrijednost, ali gledano procentualno, ostvaruje se stabilan pozitivan trend.

Kada se razmatra mogućnost investiranja u fotonaponski sistem na nivou idejnog projekta, polazi se od podatka o broju sunčanih sati, te se procijenjena godišnja proizvodnja energije koristi u proračunu ekonomske opravdanosti. Pri tome se smatra da je sistem izgrađen na lokaciji gdje okolni objekti svojim sjenkama nikada ne zaklanjaju fotonaponske panele. U slučajevima kada su fotonaponski sistemi montirani u gradskim sredinama, bilo na krovovima ili kao dijelovi fasada, postoji značajna vjerovatnoća da će u pojedinim dijelovima dana paneli djelimično ili potpuno biti u sjenci okolnih prepreka. Po-

javu sjenčenja treba ozbiljno razmotriti s obzirom da je iz teorije fotonaponskih sistema poznato da zaklanjanje čak i male površine fotonaponskog modula dovodi do neproporcionalno većeg gubitka u proizvodnji energije [4].

Postoje komercijalni softverski paketi koji uvažavaju uticaj prepreka, ali njihova cijena predstavlja ograničavajući faktor u slučajevima kada je broj projekata mali. Matematički alat ipak nije previše složen i moguće je realizovati sopstveno rješenje pomoću kojeg bi se generisali rezultati u granicama prihvatljive tolerancije.

II. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Korišćena metodologija se bazira na dvije osnovne komponente proračuna: geometrijskoj i energetskej komponenti. U geometrijskom pogledu potrebno je obratiti pažnju na položaj panela i okolnih prepreka, te položaj Sunca na nebeskoj sferi, koji se mijenja u zavisnosti od doba dana i doba godine. U energetskom smislu bitno je uvažiti koliki fluks Sunčevog zračenja dolazi na panele u zavisnosti od geometrijske situacije, te kakav je način fotonaponske konverzije i konverzije jednosmjernje u naizmjeničnu struju.

Računarski algoritam je koncipiran na sljedeći način:

1. Učitavanje fiksnih parametara
 - 1.1. Učitavanje geografskih koordinata lokacije
 - 1.2. Učitavanje pozicija i orijentacije panela
 - 1.3. Učitavanje geometrije prepreka
2. Petlja za svaki čas u godini (8760 časova)
 - 2.1. Određivanje pozicije Sunca
 - 2.2. Određivanje iradijance na panele
 - 2.3. Određivanje broja panela koji nisu u hladu
 - 2.4. Konverzija iradijacije u DC snagu
 - 2.5. Konverzija DC snage u AC snagu
3. Sumiranje na nivou godine
 - 3.1. Računanje totalne godišnje proizvedene energije
 - 3.2. Poređenje sa teorijskim slučajem bez prepreka

III. GEOMETRIJA SJENČENJA

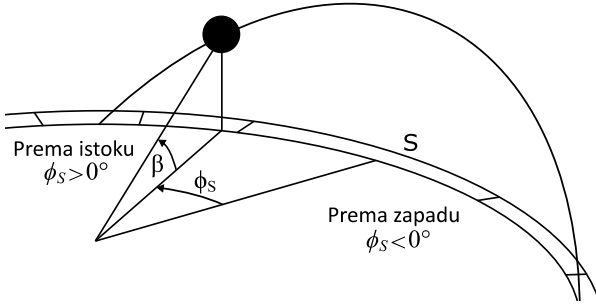
A. Formule za položaj Sunca na nebeskoj sferi

Ugao elevacije (β) i azimuta (ϕ_s) Sunčevog diska na nebu (prikazani na slici 1) zavise od geografske širine lokacije koju posmatramo, dana u godini i doba dana.

Matematički izrazi koji ih opisuju uobičajeno se u literaturi prikazuju u formi sinusa tih uglova na ovaj način [5]:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta, \quad (1)$$

$$\sin \phi_S = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta}. \quad (2)$$



Sl. 1. Definicija uglova položaja Sunca: elevacije (β) i azimuta (ϕ_S)

U jednačinama je sa L označena geografska širina lokacije posmatrača, H je satni ugao, a δ je ugao deklinacije Sunca za određeni dan u godini. Satni ugao H ima onoliko stepeni koliko treba Zemlji da rotira da bi Sunce bilo tačno iznad lokalnog meridijana na kojem se nalazi posmatrač. Pozivajući se na činjenicu da ugaona brzina Zemljine rotacije iznosi 15° na čas, satni ugao možemo opisati sljedećom formulom:

$$H = 15 \left[\frac{\circ}{h} \right] \cdot T_{dsp} [h], \quad (3)$$

gdje je sa T_{dsp} označeno vrijeme preostalo do solarnog podneva. Primjera radi u 10 časova po solarnom vremenu, satni ugao iznosi 30° , jer do podneva treba da proteknu dva časa. Ugao deklinacije Sunca predstavlja ugao između zraka Sunca i ravni Zemljinog ekvatora. Zbog nagiba Zemlje ugao deklinacije se periodično mijenja iz dana u dan tokom godine, a njegova vrijednost u radijanima može se procijeniti pomoću Spenserove formule [6]:

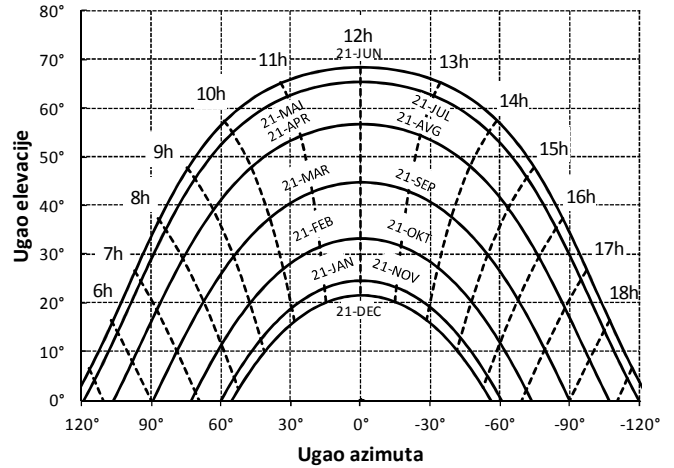
$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,39912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) \\ & - 0,006758 \cos(2\Gamma) + 0,000907 \sin(2\Gamma) \\ & - 0,002697 \cos(3\Gamma) + 0,00148 \sin(3\Gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

gdje pomoćna promjenljiva Γ označava ugao dana takođe izražen u radijanima, koji se na osnovu rednog broja dana u godini n , određuje pomoću sljedeće formule:

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365}. \quad (5)$$

Sunčeve putanje, kada se posmatraju sa iste lokacije na Zemlji, očigledno su svake godine identične i u potpunosti predvidljive. Za praktičnu upotrebu zgodno je konstruisati dijagram putanje Sunca, grafikon prikazan u dvije dimenzije, sa kojeg bi se mogla očitati pozicija Sunca u bilo kom trenutku tokom godine. Ideja je da se na apscisi prikaže azimutalni, a na ordinati elevacioni ugao pozicije Sunca. S obzirom da ovi uglovi predstavljaju funkciju od geografske širine L , satnog ugla H i ugla deklinacije δ , nemoguće je sve promjenljive prikazati na jednom dijagramu. Zbog toga se za različite geografske širine crtaju posebni dijagrami, dok se promjena satnog

ugla i ugla deklinacije uvažava crtanjem familija krivih na dvodimenzionalnim dijagramima. Radi lakše praktične upotrebe, satni ugao se konvertuje u solarno vrijeme, a ugao deklinacije u datum. Primjer takvog dijagrama putanje Sunca za geografsku širinu grada Banje Luke ($44,78^\circ$ N) prikazan je na slici 2. Na navedenom dijagramu krive konstantnog ugla deklinacije, koje odgovaraju karakterističnim datumima, prikazane su punim linijama. Krive konstantnog satnog ugla, koje odgovaraju časovima po solarnom vremenu, označene su isprekidanim linijama.



Sl. 2. Dijagram putanje Sunca (geografska širina $44,78^\circ$ N)

Potrebno je napomenuti da solarno vrijeme ne koincidira sa lokalnim standardnim vremenom kojeg očitavamo na svojim časovnicima, nego da postoji mala razlika koja se mijenja tokom godine. Preračunavanje solarnog vremena (ST) u lokalno vrijeme (LT) moguće je izvršiti pomoću sljedeće formule:

$$LT = ST - E \pm 4 \left[\frac{\text{min}}{\circ} \right] \cdot (LTM - LL), \quad (6)$$

gdje su LTM meridijan lokalnog vremena i LL lokalna geografska dužina, pri čemu se znak "+" koristi za istočnu hemisferu, a znak "-" za zapadnu.

Prvi dio korekcije, označen sa E , u literaturi se naziva *jednačina vremena* (engl. *equation of time*). Njom se uvažava kombinovani uticaj Zemljine eliptične putanje oko Sunca i kosog položaja njene ose rotacije. Vrijednost jednačine vremena može se procijeniti pomoću sljedećeg matematičkog izraza:

$$E = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B, \quad [\text{min}] \quad (7)$$

gdje je B pomoćna promjenljiva koja se na osnovu dana u godini n dobija ovako:

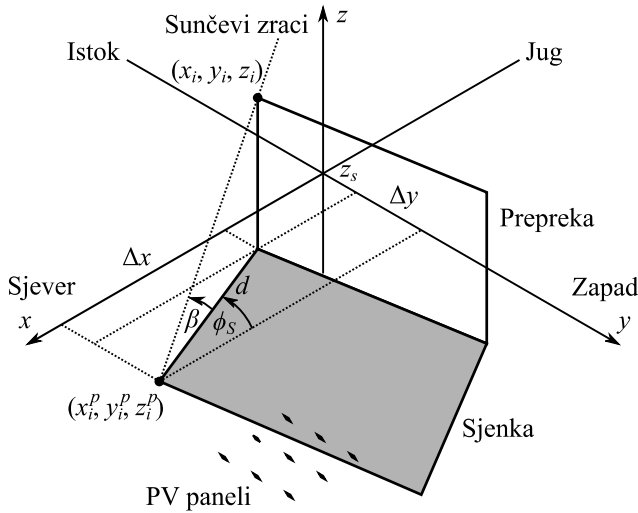
$$B = \frac{360}{364} (n - 81), \quad [^\circ]. \quad (8)$$

Drugim dijelom korekcije uvažava se efekat razlike geografske dužine razmatrane lokacije u odnosu na geografsku širinu središnjeg meridijana lokalne časovne zone.

Lokalnom vremenu se eventualno dodaje još 60 minuta, ukoliko je na snazi ljetno računanje vremena.

B. Usvojeni model određivanja položaja i dimenzije sjenke

Položaj sjenke zavisiće od dimenzija objekta i ugla pod kojim dolaze Sunčevi zraci. Položaj Sunca ćemo u skladu sa objašnjenjima iz prethodne sekcije opisati sa azimutalnim uglom ϕ_S i uglom elevacije β . Prepreku ćemo modelovati kao skup poligona u 3D prostoru predstavljenih nizom tačaka (x_i, y_i, z_i) . Koristiće se matematički algoritam za testiranje da li se tačka nalazi unutar poligona. Centar fotonaponskog panela će biti modelovan tačkom, a tražiće se po poligonu koji predstavlja sjenku. Na primjeru sa slike 3 se vidi da je prvi red panela zahvaćen sjenkom, a da preostala dva nisu.



Sl. 3. Geometrija vezana za određivanje položaja sjenke

Dužina sjenke za tačku (x_i, y_i, z_i) na horizontalnom nivou visine z_s se računa po formuli:

$$d = \frac{z_i - z_s}{\tan \beta}, \quad (6)$$

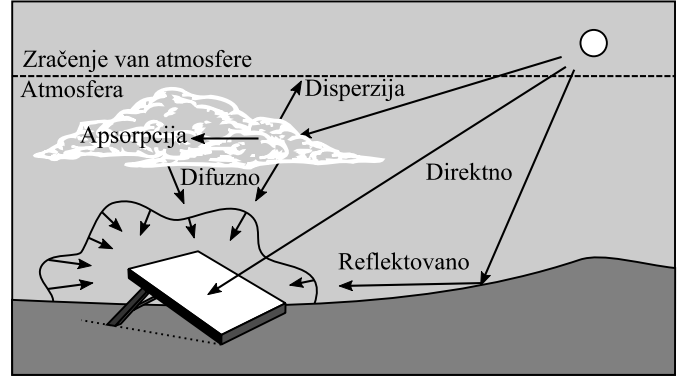
a potom se pomoću izračunate dužine sjenke, jednostavno mogu izraziti pozicije projekcije tačke (x_i, y_i, z_i) u xy ravni na visini z_s :

$$x_i^p = x_i + \Delta x = x_i + d \cos \phi_S, \quad (7)$$

$$y_i^p = y_i + \Delta y = y_i + d \sin \phi_S. \quad (8)$$

IV. MODELOVANJE SUNČEVOG ZRAČENJA

Sunčevo zračenje koje pada na kolektor se sastoji od tri komponente: direktne, difuzne i reflektovane (slika 4). Direktna komponenta zračenja predstavlja dio zračenja koje pravolinijski putuje od Sunca ka kolektoru, difuzna komponenta je dio zračenja koje je rasuto od molekula i aerosoli u atmosferi, a reflektovana komponenta je dio zračenja koji nastaje odbijanjem zračenja od površine zemlje i predmeta u okolini kolektora.



Sl. 4. Komponente snage Sunčevog zračenja na kolektor

Intenzitet direktne komponente zračenja na proizvoljno postavljenoj lokaciji I_B u posmatranom trenutku i incidentnog ugla θ , tj. ugla između linije Sunčevih zraka i normale na posmatrani kolektor:

$$I_{BC} = I_B \cos \theta. \quad (9)$$

Incidentni ugao je funkcija položaja kolektora i položaja Sunca:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma, \quad (10)$$

gdje se pojavljuju nove promjenljive, Σ kao ugao nagiba panela u odnosu na horizontalu i ϕ_C kao azimutni ugao panela [5].

Za razliku od direktne komponente zračenja, difuznu komponentu je mnogo teže estimirati. Difuzna komponenta zračenja koja pada na površinu Zemlje nastaje rasipanjem zračenja u atmosferi usljed čestica i vlage, te refleksijom od oblaka. Takođe, dio difuzne komponente potiče od zračenja koje se reflektuje od površine Zemlje u atmosferu i rasipa, te ponovo pada na Zemlju. Shodno potrebama estimacije difuzne komponente, te odnosa između kompleksnosti i preciznosti, razvijeni su modeli u kojima se atmosfera u okolini panela posmatra kao izotropna, odnosno anizotropna sredina. Model izotropne sredine podrazumijeva da difuzna komponenta ravnomjerno sa svih strana dopijeva na horizontalno postavljen kolektor. Prema tome, za kolektor postavljen pod proizvoljnim uglom Σ difuzna komponenta je jednaka [5]:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right), \quad (11)$$

gdje je I_{DH} difuzna komponenta zračenja na horizontalnu podlogu.

Tokom maglovitih i oblačnih dana može se primjetiti da je nebo svjetlije u okolini gdje Sučevi zraci padaju na oblake i na horizontu. Model difuznog zračenja koji uvažava ove efekte podrazumijeva da je sredina anizotropna, te intenzitet zračenja nije isti sa svih strana. Za proračun difuzne komponente zračenja u ovom slučaju se koristi složeniji model, koji pored ugla kolektora, zahtijeva i podatke o uglu elevacije Sunca te koeficijentima koji zavise od vremenskih uslova [7]:

$$I_{DC} = I_{DH} \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \Sigma \right], \quad (12)$$

gdje su F_1 i F_2 koeficijenti koji zavise indeksa čistine neba, a promjenljive a i b su jednake:

$$a = \max(0, \cos \theta), \quad (13)$$

$$b = \max(0, \sin \beta). \quad (14)$$

U ovom radu, za estimaciju difuzne komponente zračenja koja dopijeva na kolektor korišćen je izraz (12), u kome koeficijenti koji zavise od vremenskih uslova uzimaju konstantne vrijednosti $F_1 = 0,1591$ i $F_2 = 0,0847$. Ovo dovodi do greške pri estimaciji difuzne komponente zračenja koja može biti pozitivna i negativna zavisno od indeksa čistine neba. Na ovaj način se estimira veći intenzitet difuznog zračenja tokom oblačnih dana, odnosno manji intenzitet tokom vedrih dana u odnosu na stvarnu vrijednost.

Reflektovana komponenta zračenja se dobija koristeći jednostavan model u kome se podrazumijeva velika horizontalna površina ispred panela sa koeficijentom refleksije ρ . Zračenje koje pada na tu površinu sastoji se od direktne i difuzne komponente. Koeficijent refleksije zavisi od vrste podloge, pa na primjer za svjež snijeg kreće se oko 0,8, a za asfalt i šljunak oko 0,1. Tipična vrijednost koja se koristi je 0,2 i onda odgovara travnatoj površini. Pored koeficijenta refleksije, direktne i difuzne komponente zračenja na horizontalnu podlogu za proračun reflektovane komponente potreban je i ugao panela Σ :

$$I_{RC} = \rho (I_B \sin \beta + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right). \quad (15)$$

V. PROCJENA PROIZVEDENE ENERGIJE

Iradijacija koja pada na fotonaponske panele prvo prolazi kroz zaštitno staklo, nakon čega se pretvara u DC snagu koja se dobija na priključcima panela i na kraju pomoću invertora u AC snagu čime je omogućeno da se fotonaponski paneli priključe na elektroenergetsku mrežu. Pri prelamanju Sunčevih zraka, instalaciji za povezivanje panela i invertora, te konverzijama dolazi do gubitaka. Prelamanje Sunčevih zraka, primjenjuje samo za direktnu komponentu zračenja, kroz zaštitno staklo je uvaženo prema [9], dok je apsorpcija zanemarena.

Za konverziju iradijacije koja dopijeva na fotonaponske ćelije koristi se izraz:

$$P_{DC} = \frac{I_r}{1000} P_{DC0} (1 + \gamma (T_{cell} - 25)), \quad (16)$$

gdje je I_r iradijacija na fotonaponske ćelije panela, P_{DC0} nominalna snaga panela, γ temperaturni koeficijent promjene snage sa promjenom temperature ćelije i T_{cell} temperatura ćelije koja se računa prema [10].

Gubici u sistemu nisu eksplicitno modelovani nego je izvršeno umanjeno DC snage na priključcima panela za iznos gubitaka. Na osnovu [11] procijenjeno je da su gubici u sistemu 11%, ne računajući gubitke u invertoru. Gubici u invertoru nisu na ovaj način uvaženi iz razloga što se oni značajno mijenjaju u zavisnosti od opterećenja invertora. Za njihovo mode-

lovanje korišćen je kompleksniji model koji se zasniva na promjeni stepena iskorišćenja invertora u zavisnosti od relativnog opterećenja:

$$\eta = \frac{\eta_{nom}^2}{\eta_{ref}} \left(0,9858 - 0,0162\zeta - \frac{0,0059}{\zeta} \right), \quad (17)$$

gdje su: ζ relativno opterećenje invertora, η_{nom} nominalni stepen iskorišćenja invertora i η_{ref} referentni stepen iskorišćenja:

$$\eta_{ref} = 0,9637 \frac{P_{AC0}}{P_{DC0}}, \quad (18)$$

gdje su: P_{AC0} i P_{DC0} nazivne snage invertora na AC i DC strani, respektivno [12]. I na kraju, snaga koja se isporučuje u elektroenergetsku mrežu je:

$$P_{AC} = \begin{cases} \eta P'_{DC} & 0 < P'_{DC} < P_{DC0} \\ P_{DC0} & P'_{DC} \geq P_{DC0} \\ 0 & P'_{DC} = 0 \end{cases}, \quad (19)$$

gdje je P'_{DC} snaga na priključcima panela umanjena za iznos gubitaka.

A. Osnovni metod baziran na tipičnoj meteorološkoj godini

U skladu sa formulama (9), (12) i (15) osnov za proračun ukupne iradijance solarnih kolektora predstavljaju direktna komponenta zračenja I_B i difuzna komponenta zračenja na horizontalnu podlogu I_{DH} . U jednostavnijem, determinističkom načinu modelovanja, smatra se da I_B i I_{DH} uzimaju tipične vrijednosti izračunate kao prosjek na osnovu dugotrajnih mjerenja. Ovaj princip je poznat kao metod tipične meteorološke godine - TMY (engl. *Typical Meteorological Year*), a vrijednosti za različite lokacije na svijetu moguće je dobiti korišćenjem kalkulatora *PVWatts* američke Nacionalne laboratorije za obnovljive energije - NREL (engl. *National Renewable Energy Laboratory*) [8]. Na ovaj način, kao konačni rezultat se dobija tipična vrijednost godišnje proizvodnje fotonaponskog sistema. Računajući da je eksploatacioni period fotonaponskih sistema relativno dug (npr. i do 30 godina), množenjem broja godina rada i tipične godišnje proizvodnje dobija se solidna procjena proizvodnje koju bi sistem ostvario na nivou cijelog životnog vijeka.

B. Probabilistički pristup

Probabilistički pristup je složeniji od determinističkog, ali daje preciznije i sveobuhvatnije rezultate. Umjesto jednog tipičnog scenarija, kao ulaz se razmatra čitav skup mogućih vremenskih serija satnih vrijednosti iradijance I_B i I_{DH} . Navedene vremenske serije proizvode stohastički generatori slučajnih brojeva na osnovu statistike sunčanih i oblačnih dana za posmatranu lokaciju. U mnoštvu vještački generisanih ulaznih podataka, očigledno će se pojaviti kako sunčanije tako i oblačnije godine od tipične. Za svaku vještački generisanu godinu, pokreće se program za određivanje ostvarljive proizvodnje fotonaponskog sistema. Na kraju se pravi histogram mogućih vrijednosti godišnje proizvodnje sistema, odnosno funkcija raspodjele vjerovatnoće pojave određene vrijednosti proizvedene energije.

C. Uvažavanje difuzne komponente zračenja Sunca

U ovom radu je, radi jednostavnosti, za prvu aproksimaciju podrazumijevano da je za panele u sjenci difuzna komponenta zračenja jednaka nuli, kao što je slučaj sa direktnom komponentom. Budući da, bez obzira na prisustvo prepreke, određeni intenzitet difuzne komponente zračenja ipak postoji, u daljem istraživanju bi trebalo izvršiti njeno preciznije modelovanje i ustanoviti kolika se greška javlja zbog navedenog uprošćenja.

VI. ILUSTRATIVNI PRIMJER

Osnovna funkcionalnost razvijenog alata testirana je na interesantnom primjeru potencijalne zgrade amfiteatra Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci, predviđene za izgradnju u skladu sa nedavnim izmjenama regulacionog plana Grada. Međusobni položaj stare zgrade fakulteta i zgrade amfiteatra sa solarnim panelima na ravnom krovu, kako je predviđeno idejnim projektom, skiciran je na slici 5. Prema realno konstruisanom 3D modelu, vidi se da postoje periodi kada neki od fotonaponskih panela bivaju zaklonjeni zidovima i krovom stare zgrade. Najvažniji tehnički pokazatelji PV instalacije sumirani su u tabeli I.



Sl. 5. Paneli na amfiteatru u sjenci zgrade fakulteta

TABELA I. OSNOVNE KARAKTERISTIKE SISTEMA

Karakteristika	Vrijednost
Broj PV modula	56
Pojedinačna snaga modula	200 W
Raspored modula	Prema idejnom projektu (i slici 5)
Nagib modula Σ	30°
Azimutalna orijentacija ϕ_c	0° (orijentacija ka jugu)
Vertikalna pozicija modula z_s	8,75 m
Maksimalna visina prepreke	18,2 m

U okviru ovog rada urađena je simulacija prema determinističkom principu, korišćenjem ulaznih podataka o iradijaciji za tipičnu meteorološku godinu. Detaljnija analiza probabilističkom metodom ostavljena je za budući rad. Simulacija i rezultati su usmjereni na razmatranu temu uticaja obližnjih prepreka, dok je pretpostavljeno da su paneli tako raspoređeni da se može zanemariti njihovo međusobno sjenčenje. Ključni rezultati su prikazani u tabeli II.

TABELA II. OSNOVNI REZULTATI

Karakteristika	Vrijednost
Očekivana godišnja proizvodnja sa uvažanim uticajem prepreke	10.861 kWh
Teorijska proizvodnja bez uvažavanja uticaja prepreke	11.915 kWh
Procentualni gubitak usljed uticaja prepreke	8,85%
Referentna godišnja proizvodnja koju računa PVWatts kalkulator	12.321 kWh

VII. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da je moguće napraviti relativno jednostavan softverski alat kojim bi se određivala godišnja proizvodnja fotonaponskih sistema u uslovima kada u neposrednoj blizini postoje prepreke. Na ilustrativnom primjeru je dokazano da je uticaj prepreka značajan i da kod projektovanja fotonaponskih sistema efekat sjenčenja treba biti uvažen. S obzirom da prezentovani metod radi sa ulaznim podacima za tipičnu meteorološku godinu, ostavljen je prostor za dalja poboljšanja u vidu probabilističkog modelovanja i određivanja cijelog spektra različitih scenarija, koji se razlikuju od prosječnog slučaja.

LITERATURA

- [1] IEA [International Energy Agency], "2016 Snapshot of Global Photovoltaic Markets," Report IEA PVPS T1-31:2017.
- [2] Marcel Šturi, Thomas A. Huld, Ewan D. Dunlop, Heinz A. Ossenbrink, "Potential of Solar Electricity Generation in the European Union Member States and Candidate Countries," Solar energy, vol. 81, no. 10, pp. 1295-1305, 2007.
- [3] RERS [Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske], Evidencija proizvodnih postrojenja koja su ostvarila pravo na podsticaj, [Online]. Dostupno: <http://www.reers.ba/lat/node/4681>.
- [4] N. D. Kaushika, Anil K. Rai, "An Investigation of Mismatch Losses in Solar Photovoltaic Cell Networks," Energy, vol. 32, no. 5, pp. 755-759, 2007.
- [5] Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, New York: Wiley Interscience, 2004.
- [6] J. W. Spencer, "Fourier Series Representation of the Position of the Sun," Search, vol. 2, no. 5, pp. 172, 1971.
- [7] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance," Solar Energy, vol. 44, pp. 271-289, 1990.
- [8] NREL [National Renewable Energy Laboratory], PVWatts Calculator, [Online]. Dostupno: <http://pvwatts.nrel.gov/>.
- [9] W. De Soto, S. A. Klein, W. A. Beckman, "Improvement and Validation of a Photovoltaic Array Performance," Solar Energy, vol. 80, pp. 78-88, January 2006.
- [10] M. K. Fuentes, A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Array, SAND85-0330, Sandia National Laboratory, Albuquerque, 1987.
- [11] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich, T. Townsend, "Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems," Proc. of 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Florida, January 2005.
- [12] A. P. Dobos, PVWatts Version 5 Manual, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 2014.

ABSTRACT

The paper presents a methodology for determining the annual production of photovoltaic systems with respect to the shading influenced by the surrounding objects. Appropriate models have been selected to describe geometric and energy characteristics of the system. The annual production estimate is based on the expected value according to the typical mete-

orological year for the observed location. Mathematical models are implemented programmatically and tested on an illustrative example.

A METHOD FOR ESTIMATING THE IMPACT OF OBSTACLES TO THE ANNUAL ENERGY OUTPUT OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg

Uticaj tankih prevlaka na povećanje efikasnosti fotonaponske konverzije

Danijela Vuković¹, Jovan P. Šetrajčić², Siniša M. Vučenović³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Vojvodina, Srbija

³Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
danijela.vukovic@etf.unibl.org, jovan.setrajcic@df.uns.ac.rs, sinisa.vucenovic@pmf.unibl.org

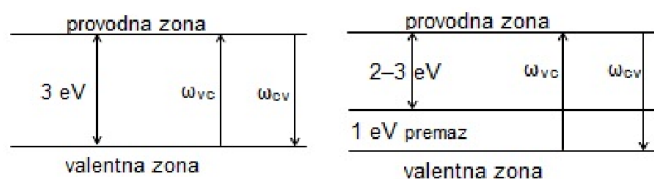
Sažetak—U radu je izvedena mikroteorijska analiza dinamike nosilaca naelektrisanja međuzonskih prelaza u poluprovodnoj ćeliji. Na osnovu eksperimentalno dostupnih podataka o veličini energetskog procepa izvršen je proračun efikasnosti solarne ćelije i pokazano je da se uvođenjem adekvatnih ultra-tankih poluprovodnih prevlaka na gornjim površinama, efikasnost sistema (koncentracija nosilaca naelektrisanja) može povećati i do 40%.

Ključne riječi: solarna ćelija; optimizacija; ultratanke prevlake.

I. UVOD

Efikasnost solarnih ćelija zavisi od više faktora [1–3], a jedan od njih je debljina solarne ćelije. U poslednjoj deceniji vrše se istraživanja [4–7] kod kojih je postignuto povećane efikasnosti solarnih konvertora upotrebom tankih prevlaka na gornjoj površi. Na osnovu naših teorijskih analiza (kvantna mehanika, nanoelektronska teorija), trebalo je da utvrdimo koji materijal prevlake je najefikasniji. Posmatran je niz materijala debljine L , a ekperimentalno dobijena je najveća efikasnost od približno $\lambda = 12\%$ kod TiO_2 .

Zabranjena zona kod TiO_2 između provodne i valentne zone je 3 eV. Verovatnoća prelaza elektrona iz valentne zone u provodnu (ω_{vc}) jednaka je verovatnoći prelaza elektrona iz provodne zone u valentnu (ω_{cv}), pa dolazi do rekombinacije (slika 1 lijevo).



Sl. 1. Rekombinacija elektrona u strukturama bez premaza (lijevo) i sa premazom (desno)

Nakon formiranja premaza na gornjoj površi TiO_2 , određena je efikasnost od približno $\lambda = 18\%$ [8–10]. Verovatnoća prelaza ω_{vc} manja je od verovatnoće prelaza ω_{cv} , tj. rekombinacija je manja i tada je veći broj provodnih elektrona (slika 1 desno).

II. TEORIJSKA ANALIZA

Da bi se došlo do mehanizma koji dovodi do povećanja efikasnosti, kreiran je teorijski model koga čine dve kvantne pumpe (zatvoreni sistemi različitih koncentracija elektrona, odnosno šupljina), koje su povezane međusobno tako da razmenjuju elektrone iz provodne u valentnu zonu i obrnuto, ali tako da ukupna koncentracija elektrona i šupljina ostaje nepromenjena u vremenu (detaljnije u [9]).

Polazna tačka mikroteorijskog pristupa problemu poboljšanja osobina solarnih kolektora jeste analiza međuzonskog elektronskog prelaza u poluprovodničkom materijalu. Ako su n_v i n_c koncentracije elektrona u valentnoj i provodnoj zoni, respektivno, onda važi zakon održanja broja elektrona: $n_v(t) + n_c(t) = n = \text{const.}$, sa početnim uslovima $n_v(0) = n$ i $n_c(0) = 0$ (na početku procesa svi se elektroni nalaze u valentnoj zoni). Pod dejstvom spoljašnjeg elektromagnetnog zračenja dolazi do prelaza elektrona iz valentne u provodnu zonu (apsorpcija zračenja). Takođe dolazi i do vraćanja elektrona iz provodne u valentnu zonu (kako emisijom zračenja, tako i neradijacionim prelazima).

Brzine promena koncentracija elektrona u valentnoj i provodnoj zoni date su sistemom diferencijalnih nehomogenih jednačina prvog reda:

$$\dot{n}_v = -\omega_{vc}n_v + \omega_{cv}n_c ; \dot{n}_c = -\omega_{cv}n_c + \omega_{vc}n_v, \quad (1)$$

gde su ω_{vc} i ω_{cv} verovatnoće (učestanost) prelaza elektrona iz valentne u provodnu, tj. iz provodne u valentnu zonu, n brojevi prelaza elektrona iz jedne u drugu zonu u jedinici vremena i po jediničnoj koncentraciji. Uvrštavanjem smene $n_c(t) = n - n_v(t)$, dobija se nehomogena diferencijalna jednačina po n_v , a zatim metodom varijacije konstante dolazimo do opšteg rešenja koje zavisi od početnih uslova:

$$n_v(t) = n \frac{\omega_{cv}}{\omega_{cv} + \omega_{vc}} \left[1 + \frac{\omega_{vc}}{\omega_{cv}} e^{-(\omega_{cv} + \omega_{vc})t} \right]. \quad (2)$$

Jednačina (2) predstavlja izraz za vremenski promenljivu koncentraciju elektrona u valentnoj zoni.

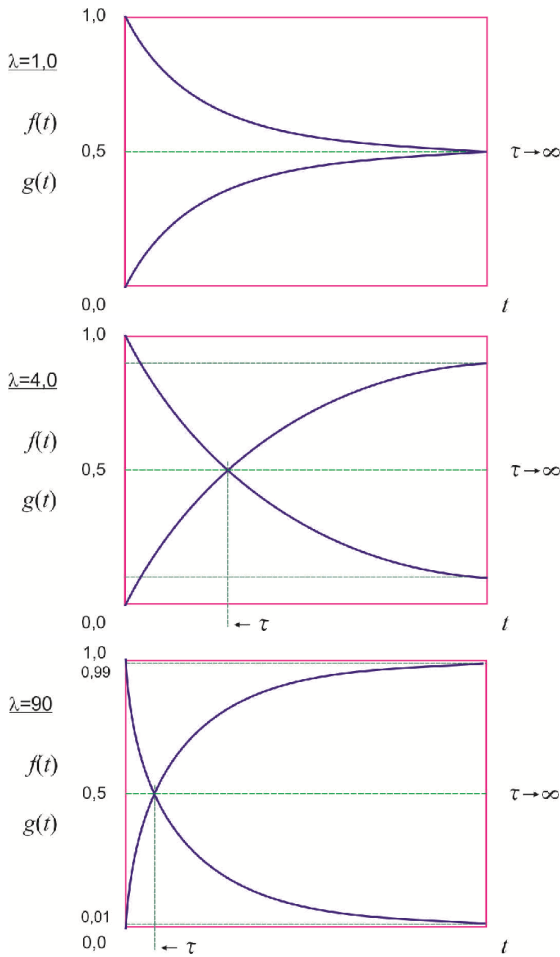
Na osnovu zakona održanja broja elektrona, za vremenski promenljivu koncentraciju elektrona u provodnoj zoni se dobija:

$$n_c(t) = n \frac{\omega_{vc}}{\omega_{cv} + \omega_{vc}} \left[1 - e^{-(\omega_{cv} + \omega_{vc})t} \right]. \quad (3)$$

Različite vrednosti odnosa verovatnoća prelaza elektrona iz valentne zone u provodnu (i obrnuto) $\lambda \equiv \frac{\omega_{vc}}{\omega_{cv}} = 1,0; 4,0; 99,0$ prikazane su na slici 2. Krive $f(t) \equiv n_v(t)/n$ i $g(t) \equiv n_c(t)/n$ mogu se predstaviti u obliku:

$$f(t) = \frac{1}{1 + \lambda} (1 + \lambda e^{-\Omega t}); \quad g(t) = \frac{\lambda}{1 + \lambda} (1 - e^{-\Omega t}). \quad (4)$$

Konstrukcija grafika na slici 2 je izvršena uzimajući u obzir da je $\Omega = \omega_{cv} + \omega_{vc} = 10^{-13} \text{ s}^{-1}$.



Sl. 2. Vremenska promjena funkcija $f(t)$ i $g(t)$.

Posle dovoljno dugog vremena uspostaviće se stanje dinamičke ravnoteže, tj. koncentracije elektrona u valentnoj i provodnoj zoni doći će u saturaciju i postati vremenski nepromenljive:

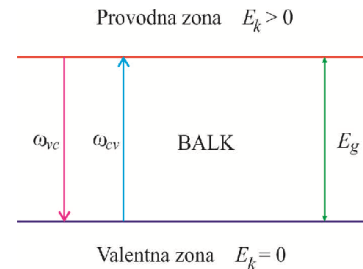
$$n_v(\infty) = n \frac{\omega_{cv}}{\omega_{cv} + \omega_{vc}}; \quad n_c(\infty) = n \frac{\omega_{vc}}{\omega_{cv} + \omega_{vc}}. \quad (5)$$

Odnos koncentracija u saturaciji jednak je odnosu verovatnoća prelaza iz jedne u drugu zonu:

$$\lambda = \frac{n_c(\infty)}{n_v(\infty)} = \frac{\omega_{vc}}{\omega_{cv}}. \quad (6)$$

Povećanje ovog odnosa znatno doprinosi povećanju efikasnosti solarnog prijemnika. U praksi se to najjednostavnije postiže nanošenjem prevlaka na osnovni materijal kolektora. Izvršena analiza pokazuje da prisustvo tankih prevlaka u stvari menja verovatnoće prelaska elektrona i da u tom fenomenu treba tražiti uzroke povećane koncentracije elektrona u provodnoj zoni.

U osnovnom materijalu solarnog kolektora, koji se sa mikroteorijske tačke gledišta ponaša kao praktično beskonačna („balk“) struktura, verovatnoće prelaza elektrona su prikazane na slici 3.



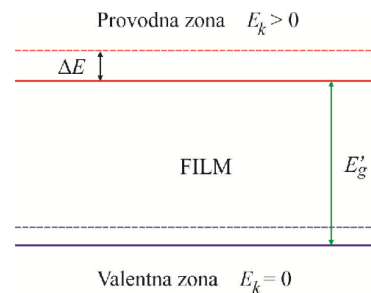
Sl. 3. Energetske zone kod balk strukture

$$\omega_{vc} \sim e^{-\frac{E_g}{\theta}}; \quad \omega_{cv} \sim e^{-\frac{E_g + E_k}{\theta}}. \quad (7)$$

Energija E_g je širina zabranjene zone, E_k kinetička energija elektrona u provodnoj zoni (u valentnoj zoni ona je jednaka nuli), dok je $\theta = kT$ (k – Bolcmanova konstanta). Odnos koncentracije elektrona eksponencijalno zavisi od E_k , tj.

$$\lambda_b = e^{E_k / \theta}.$$

Nanošenje tankih prevlaka ima za posledicu pojavu lokalizovanih stanja elektrona na površini kolektora. Lokalizovani energetske nivo javlja se unutar zabranjene zone, kako iznad vrha valentne, tako i ispod dna provodne zone. U oba slučaja dolazi do efektivnog suženja zabranjene energetske zone za elektrone (slika 4).



Sl. 4. Energetske zone kod film strukture – premlaza

$$\omega_{vc} \sim e^{-\frac{E'_g}{\theta}}; \omega_{cv} \sim e^{-\frac{E'_g + E_k + \Delta E}{\theta}}. \quad (8)$$

Odnos koncentracija elektrona kod kolektora sa prevlakama je:

$$\lambda_f = e^{\frac{E_k + \Delta E}{\theta}} \equiv \lambda_b e^{\frac{\Delta E}{\theta}}. \quad (9)$$

Lako se uočava da egzistencija lokalizovanog stanja elektrona ($\Delta E > 0$) dovodi do poboljšanja osobina kolektora ($\lambda_f > \lambda_b$). Detaljnije ćemo proučiti i proceniti stepen poboljšanja.

III. KOMPARACIJA EKSPERIMENTALNIH I TEORIJSKIH REZULTATA

Procena energije može se izvršiti primenom relacije neuređenosti $\Delta E = \hbar / \Delta t$ na osobine osnovnog materijala kolektora. Kako je $\Delta t = \Delta x / v$, gde je v brzina kretanja elektrona u provodnoj zoni, sledi $\Delta E = \hbar v / \Delta x$. Brzina elektrona na dnu provodne zone u odnosu na vrh valentne zone dobija se iz relacije za kinetičku energiju: $E = m_e v^2 / 2$, odakle sledi: $v_{\min} = (2E_g / m_e)^{1/2}$. Numerički, uzevši u obzir da je $E_g = 3$ eV (za TiO_2), minimalna vrednost brzine elektrona sa dna provodne zone je: $v_{\min} = 1,03 \cdot 10^6$ m/s, pošto je $E_{kin} > E_g$, odnosno $E_{kin} = E_g + E_k$. Nadalje, možemo uzeti $v = (1,5 - 3) \cdot 10^6$ m/s, jer su to sigurne vrednosti za poluprovodničke kristale.

Neodređenost položaja Δx može se proceniti kao širina filma (tankog premaza) nanesenog na osnovni materijal kolektora ($\Delta x \approx L$), u kojem su lokalizovani površinski elektroni. Tada je:

$$\lambda_f^L = \lambda_b e^{\hbar v / \theta L}, \quad (10)$$

gde se pri sobnim temperaturama uzima $\theta = 300$ k. U slučaju ultratankog filma (debljine $x \ll L$):

$$\lambda_f^x = \lambda_b e^{\hbar v / \theta x}. \quad (11)$$

Na osnovu ovih izraza sledi:

$$\frac{\lambda_f^x}{\lambda_f^L} = e^{\frac{\hbar v}{\theta} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{L} \right)}. \quad (12)$$

Prosečni odnos koncentracije elektrona kod kolektora sa debelim prevlakama ($L = 5$ μm), koji se u praksi najčešće koriste kreće se oko 12%. Ukoliko je prevlaka ultratanki film ($x \sim 10^{-7}$ m), osobine kolektorskog sistema znatno se poboljšavaju:

$$\lambda_f^x = \lambda_f^L e^{\hbar v (1-x/L) / \theta}. \quad (13)$$

Znajući podatke za TiO_2 , pokušali smo da vidimo šta se događa ako prevlake napravimo od elementarnih poluprovodnika (podaci za E_g preuzeti iz [3]). Rezultati takvog proračuna prikazani su u tabeli I, u zadnjoj koloni.

TABELA I. ELEMENTARNI POLUPROVODNICI

Poluprovodnik	Fizičke karakteristike		
	E_g [eV]	v_{\min} [10^6 m/s]	λ_x [%]
C	5,60	1,403	17,008
S	2,65	0,965	15,254
Se	2,00	0,839	14,781
P	1,50	0,726	14,374
J	1,25	0,663	14,150
As	1,20	0,650	14,103
B	1,16	0,639	14,064
Si	1,12	0,628	14,026
Ge	0,67	0,485	13,539
Te	0,32	0,335	13,043
Sb	0,13	0,214	12,655

Zatim su analizirani slučajevi kada su prevlake napravljene od dvojnih poluprovodničkih jedinjenja (III–V; II–VI; IV–IV; IV–VI; III–VI; grupa periodnog sistema elemenata).

TABELA II. POLUPROVODNA JEDINJENJA

Poluprovodnik	Fizičke karakteristike		
	E_g [eV]	v_{\min} [10^6 m/s]	λ_x [%]
SnO_2	3,97	1,181	16,096
GeS_2	3,42	1,097	15,760
TiO_2	3,00	1,027	15,490
GeSe_2	2,36	0,911	15,049
SnS_2	2,07	0,853	14,834
SnSe_2	0,97	0,584	13,875
FeSe_2	0,95	0,578	13,854
FeS_2	0,90	0,563	13,801
FeTe_2	0,46	0,402	13,261
CoSb_2	0,20	0,265	12,818
PtSb_2	0,08	0,168	12,511
Bi_2O_3	3,20	1,061	15,620
As_2S_3	2,50	0,938	15,149
As_2Se_3	2,80	0,796	14,624
Sb_2Se_3	1,72	0,778	14,559
Bi_2Se_3	1,30	0,676	14,196
Sb_2Se_3	1,20	0,65	14,103
As_2Te_3	1,00	0,593	13,906
Bi_2Se_3	0,35	0,351	13,093
Sb_2Te_3	0,30	0,325	13,009
Bi_2Te_3	0,16	0,237	12,729
Fe_2O_3	1,60	0,75	14,459

Odnos koncentracija elektrona za razne kolektorske materijale sa ultratankim (nanometarskim) prevlakama je prikazan u tabeli III. Kolektorski sistem sa BN prevlakama je najefikasniji i da je do 42% bolji od najboljih dosadašnjih konstruisanih sistema.

Za TiO_2 dobije se $\lambda_x \sim 18\%$, što bi značilo da je materijal sa nanetim ultratankim premazom 50% efikasniji od materijala bez premaza.

TABELA III. KARAKTERISTIČNI PARAMETRI ZA NEKE KOLEKTORSKE MATERIJALE

Materijal	Fizičke karakteristike		
	E_g [eV]	v_{min} [10^6 m/s]	λ_x [%]
Si	1,12	0,628	14,026
Ge	0,67	0,485	13,539
GaAs	1,43	0,709	14,313
InP	1,42	0,707	14,304
BN	6,00	1,452	17,217
GaP	2,26	0,891	14,976
ZnS	3,74	1,147	15,957

IV. ZAKLJUČAK

U radu je (uz korišćenje eksperimentalnih podataka) prikazana teorijska analiza mogućnosti za povećanje efikasnosti sunčevih konvertora pomoću ultratankih prevlaka, načinjenih od različitih hemijskih elemenata, kao i jedinjenja. Ultratanke prevlake od različitih materijala su nanotehnološkim postupcima nanošeni na istu osnovu (vidi se da je za osnovu sunčevog konvertora korišćen materijal od TiO_2).

Povećanje efikasnosti fotonaponskog dela konvertora postiže se stvaranjem poluprovodničkih prevlaka na gornjoj površi konvertora. Pokazano je da je odnos koncentracija elektrona u saturaciji jednak odnosu verovatnoća prelaza iz jedne u drugu energetsku zonu. Povećanje tog odnosa znatno doprinosi povećanju efikasnosti solarnog prijemnika. U praksi se to najjednostavnije postiže nanošenjem premaza na osnovni materijal kolektora.

Izvršena analiza pokazuje da prisustvo tankih prevlaka menja verovatnoće prelaska elektrona i da u tom fenomenu treba tražiti uzroke povećane koncentracije elektrona u provodnoj zoni. Odnos koncentracija elektrona kod kolektora sa prevlakama zavisao je od elektronskih karakteristika prevlaka i egzistencija lokalizovanog stanja elektrona dovodi do značajnog poboljšanja osobina kolektora.

Eksperimentalni podaci ukazuju da je prosečni odnos koncentracije elektrona kod kolektora sa debelim prevlakama $L = 5 \mu m$, koje se u praksi najčešće koriste, oko 12%. Ukoliko je prevlaka neki od nabrojanih ultratankih filmova ($x \sim 10^{-7} m$), pokazano je da se osobine kolektorskog sistema znatno poboljšavaju.

Ako se koriste elementarni poluprovodnici (npr. dijamant), solarna (fotonaponska) efikasnost iznosi oko 17%; za dvojni poluprovodnička jedinjenja (npr. BN, III–V grupa periodnog sistema elemenata) – 17,217%; za poluprovodnička jedinjenja (npr. ZnS, II–VI grupa periodnog sistema elemenata) – 15,957%; za dvojni poluprovodnička jedinjenja (npr. α – Si C, IV–IV i IV–VI grupa periodnog sistema elemenata) – 15,49%; za dvojni poluprovodnička jedinjenja (npr. GaS, III–VI grupa periodnog sistema elemenata) – 15,149%; za poluprovodnička jedinjenja od tri i više komponenata (npr. SnO_2) – 16,096%. U proseku, na taj način se povećava efikasnost od 29,08% (za α – SiC je od 15,49% do 43,475%, a za BN je 17,217%).

Na osnovu provedene analize možemo zaključiti da efikasnost svakog sistema (sa koncentracijom električne

barijere), može biti povećana za više od 44%, ako ima nanosen ultratanki poluprovodnički sloj na gornjoj površi. Za TiO_2 dobije se skoro 18%, što bi značilo da je materijal sa nanetim ultratankim prevlakama 50% efikasniji nego materijal bez prevlaka.

ZAHVALNICA

Rezultati izneti u ovom radu deo su istraživanja koja su finansijski podržana od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ON-171039, TR-34019), Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske (broj 19/6-020/961-16/15), kao i Sekretarijata za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost APV (142-451-2469/2017-01/02).

LITERATURA

- [1] J. P. Šetrajčić, D. Lj. Mirjanić, V. M. Zorić, S. K. Jaćimovski, Increase efficiency of photovoltage converters using ultrathin coatings, *Contemporary materials* 17, 2012, pp. 537-556
- [2] T. Pavlović, *Fizika i tehnika solarne energetike*, Građevinska knjiga, Beograd 2007.
- [3] D. Raković, *Fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala*, ETF, Beograd 1995.
- [4] J. Radosavljević, T. Pavlović, M. Lambić, *Solarna energetika i održivi razvoj*, Građevinska knjiga, Beograd 2010.
- [5] V. M. Zorić, J. Zorić, Uloga gornje površine solarne ćelije pri apsorpciji solarnih radijacija, *DIT* 12–13, 1999, pp. 56–63.
- [6] V. M. Zorić, J. Zorić, M. Lambić, S. M. Stojković, J. P. Šetrajčić, Dizajn i tanki premazi gornje površine solarnih fotonaponskih ćelija, *Zbornik radova 3. DEMI*, 2000, pp.127–130.
- [7] Z. B. Todorović, *Fotonaponski solarni električni sistemi*, KIZ Centar, Beograd 1989.
- [8] K. Sen et.al., Collection efficiency in amorphous silicon solar cells, *Solid-State Electronics* 29, 1986, pp.585.
- [9] D. Lj. Mirjanić, V. D. Sajfert, V. M. Zoric, J. P. Šetrajčić, Energy analysis of the ultra thin coats of solar cells, *Proceedings UNITECH'03* 1, 2003, pp.39–42.
- [10] J.P.Šetrajčić, V.M.Zorić i S.K.Jaćimovski, Povećanje efikasnosti solarnih konvertora upotrebom različitih ultratankih prevlaka, *Zbornik radova Infoteh* 12, 2013, pp.209-212.

ABSTRACT

Microtheoretical analysis of charge carriers dynamics of the interzone transitions in semiconducting cell was carried out. Based on the experimental data for values of energy gaps, calculations of solar cells efficiency were done and it has been shown that efficiency of systems (the charge carriers concentration) can be improve till to 40 % introducing of adequate ultrathin semiconductive coats of their top surface.

EFFICIENCY INCREASE OF PHOTOVOLTAGE CONVERTORS USING ULTRATHIN COATINGS

Danijela Vuković, Jovan P.Šetrajčić, Siniša M.Vučenović

Klasifikacija fotonaponskih sistema integrisanih na omotač zgrade

Ernad Šabanović¹, Marko Ikić¹, Slobodan Lubura¹, Milomir Šoja¹

¹Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, Republika Srpska

Sažetak—Posljednjih nekoliko godina velika težnja današnjice u svijetu jeste instalacija fotonaponskih sistema. Kako se ti sistemi uveliko montiraju na različite objekte, postoji sve veće interesovanje da fotonaponski sistemi pored proizvodnje električne energije ujedno i preuzmu ulogu nekog građevinskog dijela objekta kao što je krov, fasada i slično. U ovom radu su predstavljeni i opisani upravo fotonaponski sistemi koji se mogu koristiti u stambenim i poslovnim objektima kao građevinski materijal. Ovakvi fotonaponski sistemi se nazivaju integrisanim fotonaponskim sistemom ili BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*). Primjena je danas prisutna na različitim dijelovima objekata, pa različito iskorišćenje ovakvih sistema su tema o kojoj će se razmatrati u nastavku.

Ključne riječi—BIPV; fotonaponski sistem (FN); zgradarstvo

I. UVOD

Povezivanje fotonaponskih (FN) sistema preko kućne instalacije predstavlja budućnost razvoja FN sistema. Naime, fotonaponski sistemi mogu da se ugrade u skoro svaku građevinsku strukturu, od autobuskih stajališta do velikih poslovnih i stambenih zgrada pa čak i u bašte, parkove itd. Ovakvi FN sistemi se nazivaju integrisanim fotonaponskim sistemom ili BIPV što je skraćena od engleske riječi *Building Integrated Photovoltaics*. Iako tačna prognoza fotonaponskog uticaja u zgradama zahtjeva pažljivu analizu različitih faktora kao što su količina sunčevog zračenja koje dolazi na površinu zgrade, stabilnost i kvalitet električnih instalacija, elektrodistributivne mreže itd., lako je pretpostaviti da ovakva tehnologija ima velike mogućnosti. Čak i u klimatskim uslovima koji se karakterišu osrednjom sunčevom ozračenosti, krov zgrade jednog domaćinstva dovoljan je za postavljanje fotonaponskog sistema koji mu može obezbijediti dovoljno električne energije u toku cijele godine [1].

Prednost integrisanih fotonaponskih modula nad uobičajenim neintegriranim sistemima je u tome što se početni troškovi neutralizuju redukcijom količine utrošenog građevinskog materijala i radne snage potrebne za izgradnju dijela zgrade koga zamjenjuju ovi moduli. Ove prednosti čine integrisane module segmentom fotonaponske industrije koji se najbrže razvija. Pa tako fotonaponski moduli, za razliku od drugih građevinskih materijala, proizvode energiju i stoga pružaju vlasniku mogućnost da povрати početnu investiciju u njihovu ugradnju [2]. Primjena je danas prisutna na različitim dijelovima objekata, kao što su: krovovi, spoljašnji zidovi, polu-transparentne (polu-prozirne) fasade, stakleni krovovi i za sjenčenja.

II. INTEGRISANI FOTONAPONSKI SISTEMI (BIPV)

Ponekad, kod definicije BIPV sistema postoje više mišljenja. Razlika se ogleda u tome koliko je zapravo FN modul integrisan u građevinskim objektima. Ipak potpuni BIPV sistem predstavlja multifunkcionalan sistem koji uz proizvodnju električne energije mijenja i ustaljene građevinske dijelove. No međutim, danas se često mogu susresti FN sistemi koji ne preuzimaju ulogu građevinskih materijala pa predstavljaju polu-integrirane FN sisteme. Sistemi sa ovakvim kombinacijama se nazivaju primjenjenim FN sistemom ili BAPV (*Building Applied Photovoltaics*), gdje se FN moduli dodaju na već postojeće građevinske objekte. Na Sl. 1. dati su primjeri povećavanja integracije FN modula sa stambenim objektima.



Najmanje integrisan (BAPV sistem) Više integrisan (BAPV sistem) Potpuno integrisani (direktno montirani BIPV sistem)

Sl. 1. Primjeri stepena integracije FN sistema na objektima [3]

BIPV sistemi moraju da zadovolje više zahtjeva kako bi bili u mogućnosti zamijeniti standardne građevinske materijale. Pa pored proizvodnje električne energije BIPV moduli moraju pružiti i ostali ugođaj objekta kao što su: termo i hidro izolaciju, zaštitu od Sunca, buke i svjetlosti, kao i bezbjednost. Ako se uzme u obzir sve ove uloge koje bi BIPV moduli trebali preuzeti, cijena ulaganja u ovakve sisteme postaje prihvatljivija, s obzirom da zamjenjuje već pojedine elemente jednog objekta, a pored toga daju besplatnu električnu energiju.

III. OSNOVNE KATEGORIJE INTEGRISANIH FN SISTEMA

Izgradnja nekog objekta predstavlja uspostavljanje odnosa kontrolisanih unutrašnjih uslova i promjenjive vanjske klime. Potrebno je izgraditi određeni nivo nepropusnosti kako bi se izbjeglo nepotrebno hlađenje ili grijanje prostora zbog infiltracije (nekontrolisane ventilacije) i kako bi se time omogućio efikasan rad ventilacijskog sistema. Pored toga mora se obezbijediti nepropusnost za ulazak vode. U nastavku

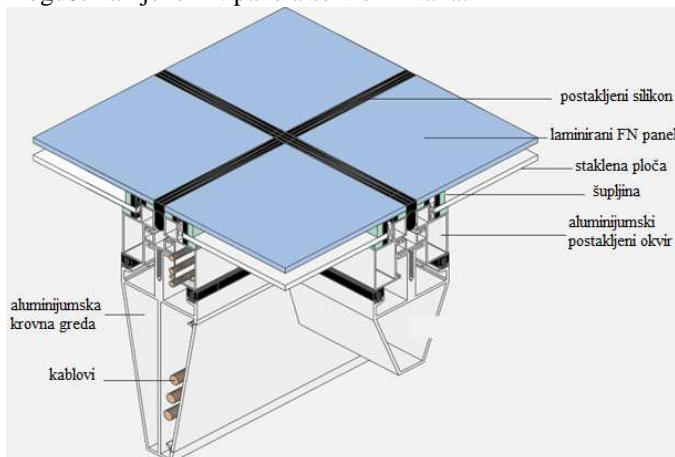
će se nabrojati neki osnovni zahtjevi koje današnji BIPV sistemi moraju riješiti:

- Boja, izgled, veličina,
- Nepropusnost u odnosu na vremenske prilike,
- Otpornost na udare vjetra,
- Trajnost i održavanje,
- Sigurnost prilikom izgradnje i upotrebe (požar, stabilnost i sl.),
- Cijena.

U ovom dijelu rada biće prezentovani svi mogući načini implementacije FN sistema u zgradarstvu.

A. Nadstrešnice i krovovi kao integrisani FN sistemi

Stakleni krovovi su karakteristika moderne arhitekture još od sredine 19-og vijeka. Svakako je cilj bio da se dobije što veća vidljivost i osvjtljenje unutar objekta. Međutim, postoji i veliki broj mana koje čine ovakvu izvedbu krovova neefikasnim: gubitak kontrole nad upadnom svjetlošću, gubitak toplote tokom zimskih dana, preveliko zagrijavanje tokom ljetnih dana i moguća značajna oštećenja. FN moduli su idealna zamjena za staklene krovove s obzirom da se dobija slična ili gotova ista izvedba staklenog krova, a pri tome se dobija čista energija i mogućnost kontrolisanja upadne svjetlosti. Pri tome svaki FN modul je ojačan sa dodatnom opremom koja mu omogućuje termički zaštitu, nepropusnost i zaštitu od udara pojedinih predmeta pri slobodnom padu. U ovom slučaju FN paneli se prave u obliku većih ploča koje se montiraju na aluminijsku konstrukciju, Sl. 2. Održavanje ili moguće zamjene FN panela se vrši iz vana.



Sl. 2. Postakljeni FN modul za prozirne ili poluprozirne nadstrešnice i krovove [8]

Krovovi su idealni dijelovi kuća za BIPV sisteme zbog ugla pod kojim se grade, npr. za Europu je to 30°. Zamjenom standardnih krovova sa FN modulima potrebno je obezbijediti nepropusnost kako od kiše i snijega tako i od vjetra pogotovo kod dijelova gdje dolazi do preklapanja pojedinih modula. Alternativa arhitektima jesu moduli sa okvirima, ali se oni izbjegavaju zbog manje atraktivnosti. Mnogo efikasnije, ali i preglednije je koristiti cijelu površinu krova za BIPV sisteme. Plavkasti i crni silicijumski moduli se najčešće koriste kod BIPV sistema na krovove objekata. Ukoliko se postavljaju na već postojeću konstrukciju krova (primjenjeni sistemi, BAPV)

tada se češće koriste TF moduli zbog svoje manje težine. Postoji i mogućnost da se u potpunosti standardni crep zamijeni solarnim crepovima i na taj način da se dobije na efikasnosti i na preglednosti. Na Sl. 3. je dat primjer upotrebe crepova koji u potpunosti mijenjaju standardni crijev, a isto proizvode električnu energiju. Na slici su uzeti primjeri proizvođača *Tesla* koji je u ponudi dao četiri vrste BIPV panela, a koji zapravo mijenjaju izgledom konvencionalne crepove. Ovim načinom se dodatno povećava i ožičenje jer svaki taj solarni crijev će imati svoj priključak, pored toga za svaki se mora obezbijediti i nepropusnost itd. Ipak mnoge firme su prihvatile proizvodnju većih krovnih dijelova (segmenata) u veličini oko 2 m. Mane ovakvih krovnih sistema jeste geometrijska nekompatibilnost, pa je za svaki krov potrebna proizvodnja zasebnog BIPV sistema [4].



Sl. 3. BIPV paneli kompanije *Tesla*

Na prvi pogled uopšte se ne razlikuju od običnih crepova, ali u stvarnosti krov predstavlja jednu ogromnu površinu veze fotonaponskih ćelija. Crepovi će se proizvoditi u četiri dizajna: *Tuscan*, *Smooth*, *Textured* i *Slate*, pa će svaki vlasnik kuće moći odabrati onaj koji mu se najbolje uklapa. Svi su izrađeni od kvarcnog stakla, pa su čvršći od svih postojećih vrsta krovnih obloga i trebali bi trajati “duže od kuće”. Tajna dobrog izgleda crijeva je u tome što su ovakve solarne ćelije prozirne za Sunčeve zrake, a kad ih se promatra iz ljudske perspektive, pod uglom, onda su neprozirne i izgledaju poput crijeva ili šindre. U njima su integrisani fotonaponski kolektor, krovna izolacija, ali kod nekih modela i grijači koji sprečavaju da se na krovu nakuplja snijeg i led, te na taj način nastavljaju proizvoditi električnu energiju i zimi.

B. Fasadni BIPV sistemi

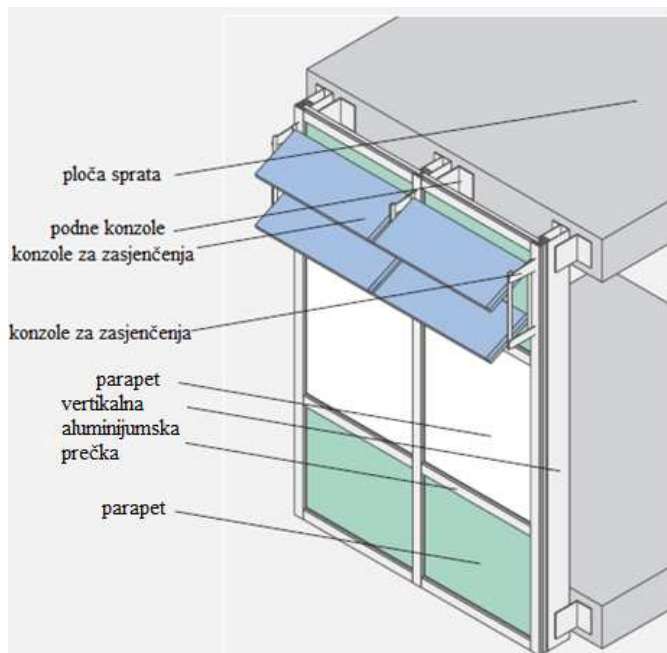
Drugo najznačajnije polje upotrebe BIPV sistema jeste fasadni na kojem se mogu koristiti sve vrste FN modula [1]. Cilj upotrebe fasadnih BIPV sistema jeste višestruka. Potrebno je obezbijediti ravnotežu između dnevne svjetlosti i sjenčenja. Pored toga potrebno je voditi računa o termo izolaciji kao i izgledu kako bi se FN modul upotpuno integrisao u postojeći objekat. Za fasadne izvedbe češće se koriste TF moduli jer su se pokazale puno boljim od silicijskih jer silicijski u vertikalnoj izvedbi gube i do 40% moguće prozvedene snage da su u horizontalnom položaju. Ipak ovaj oblik BIPV sistema je dosta složeniji od krovnog i ima dosta više potreba i zahtjeva kako bi se obezbjedila potpuna integracija FN

modula. Klasifikacija različitih fasadnih BIPV sistema se može podijeliti na sljedeći način:

- Za sjenčenja, jednostavan BIPV sistem koji predstavlja dogradnju na već postojeći objekat, ali i dalje posjeduje dvostruku ulogu, ulogu zaštite i generatora električne energije,
- Ovješeni BIPV sistemi se koriste na tradicionalnim građevinskim konstrukcijama,
- Sistem zavjese je vrsta laganog zastora, ali konstruisanog tako da zahtijeva skelu,
- Jedinstveni BIPV sistem nešto slično prethodnom samo ovaj sistem ne zahtijeva nikakve pomoćne objekte (skele i sl.) i ovaj metod se koristi kod jako visokih zgrada,
- Dvoslojna fasada je sistem visokih standarda,
- Nadstrešnice su horizontalne ili nagnute površine na kojima se mogu instalirati FN moduli.

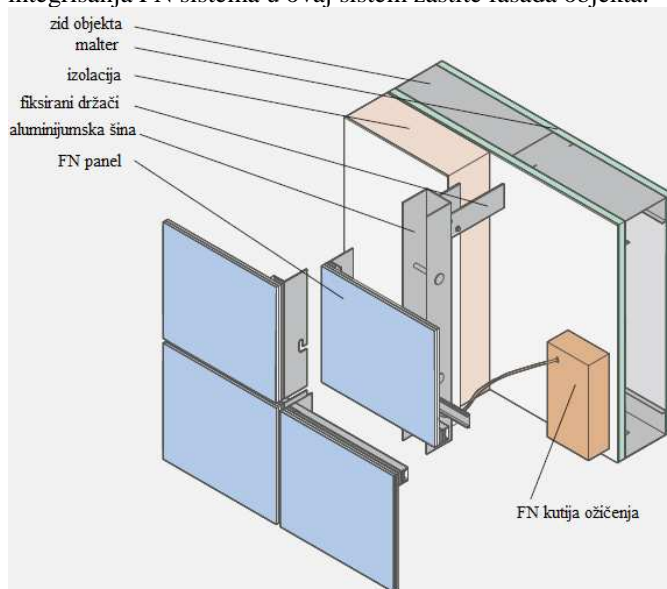
Arhitekti nastoje omogućiti stanarima dovoljno dnevnog svjetla kao i širok pogled prema vani. Rezultat toga jeste velika površina koja dnevno dobija jako velike količine sunčeve energije. Jedan od načina smanjenja upotrebe klima uređaja u prostorijama jeste korištenje za sjenčenja. Ovaj način je danas jako proširen tako da su ga arhitekti uzeli kao osnovu za ovaj problem. Mogu se montirati i horizontalno i vertikalno u blizini ili na udaljenosti od prozora, a neke su izgrađene sa mogućnošću uvlačenja radi čišćenja. Veličina i težina za sjenčenja opet zavise od vrste korištene fasade kao i njihove otpornosti na vjetar, buke i vibracije. Na Sl. 4. dat je primjer ugradnje sjenčenja koje lako mogu biti upotrebljene za FN panele, i to kao ugradbene (BAPV) ili u potpunosti da zamijene i građevinsku ulogu pored generatorske (BIPV). Kao nosači se mogu koristiti metal, drvo i plastika, ali bi bila otežana izvedba uvlačivih zbog mogućih oštećenja, osim ako postoji određeni zaštitni okvir FN panela. Pri projektovanju potrebno je izgraditi takav sistem da ne postoji međusobno zasjenjivanje i efikasnije je da svaki prozor ima svoj zasjenjivač. Ukoliko su udaljeni dovoljno od prozora bilo bi dobro ugraditi i vodilice koje bi olakšale održavanje i čišćenje. Kako postoje automatski zasjenjivači koji prate sjenu i time podešavaju svoju poziciju, tako je moguće ugraditi i u integrisane FN panele na zasjenjivačima samo bi sada pratile sjaj Sunca. Okvirovi mogu poslužiti i kao nosači kablova, tako da je ožičenje FN panela pojednostavljeno.

Ovješene ploče na fasadama posjeduju dvoslojnu zaštitu od vjetra i kiše i one su odvojene zračnom šupljinom. Vanjski sloj ima ulogu sprječavanja prodora kiše, i time unutrašnji sloj sa zračnom barijerom ostaje suh. Taj unutrašnji sloj se može izgraditi od bilo kojeg materijala, npr. betona, opeke ili nekog metala. Sloj izolacije nalazi se na stražnjoj strani vanjskog zida i na njemu se nalaze membrane za paru i za nepropusnost vode. Glavni nosači su pričvršćeni na stijenkku objekta. Na ovaj način je spriječen prodor sunčevog zračenja, teške vlage koje mogu naštetiti samoj fasadi objekta. Uz nove zgrade, ovaj način oblaganja fasade se često koristi i kod zamjene ili restauracije starih fasada koje su izgubile svoju ulogu i na taj način se uspješno može vratiti efikasnost izolacije fasade bez uklanjanja objekta.



Sl. 4. Primjer ugradnje za sjenčenja iznad prozora [6]

Stoga ovakvi sistemi su pogodni za integraciju FN panela. U slučaju da već konstrukcija postoji ugradnja FN panela bi bila još jednostavnija. I pored toga ventilacija koja se dobija ovim sistemom omogućuje hlađenje i održavanje radne temperature panela. Metalne ploče mogu poslužiti za ugradnju FN panela tako da se mogu prilagoditi oblik i veličina, a i pored toga čvrstoća. Kutija za ožičenje se može smjestiti iza ploče u dijelu gdje ne može doći vlaga. Na Sl. 5. dat je primjer integrisanja FN sistema u ovaj sistem zaštite fasada objekta.

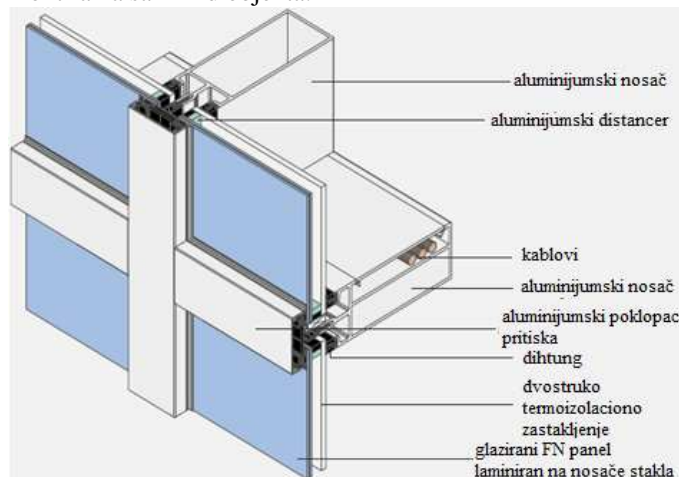


Sl. 5. Primjer integrisanja FN panela na visećoj zid-zavjesi [6]

Kako bi priključna kutija dodatno bila zaštićena moguće je uraditi zaštitu nadpritiska tako što bi se pritisak u ploči izjednačio sa pritiskom vani i tako spriječio mogući prodor vode. Ovakvi sistemi se koriste najčešće za jako visoke zgrade. U ovom slučaju FN fasada može ostati bez čišćenja s

obzirom da kada kiša pada ujedno i sapire površinu FN panela. Ipak u nekim sredinama kiša često ostavlja iza sebe dosta prašine, pa je tu potrebno čišćenje panela, ali je shodno vertikalnom položaju to vrlo jednostavno. Održavanje ili eventualna zamjena FN modula je također jednostavna jer se svim FN komponentama može pristupiti izvana. Demontaža modula je jako brza i postiže se jednostavnim otključavanjem pričvrstnih nosača.

Zidne zavjese se mogu podijeliti u dvije grupe: štapni i jedinstvene ploče. Štapni sistem obuhvata mnoge dijelove koje se dovlače do radilišta i na licu mjesta se sve te komponente montiraju. Ovakvi sistemi se najčešće koriste kod niskih zgrada. Ne preporučuju se za visoke zgrade jer zahtijevaju skelu kako bi se montirale. Ovaj oblik gradnje se oslanja uveliko na radnu i stručnu snagu budući da se montiraju na licu mjesta, a ne u tvornici. Kod sistema jedinstvene ploče postoje velike ploče već postakljene i spremne za brzu montažu, što je dosta jednostavnije i praktičnije [6]. U ovim oblicima fasada se mogu jednostavno ugrađivati i FN paneli. Umjesto staklenih jedinica mogu se koristiti prozirni ili neprozirni, jednostruko ili dvostruko glazirani FN paneli. Što znači da se ti FN paneli mogu montirati kao i staklene ploče. Ako bi se FN paneli ugrađivali u vidni prostor fasadne zavjese tada bi se laminirali na staklene nosače. Kako bi se izbjeglo lomljenje stakla uslijed toplotnog udara stakleni laminati bi bili obrađeni posebnom glazurom. Ugrađivanjem dvostrukog stakla povećava se izdržljivost na druga opterećenja kao što su vjetar i moguća oštećenja ljudskog faktora. Jedan takav primjer integrisanja FN panela dat je na Sl. 6. Osim na ovom dijelu zidne fasade postoje razne mogućnosti integrisanja FN panela i na drugim mjestima konstrukcije. Moguće je postaviti i na neprozirna ili poluprozirna stakla i na dijelovima konstrukcije gdje se montira na sami zid objekta.

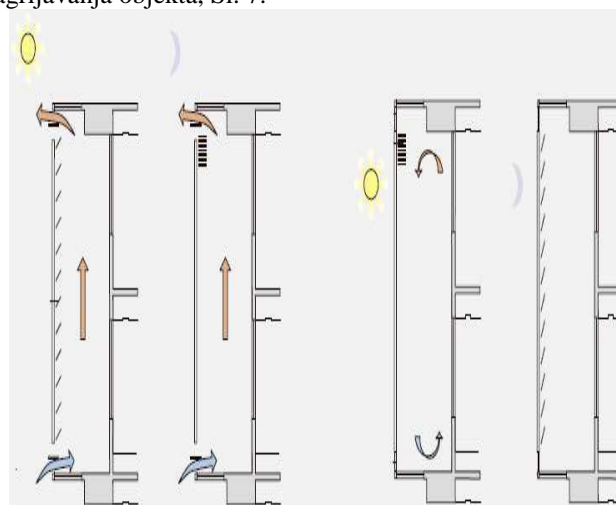


Sl. 6. . Primjer integrisanja FN panela na zidne zavjese [6]

Cjelovite fasadne ploče su uvedene kako bi riješili problem instalacije štapnih fasada. Sama ugradnja ovih fasada je pojednostavljena, i sastoje se od velikih ploča dimenzija koje omogućuju transport od fabrike do mjesta ugradnje. Najčešća visina i širina su 1,5 m. Kod najrazvijenih fasadnih ploča visina i širina znaju dostići i do 9 m. Ove ploče u sebi sadrže

sve elemente koje jedna fasada mora imati: izolacija, otpornost na različite vremenske uslove, zaštita od vatre, vidljivost i dizajn i sl. Integraciju FN panela na fasadne ploče je moguće uraditi ugradnjom FN panela umjesto prednjih prozora. Pored toga cijelo ožičenje je moguće uraditi u samim fabrikama tako da je ugradnja ovakvih integrisanih FN panela uveliko olakšana. Svakako kada je ugrađen FN panel tada postaje i najslabija tačka ove fasade, pa je potrebno uraditi laminaciju FN panela koja će omogućiti potrebne zaštite i tako obezbijediti kompletnu ulogu jedne fasade. Održavanje ovakvih sistema se dijeli na FN panel i na samu konstrukciju fasadnih ploča. Potrebno je naglasiti da je moguće izvaditi FN panel, a da pri tome nije potrebno skidati nikakve zaštite od vremenskih prilika.

Dvoslojnu fasadu predstavljaju dvije konstrukcije koje razdvaja ventilaciona praznina. Glavna cilj je da se cijele godine mijenjaju fizikalne osobine fasade, što poboljšava karakteristike objekta. Između unutrašnje toplinske izolacije i vanjske fasade je ventilaciona zona koja reguliše umjerenu temperaturu i vlagu na samom objektu, a koja može opet poslužiti za ugradnju FN panela za sjenčenje. Time se onda može regulisati i zaštita od prekomjernog sunčevog zračenja ili odsjaja. Tako da se ovom fasadom reguliše toplina, hladnoća, svjetlost i vjetar kako bi se postigla optimalna udobnost bez upotrebe složene tehnologije ili dodatne energije. Ljeti omogućuje tzv. noćno hlađenje dok zimi omogućuje zagrijavanje zraka koji dospije između dvije fasade i tako uveliko smanjuje troškove ventilacije, odnosno zagrijavanja objekta, Sl. 7.



Sl. 7. Prikaz upotrebe dvoslojne fasade za vrijeme ljeta (lijevo) i zime (desno) [6]

Pored ventilacione zone i vanjski dio fasade je moguće iskoristiti kao dio gdje se mogu ugraditi FN paneli. Značajnija efikasnost se dobija ugradnjom FN panela upravo na vanjski dio fasade, pa je zbog toga dosta veća upotreba takve integracije nego postavljnje FN panela u ventilacionu zonu. Ventilaciona zona osim što omogućuje ugodan boravak u objektu omogućuje i prirodno hlađenje FN panela što između ostalog i utiče na povećanu efikasnost. Održavanje ovakvih integrisanih sistema je dosta sličan fasadnim u vidu

jedinstvenih ploča. Što znači bilo kakava zamjena ide s vanjske strane, a ne narušavajući vremensku zaštitu fasade.

IV. ZAKLJUČAK

Teoretski potencijal energije Sunčevog zračenja daleko je veći od ostalih obnovljivih izvora energije, kao na primjer biomase, vodenih snaga i snage vjetra, koji su također samo posljedica ili neki oblik pretvaranja sunčeve energije. Stoga važnost istraživanja energije Sunca i pretvaranja energije Sunčevog zračenja u korisne oblike energije poprima sasvim novu dimenziju s velikom mogućnošću rješavanja problema energetske krize, koja je u svijetu sve prisutnija. Ovim radom predstavljen je jedan od tih načina, a to je integracija FN sistema u građevinske objekte (BIPV sistemi). Prednost integriranih fotonaponskih modula nad uobičajenim neintegriranim sistemima je u tome što se početni troškovi neutralizuju redukcijom količine utrošenog građevinskog materijala i radne snage potrebne za izgradnju dijela zgrade koga zamjenjuju ovi moduli. BIPV sistemi nude značajne prednosti i otvara mnoge kreativne mogućnosti projektantima. Primjena je danas prisutna na različitim dijelovima objekata, kao što su: krovovi, spoljašnji zidovi, polu-transparentne (polu-prozirne) fasade, stakleni krovovi i zasjenčenja.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta „Razvoj uređaja energetske elektronike za povećanje energetske efikasnosti fotonaponskih sistema u građevinarstvu“, finansiran od strane Ministarstva nauke i tehnologije u Vladi Republike Srpske, 2014. godine.

LITERATURA

- [1] Ljubisav Stamenić, „Korišćenje solarne fotonaponske energije u Srbiji“, Jefferson Institute, Beograd, 2009.
- [2] Milica Vujošević, „Fasada koja proizvodi energiju. Estetske, ekološke i energetske karakteristike fotonaponskih panela“, Naučni-stručni simpozijum – Instalacije i arhitektura, Beograd, 2010.
- [3] Ted H., Alan G., Michael W., Robert M., Sean O., „Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the Residential Sector: An Analysis of Installed Rooftop System Prices“, NREL, Springfield, 2011.
- [4] Sheng Cheng, „Curved photovoltaic surface optimization for BIPV“, University of London, London, 2009.
- [5] www.news.energysage.com, pristupljeno 7.2017.
- [6] Simon Roberts, Nicolo Guariento, „Building integrated photovoltaics / a handbook“, Njemačka nacionalna biblioteka Birkhäuser, 2009.

ABSTRACT

Over the last few years, the world's great tendency is the installation of photovoltaic systems. As these systems are mounting on different facilities, there is an increasing interest that photovoltaic systems, besides power generation, take on the role of a building component such as roof, facade etc. This paper presents and describes the photovoltaic systems that can be used in residential and business premises as building material. Such photovoltaic systems are called an integrated photovoltaic system or shorter BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*). Today, the application of BIPV is present in different parts of the building, and the different exploitation of these systems is the topics that will be discussed below.

BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS

Ernad Šabanović, Marko Ikić, Slobodan Lubura, Milomir Šoja

Optimizacija održavanja napajanja telekoma uvođenjem novih metoda i mjerenja

Praktično iskustvo

Milan Paripović

„Mtel“ a.d., Banja Luka, Republika Srpska
milan.paripovic@mtel.ba

Sažetak—Veliki razvoj elektronički komunikacija zadnjih godina doveo je do znatnog povećanja broja objekata/uređaja preko kojih telekom pruža svoje usluge. Kao grupa koja obavlja poslove održavanja sistema za napajanje bili smo primorani optimizovati održavanje istih na način da smo uveli neke nove metode i analize mjerenja koje su nam ubrzale/smanjile postupke redovnih i interventnih pregleda sistema za napajanje, a da se kvalitet i pouzdanost nije smanjila. U ovom radu ću opisati nove metode koje smo uveli, a to su: termografski pregledi, mjerenje unutrašnjeg otpora baterija i fizičko stanje uzemljivača.

Ključne riječi—*dvostrano napajanje; prenaponska zaštita; odvodnici prenapona; redni i paralelni luk; termičko stanje; baterije; testiranje baterija; kapacitet baterija; uzemljenje; otpor raspršivanja.*

I. UVOD

Za napajanje se kaže da je srce telekomunikacionog uređaja. Analogija je logična, jer ako otkáže napajanje cijeli uređaj je neupotrebljiv. U našoj zemlji stvarni radni uslovi u kojima rade telekomunikacioni uređaji su lošijih od radnih uslova koji su propisani međunarodnim standardima. To se pre svega odnosi na realni opseg promjene mrežnog napona, ali i na dužinu trajanja vremena kada nije prisutan mrežni napon. Međutim, i pored toga, kod nas postoji značajno vrijeme u kome je telekomunikacioni saobraćaj u prekidu kao posledica otkaza napajanja. Davaoc usluga mora osigurati rezervni izvor električne energije, a prelaz sa primarnog naizmjerne izvora na rezervni izvor energije mora biti bez prekida. Neprekidnost može biti vremenski ograničena ili trajna, pa su i rješenja koja koriste telekomunikacioni operatori i davaoci informatičkih usluga različita zavisno o tome kakva se besprekidnost želi postići i koja se raspoloživost sistema za rezervno napajanje električnom energijom želi osigurati, a što je sve u direktnoj vezi sa željom operatora da njihova usluga bude prisutna i kada javne elektrodistribucijske mreže nema. Telekomunikacioni operateri imaju 70% kvarova je zbog napajanja i iz toga razloga se napravio pouzdaniji dvostrani sistem napajanja.

Svrha preventivnog i interventnog održavanja sistema za napajanje je osiguravanje neprekidnog napajanja objekata/uređaja preko kojih se izvršavaju sve vrste elektroničkih komunikacijskih usluga. U sistem za napajanje spadaju: transformatori, stacionarni dizel agregati, DC sistem za napaja-

nje, baterije, UPS-ovi, glavni i pomoćni elektrodistributivni ormari.

Svi ovi sistemi za napajanje zahtjevaju različite postupke i načine preventivnog/interventnog održavanja. Pod preventivnim održavanjem sistema za napajanje telekomunikacionih uređaja podrazumjevamo primjenu određenih postupaka i odgovarajućih sredstava za ispitivanje ispravnosti rada, za ispitivanje i otklanjanje smetnji u radu kao i odgovarajuća njega (čišćenje, podešavanje, zamjena dotrajalih dijelova, podmazivanje i drugo), radi osiguranja njihovog pravilnog rada, osiguranja propisanog kvaliteta rada u planiranom vjeku trajanja uređaja u eksploataciji.

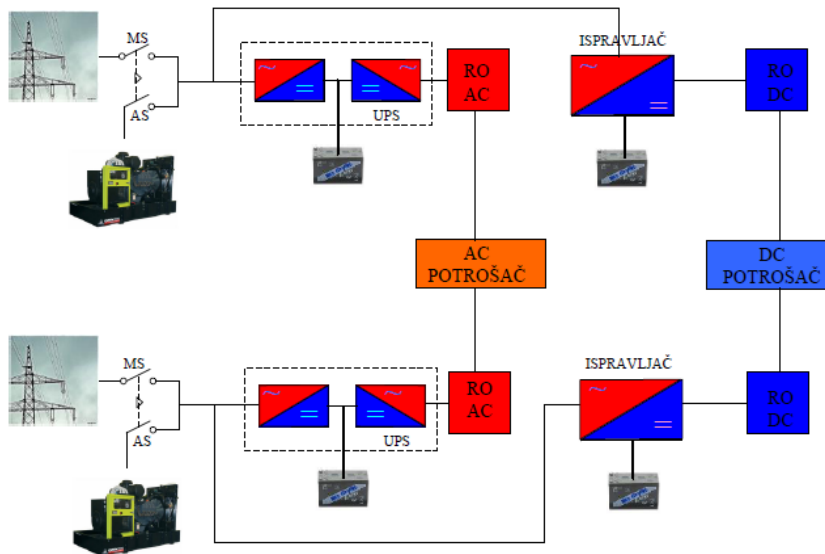
S obzirom da se u zadnji desetak godina dešava konstantan porast broja sistema/objekata naspram broja radnika (smanjenje broja radnika) mi koji radimo na održavanju sistema za napajanje smo bili primorani optimizovati napajanje istih na način da smo uveli neke nove metode i analize mjerenja koje su nam ubrzale/smanjile postupke preventivnih i interventnih pregleda sistema za napajanje, a da se kvalitet i pouzdanost nije smanjila [1].

II. DVOSTRANO NEPREKIDNO NAPAJANJE POTROŠAČA TELEKOMA

U cilju povećanja pouzdanosti i izbjegavanja raspada napajanja potrošača, sistem napajanja treba da bude oko deset puta pouzdaniji od opreme samog potrošača. U tu svrhu se uvodi redundandnost u sistemu napajanja. Da bi se olakšala implementacija redundandnosti sistema napajanja, neki kritični telekomunikacioni i informacioni sistemi se implementiraju sa dvostrukim ulazom za napajanje (dual input) (Sl. 1.).

U svom osnovnom obliku, distribuirana redundanca podrazumijeva stvaranje dva (redundandna) systemska busa zaštićenog napajanja i redundandna sistema za distribuciju napajanja. To eliminiše mnoge tačke kao mogući izvor greške, cijelim putem sve do napojni klemna potrošača. Da bi se obezbijedio "fault tolerance" (tolerancija na greške) na neki način se mora omogućiti da potrošač dobiva energiju sa oba zaštićena napojna busa.

Da bi se zaštitili od brzih ispada napajanja, kao naprimjer kratki spojevi ili ispad sistema napajanja, moraju biti implementirani ili potrošač sa dvostrukim ulazom ili koristiti veoma brze prekidače izeđu dva nezavisna izvora napajanja da bi se izbjegli padovi.



Sl. 1. Sistem dvostranog neprekidnog napajanja električnom energijom potrošača telekoma

Danas postoji više konfiguracija za distribuirana redundantna napajanja [2]. Za današnje velike, moderne uobičajene telekomunikacione objekte, odnosno one sa visokim nivoom zastupljenosti informacione tehnologije, implementira se dual redundandi UPS sa redundandnim AC napajanjem [4].

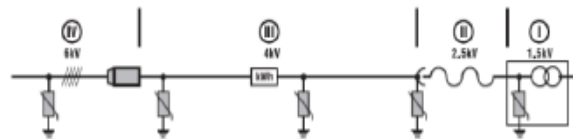
Specificiranje i održavanje visokog nivoa raspoloživosti napajanja zahtijeva pristup određenom broju servisa za podršku. Preventivno održavanje je od ključnog značenja za višegodišnje održavanje sistema napajanja. To uključuje redovno testiranje, ispitivanje baterijskog postrojenja, verifikovanje da UPS i ispravljači rade ispravno i termografski nadzor izabrane opreme i kablova u cilju predupređivanja padova u električnim sistemima [5].

Telekomunikaciona mjesta, posebno ako su bez operatora ili udaljena, trebaju detaljne periodičke provjere. Te provjere moraju biti uključene u program zaštite napajanja da bi se izbjegli problemi ili predložile korektivne akcije

Baterije moraju osigurati pouzdan izvor električne energije za potrošače koja moraju kontinuirano raditi za vrijeme nestanka napajanja. Često puta su potrošači u istosmjernim razvodima prekidači koji zahtijevaju napajanje relativno velikom strujom u kratkom vremenu, a aku-baterije koje ih napajaju često nemaju visoke performanse. Postoje dva razloga za to. Prvo je u tome što većina ostalih potrošača, koji trebaju trajno napajanje, zadovoljavaju aku-baterije srednjeg kvaliteta. Drugi i mnogo važniji razlog je zbog toga što visokokvalitetne baterije imaju tanje ploče, time i kraći životni vijek aku-baterija srednjeg kvaliteta, što bi smanjilo pouzdanost sistema istosmjernog razvoda. Slično razmišljanje vrijedi za naizmjenični sistem besprekidnog napajanja [3].

III. PRENAPONSKA ZAŠTITA OBJEKATA TELEKOMA

Električne instalacije je potrebno posmatrati kao cjeloviti sistem koji treba zaštititi od prenapona. Da bi se odredio stepen raspoloživosti električne opreme i uređaja s obzirom na otpornost na udarne napone oni se projektuju, izrađuju i ispituju prema prenaponskim kategorijama. Postoje četiri prenaponske kategorije; za svaki projektovani napon električne opreme i uređaja definiše se za određenu prenaponsku kategoriju podnosivi udarni napon koji ta oprema odnosno uređaj mora izdržati (Sl. 2.)



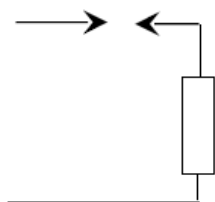
Sl.2 Prenaponska zaštita električnih instalacija objekta telekoma

Prenaponska zaštita vodova za napajanje objekta telekomunikacionog operatera postavlja se na ulazu energetskih vodova u objekat sa telekomunikacijskom opremom i instalira između energetskog voda i uzemljenja. Konkretno šeme spajanja zavise od primijenjenog sistema uzemljenja niskonaponske energetske mreže. Elementi prenaponske zaštite moraju imati velike energetske sposobnosti kako bi bili u stanju odvesti ka zemlji prenaponske impulse velike energije uz preostali napon koji neće negativno djelovati na opremu koja se napaja ovim vodovima. U skladu s klasifikacijom koja je definisana u standardu IEC 61643-1 [6], uređaj prenaponske zaštite koji se

instalira prvi na ulazu u objekat označava se kao zaštita klase I i mora izdržati struje koje su posljedica direktnih atmosferskih pražnjenja. Prema navedenom standardu uređaj klase II namijenjen je za zaštitu od efekata koji su rezultat indirektnih udara i indukovanih prenapona. Testiranje uređaja klase I vrši se za impuls 10/350 μ s i 8/20 μ s, dok se za klasu II vrši samo ispitivanje za impuls 8/20 μ s [7].

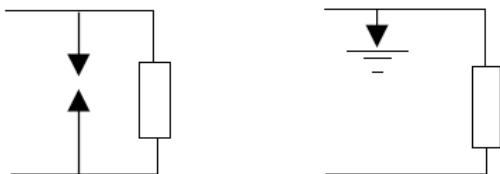
IV. REDNI I PARALELNI ELEKTRIČNI LUK

Električni luk predstavlja proticanje struje kroz nepotpuno jonizovanu plazmu nastalu udarnom jonizacijom gasova i para, stvorenih zagrevanjem do viših temperatura delova oko vrhova elektroda (dva provodnika na različitim električnim potencijalima). Čvrst materijal vrhova elektroda prevodi se, preko tečne i gasovite faze, u fazu nepotpuno jonizovane plazme. U normalnim uslovima, pod uticajem potencijalne razlike između dve blisko postavljene elektrode razdvojene izolatorom, u električnom kolu se registruje protok električne struje. Temperatura izolatora raste, usljed čega on isparava i broj slobodnih nosioca naelektrisanja u njemu raste, što rezultuje smanjenjem otpornosti i porastom struje. Kada temperatura kontakta progresivnim procesom dostigne određenu vrednost, formiraju se uslovi za održavanje luka. Potrebno je da postoji gasna sredina koja omogućava intenzivno kretanje nosilaca elektriciteta kako bi se električni luk uspostavio i održao. Karakteristike luka su velika gustina struje, mali katodni pad napona i visoka temperatura u jonizovanoj oblasti (2000 $^{\circ}$ C - 6000 $^{\circ}$ C).



Sl. 3. Redni električni luk

Po svom položaju u električnim instalacijama električni luk može biti serijski – redni (Sl. 3.) ili paralelni – otočni (Sl. 4.). Serijski ili redni električni luk se može javiti na bilo kom mestu strujnog kola od razvodne table do električnog prijemnika, uključujući razvodnu tablu i električni prijemnik. Paralelni ili otočni električni luk se može javiti između faznog i neutralnog provodnika ili između faznog provodnika i mase.



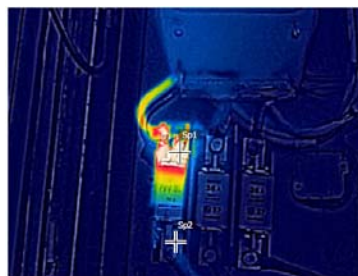
Sl. 4. Paralelni luk

Treba istaći da, sa gledišta opasnosti od nastanka požara, postoji veoma bitna razlika između rednog i paralelnog električnog luka. Naime, u slučaju pojave serijskog – rednog luka, u strujnom kolu u kome se luk pojavio struja opada, pa se za

sigurnošću može očekivati da prekostrujna zaštita kola neće odreagovati i isključiti napajanje. Kako kvar ovakvog tipa može neometano da traje, verovatnoća nastanka požara je velika. Zbog činjenice da je praktično nevidljiv od strane svih klasičnih zaštitnih komponenti, upravo je redni električni luk jedan od najčešćih uzroka požara izazvanih kvarovima u električnim instalacijama [8].

V. KRITERIJUMI ZA PROCJENU TERMIČKOG STANJA ELEMENATA ELEKTRIČNIH INSTALACIJA

Termovizijska kamera omogućava korisniku svakodnevno preventivno snimanje temperatura ključnih tačaka elemenata električnih instalacija na kojima se razvija toplota. Time se osigurava pravovremeno otkrivanje i predviđanje eventualni nepravilnosti u radu električnih instalacija.



Sl.5.. Termovizijska slika osigurača

Memorisanjem termoslike i temperature laserom označene tačke (markera) omogućuje se kvalitetno formiranje stručnog izvještajai analiziranja stanja električnih instalacija (Sl. 5.). Nakon analiza termografskih slika na osnovu kojih su utvrđena mjesta i uzroci neispravnosti i preporučuju mjere koje služba održavanja treba da sprovede u optimalnom vremenskom periodu da se otklone uočene neispravnosti

Pošto ne postoje međunarodni standardi prema kojima se na osnovu veličine pregrijavanja može procjeniti može procjeniti termičko stanje elemenata električnih instalacija u ovom ispitivanu primjenjivani su kriterijumi koje je na osnovu iskustva utvrdio „Infrared Training Center“ najveća svjetska kompanija za obuku u oblasti termografije. Prema ovim ktiterijumima se na osnovu veličine pregrijavanja određuje klasa termičkog stanja elemenata („A“, „B“ ili „C“), a zatim se usvajaju dijagnostičke preporuke o aktivnostima koje je potrebnapreduzeti, kao što je prikazano u Tabeli I [9].

TABELA I KRITERIJUM ZA KLASU TERMIČKOG STANJA ELEMENATA

Veličina pregrijavanja ΔT [$^{\circ}$ C]	Klasa	Dijagnostika preporuke
$\Delta T > 30$ [$^{\circ}$ C] ili $T > 80$ [$^{\circ}$ C]	A	Potrebna je hitna intervencija
5 [$^{\circ}$ C] $\leq \Delta T < 30$ [$^{\circ}$ C]	B	Potrebna je intervencija prilikom prvog isključenja
0 [$^{\circ}$ C] $\leq \Delta T < 5$ [$^{\circ}$ C]	C	Potrebno je pratiti stanje i Planirati intervenciju

Greške u instalacijama koje dovode do pojave električnog luka često su neprimetne, jer se dešavaju u zidovima ili između spratova. Opasnost nastupa onog momenta kada se usled gorenja električnog luka stvore uslovi da se zapali izolacija, drveni predmeti, tepisi ili papir. Na žalost, mnoge od ovih grešaka koje dovode do pojave električnog luka u strujnom kolu neće biti otkrivene konvencionalnim zaštitnim prekidačima

VI. KOJE SU NAJČEŠĆE POGREŠKE KOD IZBORA ADEKVATNE AKU-BATERIJE

Kako odabrati adekvatnu aku-bateriju, to je izazov za svakog ozbiljnog Investitora jer nema svako od njih stručnjaka za aku-baterije, pa se tom koraku često pristupa olako i amaterski, što kasnije može imati velike posljedice ako izbor nije izveden u skladu sa pravilima struke i stvarnoj potrebi za aku-baterijom u sistema besprekidnog napajanja (Sl. 6.).



Sl. 6. Aku-baterije skladište energije

Najvažniji trenutak u dimenzionsanju cjelokupnog integrisanog sistema za napajanje je izbor adekvatne aku-baterije, budući da prvenstveno besprekidnost zavisi praktički isključivo o aku-bateriji koja je u dijelu sistema. Praksa u našem telekomu pokazuje da se u dosta slučajeva događa da kod ispada iz rada elektroenergetskog sistema aku-baterija ne preuzme u potpunosti sve snadbjevanje rezervnom energijom i Investitori, u pravilu, za to krive aku-baterije jer su, po njihovom mišljenju, lošeg kvaliteta i osjećaju se prevarenim.

Praksa također pokazuje da to najčešće nije istina, nego je krivica bila na početku projekta, jer nije odabrana adekvatna aku-baterija, odnosno ona koja je odabrana nije za uvlove rada u kojima se stvarno koristi. Odabrana je i koristi se „neadekvatna aku-baterija“ koja je dobrog kvaliteta, ali nije za namjenu koju Investitor stvarno želi i ne daje parametre koje Investitor želi odnosno očekuje. Preporuke prilikom izbora adekvatne aku-baterije su:

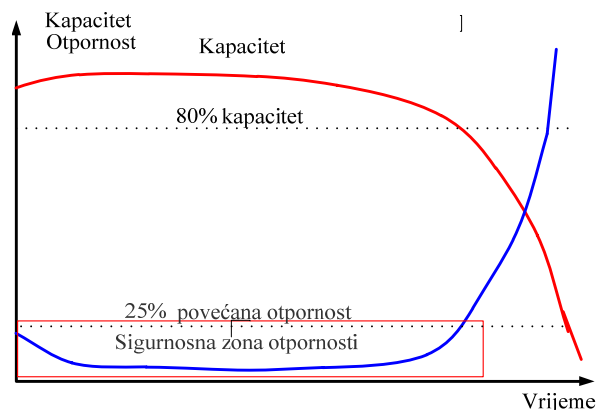
- Definisati vrstu sistema/uređaja za koje se želi nabaviti aku-baterija (telekomunikacije, UPS sustav za besprekidno napajanje, IT oprema, ...).

- Definisati kriterijum životnog vijeka aku-baterije (1, 2, 3, ...5, 10, ... godina), odnosno željeno vrijeme eksploatacije aku-baterije, u kojem se od aku-baterije očekuje da u potpunosti osigura rezervnu energiju
- Definisati minimalni napon na potrošaču kojega mora zadovoljiti baterija u normalnom režimu pražnjenja – najniži napon na kojem potrošač radi.
- Definisati očekivane temperaturne uslove u kojima će aku-baterija raditi (prostor, kabinet,...)
- Definisati očekivani broj ispada tokom jedne godine za koje vrijeme će se energija dobivati iz aku-baterije (broj ciklusa punjenje / pražnjenje).

Zbog svega navedenoga preporučuje se svim naručiteljima i korisnicima aku- baterija, a koji ih namjeravaju koristiti kao dio sistema za besprekidno napajanje ili kao rezervni izvor energije, da posebno obrate pažnju na spomenute preporuke, jer će jedino u slučaju poštivanja tih zahtjeva moći biti sigurni da će njihova aku-baterija odraditi svoju ulogu na kvalitetan, siguran i pouzdan način. Neadekvatna aku-baterija povećava rizik od neželjenog ispada opreme u slučaju snadbjevanja iste iz aku-baterija, a što opet ima za posledicu nezadovoljnog korisnika koji je bio uvjeren da je „njegova“ aku-baterija odabrana, isporučena, montirana i održavana na najbolji način.

VII. OMSKA METODA TESTIRANJA AKU-BATERIJA

Ovo se vrši injektovanjem naizmjenične struje poznate amplitude i frekvencije u ćeliju/blok i mjerenjem naizmjeničnog pada napona. Rezultujuća impedansa se dobije primjenom Omovog zakona (Sl. 7.).

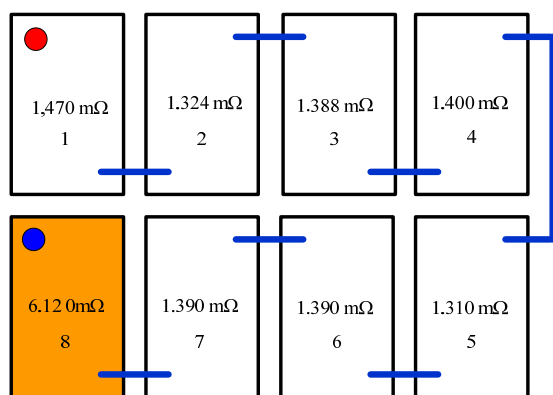


Sl. 7. Odnos kapaciteta i otpornosti aku-baterija

Testirao sam aku-bateriju EB4 6V200 metodom mjerenja impedancije sa instrumentom BATTERY HiTE-STER 3554. (Sl.8.) Na instrumentu se prikazuju rezultati mjerenja to jest otpornost i napon koje smo unjeli u TABELU II [10].

TABELA II REZULTATI MJERENJA

Red. br.	Unutrašnji otpor baterije	Napona bateriji
1.	1,470 mΩ	6,92V
2.	1,324 mΩ	6,83V
3.	1,388 mΩ	6,90V
4.	1,400 mΩ	6,98V
5.	6,120 mΩ	5,80V
6.	1,390 mΩ	6,86V
7.	1,390 mΩ	6,84V
8.	1,310 mΩ	7,01V

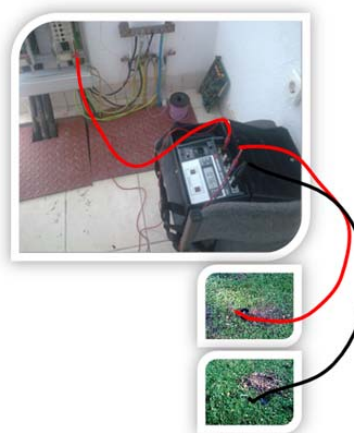


Sl. 8. Greške na jednoj ćeliji EB4 6V200 aku-baterije

VIII. Uzemljenje objekta telekoma

Za prenaponsku zaštitu je najbitnije uzemljenje isto tako nije manje važno i izjednačenje potencijala. Bez dobrog otpota

rasprostiranja bolje je nepostavljati prenaponsku zaštitu jer postavljanjem prenaponske zaštite možemo dobiti kontra efekat.

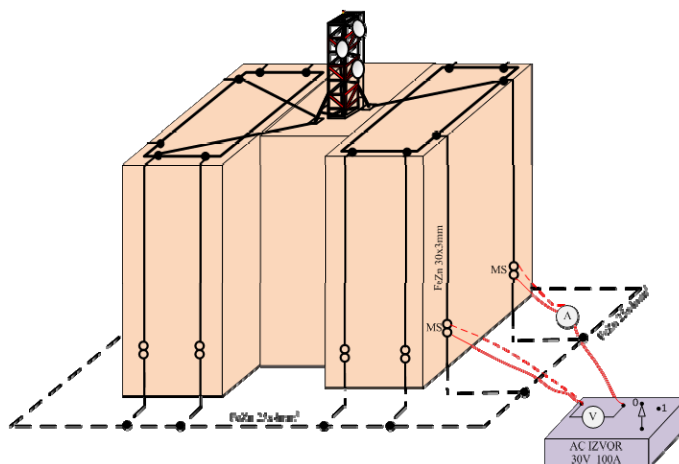


Sl.9. Mjerenje otpora rasprostiranja

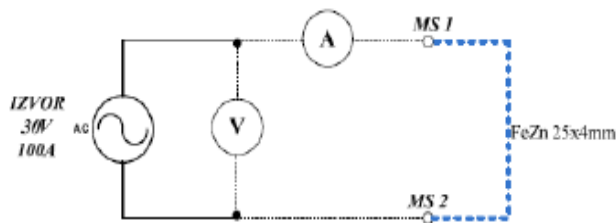
Isto tako je važno ustanoviti u kakvom je fizičkom stanju uzemljivač. Ako se uzemljivač koji se nalazi u agresivnoj zemlji vremenom dobije manji poprečni presjek to nije dobro. Takav uzemljivač treba mjenjati iako je otpor rasprostiranja dobar

Kako je ovaj zahtjev o probnim iskopavanjima nezahvalan, a često tehnički teško izvodiv (uzemljivač ispod asfalta i betona, temeljni uzemljivač) te se rijetko i koristio. Za “združeni” uzemljivač (elektro + gromobranski) izveden sa trakom FeZn 25x4mm2 dosta pouzdana metoda se pokazala ispitivanje sa strujama AC 100A. Princip navadne metode prikazan je na (Sl. 10 i Sl. 11).

Ispitivanje se vrši između svih izvoda uzemljivača gdje se traka u zemlji ispituje po segmentima. Ispitivanje se može izvršiti i prema krovu za sve gromobranske spusteve (Sl. 12.).



Sl. 10. Princip održavanja uzemljenja objekta telekoma



Sl. 11. Šema ispitivanja združenog uzemljivača

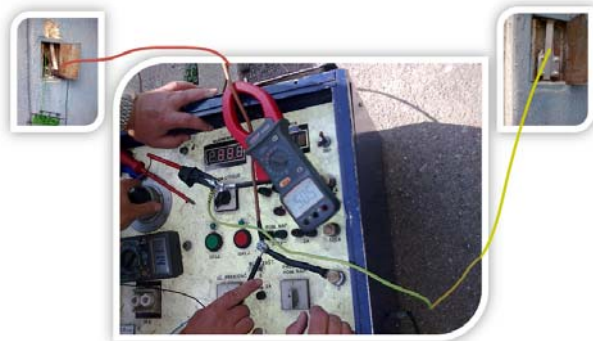
Otpor ispitivanog dijela uzemljivača se može izračunati:

$$R_{u1} = U(V)/I(A) - R_{pk} (\Omega) \quad (1)$$

U – napon izvora u V

I – struja kroz dio uzemljivača u A

R_{pk} – otpor priključnih kablova i spojeva (Ω)



Sl. 12. Ispitivanje uzemljivača - primjer

Ukoliko je izračunati otpor dosta veći od teoretski izračunatog otpora dijela trake to ukazuje na slabe spojeve uzemljivača ili smanjenog presjeka zbog oštećenja korozije.

Otpornost uzemljenja uzemljivača predstavlja otpornost sredine (tla) između ekvipotencijalne površine uzemljivača i ekvipotencijalne površine nultog potencijala (tzv. referentne zemlje). Otpornost uzemljenja je vrlo bitna ali isto tako je bitno fizičko stanje uzemljivača.

Uzemljivač tamo gdje je agresivna zemlja može da mu se smanjni poprečni presjek pa to predstavlja dodatni problem. Zbog toga mi moramo provjeravati stanje svakog uzemljivača da bi se uvjerali u njegovo stanje. Metoda kojom smo utvrđivali stanje uzemljivača u praksi pokazalo se da je vrlo korisna. Ova metoda se može koristiti za ispitivanje stanja uzemljivača u svim objektima.

IX. ZAKLJUČAK

Uvođenjem svih ovih metoda uspjeli smo održati raspoloživost/pouzdanost sistema za napajanje uređaja preko kojih se izvršavaju sve vrste elektroničkih komunikacijskih usluga na visokom nivou bez obzira što se broj radnika potreban za to u zadnjih nekoliko godina smanjio. Ovo je dokaz da se boljom organizacijom, promjenom metoda rada i ulaganjem u nove instrumente i alate mogu obaviti isti poslovi sa manjim brojem zaposleni, što je rezultat svega manji troškovi. Sve je to moguće uz uslov ulaganja dodatnih sredstava u nove instrumente, te specijalističke i kontinuirane edukacije zaposlenih u napajanju.

LITERATURA

- [1] Prof. Dr Jovan Nahman i Dr Vladica Mijailović Razvodna postrojenja, Beograd 2005
- [2] Prof. Dr Jovan Nahuman, Dr Vladica Mijailović, Razvodna postrojenja, Akademska miso elektrotehnički fakultet Beograd 2005 god
- [3] <http://www.power-one.com/power/news-events>
- [4] Merlin Gerin, "High Power UPS Systems – Design Guide"
- [5] Merlin Gerin, "High Power, UPS Systems – Instalation Guide"
- [6] IEC 61643-1 "Surge protective devices connected to low voltagepower distribution systems .
- [7] Milan Paripović, Atmosfersko električno pražnjenje i prenaponska zaštita: Praktično iskustvo, 17. Telekomunikacioni forum TELFOR 2009 Srbija, Beograd, novembar 24.-26., 2009.
- [8] Hadžiefendić N, „Štetni efekti pojave rednog električnog luka u niskonaponskim električnim instalacijama“, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2002.
- [9] Ilić B.,Adamović Ž., Savić B., Stanković N. Termografska ispitivanja elemenata elektroenergetskih postrojenja
- [10] H.A. Kiehne: BATTERY TECHNOLOGY HANDBOOK

ABSTRACT

The great development of electronic communications in recent years has led to a significant increase in the number of objects /devices in which telecom provides its services. As a group that performs maintenance of power supply systems were forced to optimize their maintenance in a way that we have introduced some new methods of analysis and measurement that we accelerate/reduce procedures of regular and emergency inspection system for power supply, and that the quality and reliability is not diminished. In this article I will describe new methods that we introduced, namely: thermographic examinations and measurement of internal resistance battery and the physical condition of the ground.

OPTIMIZATION OF MAINTAINING POWER IN TELECOM THE INTRODUCTION OF NEW METHODS OF MEASUREMENT

Milan Paripović



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017

3 - 4. novembar, Banja Luka

Sesija M1

Sesija M1

Zdravko Milovanović, Svetlana Dumonjčić-Milovanović, Aleksandar Milašinović, Darko Knežević i Jovan Škundrić RAZVOJ TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU KORISNIH OBLIKA ENERGIJE – ČISTE TEHNOLOGIJE I ODRŽIVI RAZVOJ	122
Zdravko Milovanović, Momir Samardžić, Vinko Babić i Svetlana Dumonjčić-Milovanović ENERGETSKA EFIKASNOST TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA – FAZE I METODOLOGIJA REALIZACIJE IZRADE STUDIJE NA PRIMJERU RITE UGLJEVIK INSTALISANE SNAGE 300 MW	134
Vinko Babić i Zdravko Milovanović BIOMASA KAO ZAMJENA ZA FOSILNA GORIVA U SISTEMIMA DALJINSKOG GRIJANJA	148
Zdravko Milovanović, Momir Samardžić, Darko Knežević, Aleksandar Milašinović, Svetlana Dumonjčić-Milovanović ENERGETSKA EFIKASNOST TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA – REZULTATI OPTIMIZACIJE NA PRIMJERU RITE UGLJEVIK INSTALISANE SNAGE 300 MW	154
Zdravko Milovanović NEKA RAZMIŠLJANJA O PLANIRANJU OPTIMALNOG KORIŠĆENJA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE SA SOCIJALNOG I ASPEKTA ODRŽIVOG RAZVOJA – OBJEKTIVNO VREDNOVANJE I SOCIJALNI ASPEKT	168
Slađana Janković, Marija Lukač, Petar Gvero BANJALUKA KAO PAMETNI GRAD DO 2040-TE	179
Goran Jankes, Nikola Tanasić, Mirjana Stamenić, Tomislav Simonović, Nikola Petković, Aleksandar Nikolić, Marko Radosavljević, Miloš Saleta ANALIZA MOGUĆNOSTI UNAPREĐENJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI KOD TOPLANA I INDUSTRIJSKIH KOTLARNICA NA UGALJ	185

Razvoj tehnologija za proizvodnju korisnih oblika energije

Čiste tehnologije i održivi razvoj

Zdravko N. Milovanović¹, Svetlana R. Dumonjić-Milovanović², Aleksandar N. Milašinović², Darko Knežević², Jovan B. Škundrić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Partner Inženjering, Banja Luka, Republika Srpska

zdravko.milovanovic@mf.unibl.org, svetlanadm@ymail.com, aleksandar.milasinovic@mf.unibl.org,

darko.knezevic@mf.unibl.org, jovan.skundric@mf.unibl.org

Sažetak—Energetske potrebe trenutno se uglavnom podmiruju iz konvencionalnih izvora energije (fosilna goriva: uglj, nafta, prirodni gas, hidroenergija vodotoka-hidroelektrane, kao i nuklearna goriva za procese fisije). Kako fosilna i nuklearna goriva spadaju u grupu neobnovljivih izvora energije, samim tim i njihove rezerve su ograničene, pa je neophodno u budućnosti računati sa mogućnošću njihovog iscrpljivanja. Da bi se obezbijedila sigurnija energetska budućnost, istraživanja u oblasti teorijske mogućnosti i realne racionalne primjene energetskih izvora teku u dva pravca - produženje vijeka mogućeg korištenja neobnovljivih energetskih izvora i organizacija na energetske izvore i tehnološke postupke koji minimalno utiču na zagađenje vazduha i čovjekove okoline u cjelini (tzv. čiste tehnologije). Dakle, potrebno je obezbijediti kontinuirani rast proizvodnje energije u skladu sa rastom industrijske proizvodnje i društvenog standarda, uz paralelno iznalaženje pogodnih tehnoloških postupaka za racionalno korišćenje obnovljivih energetskih izvora (alternativa za neobnovljive izvore) i poboljšanje stepena iskorišćenja neobnovljivih energetskih izvora u postrojenjima sa tzv. malootpadnim tehnologijama, sa što manjim štetnim uticajem na životnu sredinu.

Ključne riječi— *energetske potrebe; „čiste“ tehnologije; održivi razvoj; Republika Srpska; zaštita životne sredine;*

I. UVOD

Zahtjevi za kontinuiranom obezbjeđenjem potreba za energijom u dovoljnim količinama za industrijska postrojenja, sabračaj i životni standard ljudi, zahtjeva 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), zatim povećanje energetske efikasnosti (štednja i racionalno korištenje energije, smanjenje distributivnih i drugih gubitaka), kao i povećanje udjela proizvodnje korisnih oblika energije iz obnovljivih izvora, uz dalje podsticanje razvoja kogenerativnih i trigenerativnih sistema. U zadnje vrijeme pojavilo se više uticaja čije je kombinovanje dovelo do povećanog zanimanja za distribuiranu proizvodnju iz

obnovljivih izvora energije (smanjenje emisije CO₂, programi energetske efikasnosti ili racionalnog korištenja energije, deregulacija tržišta električnom energijom, diversifikacija energetskih izvora, zahtjevi za samoodrživosti nacionalnih energetskih sistema, podsticaji od strane vlada kroz metodologiju za vrednovanje i određivanje cijena iz obnovljivih izvora i sl.). Stvaraju se strateški planovi i programi za iskorištenje obnovljivih izvora (vjetroelektrane, male hidroelektrane, fotonaponski izvori, zemni gas, energija iz otpada, energija valova i plime i oseke, energija iz biomase i sl.), kao i pravci otklanjanja glavnih nedostataka klasičnih elektrana (povećanje stepena iskorištenja energije sadržane u primarnom gorivu sa 33 na 45÷50%, izbor drugačijeg načina za sagorijevanje, uz znatno sniženje štetnih polutanata sadržanih u dimnim gasovima, a koji se ispuštaju u vazduh, npr. gasifikacija čvrstih i tekućih goriva u sintetički gas). Proizvodnja električne energije na konvencionalan način odvija se u velikim centralizovanim postrojenjima. Tako proizvedena električna energija doprema se do potrošača posredstvom elektrodistributivne mreže. Toplotna energija nastala u takvom procesu nije u potpunosti iskoristiva pa se dio toplote odašilje u okolinu neiskorišten. Obezbeđivanje potrebne energije za grijanje i hlađenje kod udaljenih potrošača istovremeno se ostvaruje potrošnjom električne energije, fosilnih goriva ili primjenom obnovljivih izvora energije. U vezi sa prethodnim konstatacijama odvijaju se brojna i kompleksna naučna istraživanja u osvajanju novih tehnoloških procesa i postupaka kako bi se dobila "čista energetika". Tako na primjer, u dvije najveće energetske zemlje svijeta (SAD, Rusija) usvojeni su dugoročni programi razvoja energetike koji su povezani sa zaštitom životne sredine, koju u značajnoj mjeri ugrožava energetska proizvodnja. Državni naučno-tehnički program u Rusiji pod nazivom "Ekološki čista energetika" obuhvata četiri oblasti među kojima su "bezbjedna nuklearna elektrana", "ekološki čista termoelektrana", "nekonvencionalna energetika" i "gorivo budućnosti". Američki dugoročni program "Ekološki čista tehnologija uglja" posmatra razvoj ovih tehnologija u četiri oblasti, [2÷3]:

- do ulaska uglja u ložište kotla, tj. u procesu njegovog dobijanja pri separaciji i čišćenju od dijela mineralnih primjesa (pepeo, sumpor i dr.);

- u procesu sagorijevanja uglja u ložištu kotla;
- poslije sagorijevanja uglja u ložištu kotla, tj. čišćenje dimnih gasova u zoni dimnih kanala od kotla do dimljaka;
- gasifikacija uglja u okviru energetskog postrojenja pri čemu se štetne primjese iz uglja odvajaju u procesu njegove gasifikacije (pepeo, SO₂, NO_x) - dobijeni gas koristi se u gasno turbinskim (GTP) i gasno-parnim turbinskim (GPTP) postrojenjima.

Ovi razvojni programi ukazuju na pravce razvoja energetike i u drugim zemljama svijeta. Iako nekonvencionalni izvori energije imaju relativno mali udio u ukupnom energetskom bilansu, ne treba zanemariti njihov značaj. Pred naukom i stručnom praksom stoji važan zadatak da se poveća korištenje svih vidova energije i tehnologija kojima se smanjuje prljanje okolne sredine, kao i obnovljivih nekonvencionalnih izvora energije kao djelimične alternative neobnovljivim izvorima energije.

II. METODOLOGIJA PRIMJENE ALTERNATIVNIH TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU KORISNIH OBLIKA ENERGIJE

A. Pravci razvoja u korištenju novih i obnovljivih izvora energije

Pod pojmom novih i obnovljivih energetskih izvoranajčešće se podrazumijevaju samo nekonvencionalni obnovljivi izvori energije, a u prvom redu energija sunca, vjetra, geotermalna energija i energija biomase. Prema rezoluciji N^o 33/148 Generalne skupštine OUN, u nove i obnovljive energetske izvore uvršteni su sljedeći izvori: hidroenergija (mini i mikro hidroelektrane pripadaju i grupi nekonvencionalnih izvora energije), solarna energija, geotermalna energija, energija vjetra, energija plime i oseke, energija morskih talasa, termalni gradijent mora, energija transformacija biomasa, energija dobijena sagorijevanjem drveta, drvenog uglja i treseta, energija dobijena snagom tegleće stoke, kao i energija dobijena sagorijevanjem gorivih skrivaca i bitumeniziranih pješčanika. Za prostor bivše Jugoslavije svakakoje od posebnog interesa korištenje sunčeve i geotermalne energije, kao i energije vjetra i biomase. Međutim njihovo korištenje sporo se uvodi u praksu. U osnovi, razlozi su u dosta visokim specifičnim ulaganjima u izgradnju i niža cijena energije koja se dobija u klasičnim elektranama. Treba, ipak, računati da će se relativne razlike u investicionim ulaganjima u narednom periodu još više smanjiti, a treba računati i na znatna poskupljenja izgradnje klasičnih i nuklearnih elektrana radi dodatnih ulaganja u postrojenja za zaštitu životne sredine i povećanja sigurnosti rada atomskih reaktora. Tako se u SAD-u već sada procjenjuje da cijena izgradnje TE iznosi oko 1500 USD/kW, pri čemu se oko 30% odnosi na postrojenja i uređaje za zaštitu životne sredine. Pri realnim proračunima treba uzeti u obzir i kapitalna ulaganja u izgradnju rudnika uglja. S druge strane, postoje i drugi razlozi za nedovoljno korištenje novih i obnovljivih izvora energije:

- ne postoji dovoljna ekonomska zainteresovanost proizvođača i potrošača za veće korištenje postrojenja i uređaja na bazi navedenih izvora energije;

- ne postoji sistemska (zakonska) ekonomska stimulacija potrošača koji bi koristili nove izvore energije;
- vrlo mala ili nikakva finansijska podrška državnih organa za naučna i razvojna istraživanja u ovoj oblasti;
- nepripremljenost mašingradnje za proizvodnju opreme i uređaja koji bi koristili obnovljive izvore energije;
- neorganizovan rad u ovoj oblasti (uglavnom pojedinci ili ponegdje mala preduzeća i ustanove) i slaba opremljenost naučnoistraživačkih organizacija savremenom naučnom opremom i računarskom tehnikom;
- slaba povezanost domaćih naučnih i stručnih kadrova i odgovarajućih preduzeća sa inostranim vodećim ustanovama u ovoj oblasti radi korištenja njihovih dostignuća i transfera znanja.

Analizom naprijed pobrojanih faktora mogu da se izvuku zaključci u kom pravcu treba djelovati da bi se omogućio početak i dalji razvoj u korištenju novih i obnovljivih izvora energije i u našim uslovima. Posebno je važno razmišljati o kombinovanim (elastičnim) sistemima u kojima se istovremeno koriste dva ili više nekonvencionalnih izvora energije. Drugi važan razvojni pravac u energetici je osvajanje tehnologija i energetskih postrojenja u kojima se racionalnije koristi neobnovljivi primarni izvori energije. Pored većeg stepena korisnog dejstva, ovakva postrojenja treba da omoguće znatno manje zagađenje okoline. To bi ujedno i produžilo vijek korištenja neobnovljivih fosilnih goriva u kom periodu treba pronaći alternativnu zamjenu sa drugim izvorima energije. Navedimo neke od tih tehnološko-energetskih postupaka:

- osvajanje visokofikasnih tehnologija u metodama otkopavanja, kao i u separaciono-flotacionim procesima za odvajanje mineralnih primjesa u kojima će se postići veće iskorisćenje gorive mase uglja (smanjenje otkopnih gubitaka i efikasnije sagorijevanje u ložištima kotlova);
- podzemna gasifikacija uglja uz dobijanje gasova kao nosioca toplotne energije;
- gasifikacija čvrstih goriva u gasnim generatorima velike snage;
- osvajanje gasno-parnih energetskih postrojenja sa gasnim turbinama snage 115÷200 MW i početnom temperaturom gasova preko 1100 °C, čime se znatno povećava SKD postrojenja u odnosu na klasična parno turbinska postrojenja;
- osvajanje novih konstrukcija parnih kotlova sa cirkulacionim fluidiziranim slojem i kotlova sa arofontanskim predkomorama za sagorijevanje uglja u kojima mogu sagorijevati ugljevi manjeg kvaliteta uz regulaciju SO₂ u pepelu (odsumporavanje u procesu nisko temperaturnog sagorijevanja ugljeva - oko 850 °C);

- osvajanje magnetno-hidrodinamičke (MHD - generatori) direktne transformacije toplote u električnu energiju, pri čemu se kombinacijom MHD-generatora i klasičnih kotlovske turbinske postrojenja postiže stepen iskorištenja toplote goriva od 50÷60%;
- spaljivanje gradskog smeća i gorivih industrijskih otpadaka u posebnim energetskim parnim kotlovima u bloku sa toplifikacionim funkcijama;
- razvoj tehničkih sistema za korištenje nisko-potencijalnih energetskih resursa: otpadna toplota termoelektrana i nuklearnih elektrana, industrijskih preduzeća, toplota ventilacionih gasova i slično;
- uvođenje postupaka termobriketiranja uglja-uslijed brzog zagrijavanja uglja i njegove termičke destrukcije, obrazuju se (ali ne izdvajaju!) visokomolekularni tečni produkti koji služe i kao vezivno sredstvo briketa (povećava se SKD peći za 20÷25 %), [5].

B. Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije

S ciljem poboljšanja energetske efikasnosti i globalnog smanjenja potrošnje energenata pored centralizovane proizvodnje električne energije poslednjih nekoliko decenija razvijen je i koncept istovremene proizvodnje dva korisna oblika energije, uz primjenu postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije (Combined Heating and Power Systems – CHP Systems), odnosno (Combined Cooling, Heating and Power Systems – CCHP Systems), [4] i [6]. Takva postrojenja su manjeg kapaciteta i locirana su najčešće u blizini potrošača energije. Kombinovanom proizvodnjom toplotne i električne energije, znatno manje količine toplote se gube u okolinu. Ona se koristi za potrebe grijanja ili hlađenja, čime se značajno povećava ukupna energetska efikasnost postrojenja, [2], [8], [9] i [15]. U takvim postrojenjima se primjenjuju različite tehnologije kod kojih se proizvodnja električne energije bazira na primjeni industrijskih parnih turbina (Steam Turbines – ST), industrijskih gasnih turbina (Industrial Gas Turbines – IGT), klipnih motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (Reciprocating Internal Combustion Engines - RICE), mikro gasnih turbina (Micro-gas Turbines - MGT), mikro parnih turbina (Micro-steam Turbines - MST), Stirling-ovih motora (Stirling Engines – STR), ili gorivnih ćelija (Fuel Cell - FC). U kombinaciji sa različitim sistemima grijanja i hlađenja moguće je funkcionalno implementirati različite vrste CHP ili CCHP postrojenja, [2] i [4].

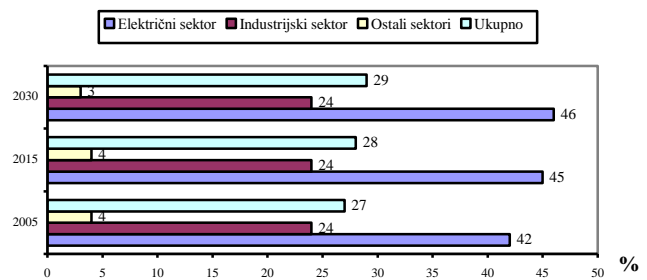
III. NOVE TEHNOLOGIJE U PROIZVODNJI KORISNIH OBLIKA ENERGIJE U REPUBLICI SRPSKOJ

A. Definicija i klasifikacija tehnologija "čistog" uglja

Ugalj je energent sa najvećim procentom zastupljenosti među procijenjenim fosilnim gorivima (preko 65%), sa ravnomjernije raspodijeljenim nalazištima u svijetu u odnosu na nalazišta nafte i gasa. Najveće zalihe uglja se nalaze u Rusiji, SAD, Kini, Australiji, Južnoj Africi, a u Evropi u Njemačkoj, Poljskoj, Češkoj i Velikoj Britaniji. Ugalj je u

svijetu najizdašnije i široko rasprostranjeno fosilno gorivo. Oko 23 % potreba za primarnom energijom i 39 % za električnom energijom dobija se na bazi uglja. Međunarodna energetska agencija (IEA) očekuje povećanje potrošnje uglja od 43 % u vremenu od 2000. do 2020. godine, [7]. Zbog smanjenja zaliha nafte i gasa očekuje se porast značajnijeg korištenja uglja u budućnosti. S druge strane, zastupljenost uglja u podmirivanju današnjih potreba za energijom je manja od zastupljenosti tečnih i gasovitih goriva zajedno. Danas se iz uglja proizvodi oko 40% od ukupne energije u svijetu i očekuje se, s obzirom na energetske projekcije, da će takvo stanje ostati i u narednom periodu (tokom 21. vijeka), slika 1.

Donešeni propisi u vezi zaštite životne sredine, uz povećanje efikasnosti, zahtijevaju smanjenje ispuštanje CO₂ po proizvedenom MW-u, čime se umanjuje potreba za preduzimanjem drugih (drastičnijih) mjera za njegovu redukciju. Visoke termičke efikasnosti procesa i ostvarljivi niski nivoi zagađenja životne sredine su samo naka od dostignuća tog razvoja, koja danas predstavljaju sastavni dio komercijalne ponude energetske opreme na svjetskom tržištu.

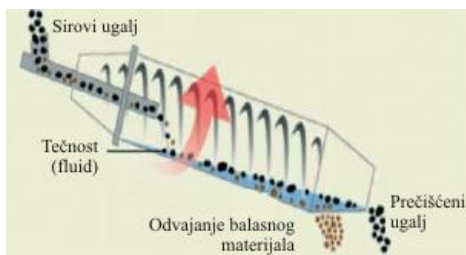


Sl. 1. Prognoza učešća uglja u potrošnji energije po sektorima do 2030. godine, [15] (Izvor: 2005. godina - EIA, International Energy Annual 2005, June-october 2007; 2015. i 2030. godina - EIA, World Energy Projections Plus, 2008)

Veliki udio ugljenika i štetnih balastnih sastojaka čine da sagorijevanje uglja predstavlja proces sa najvećim zagađivačem i proizvođačem CO₂ emisija po jedinici proizvedene električne energije. Kao odgovor na ovaj problem predstavlja razvoj tehnologija "čistog uglja", čime se ovaj negativan uticaj svodi u ekološki prihvatljiv nivo. Tehnologije "čistog uglja" su u početku bile usmjerene na smanjenje emisija sumpornih i azotnih oksida te čvrstih nesagorjelih čestica, da bi se, zbog sve veće zabrinutosti za klimatske promjene, pažnja sve više usmjeravala prema smanjenju CO₂ emisija. Tehnologije proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva s nultom emisijom CO₂ u atmosferu još uvijek nisu razvijene do maksimalne komercijalne isplativosti, ali realno je to očekivati u narednom periodu. Iz tih razloga, dostignuća u razvoju tehnologija čistog uglja treba uzimati u obzir pri strateškom planiranju izgradnje proizvodnih kapaciteta u elektroenergetskom sistemu Republike Srpske i BiH u cjelini, s ciljem dugoročnog osiguranja pouzdanosti snabdijevanja električnom energijom. Od tehnologija "čistog uglja" treba izdvojiti sljedeće:

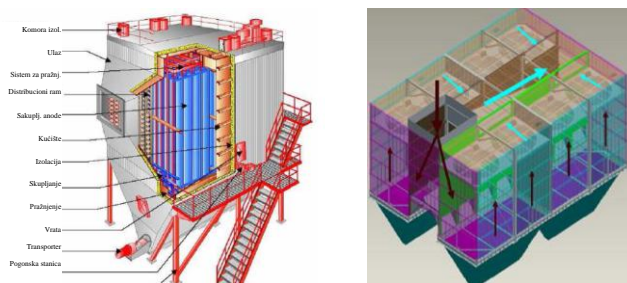
- tehnologija ispiranja uglja*, koja podrazumijeva čišćenje uglja "ispiranjem", čime se smanjuju emisije pepela i

SO_x, a povoljno djeluje i na proces sagorijevanja (ugalj se transportuje do TEP zajedno s mineralnim sadržajem koji je nesagorljiv, a može sadržavati i štetne sastojke (poput žive), usitnjava se i uvodi u spororotirajući bubanj u kojemu se nalazi fluid veće gustoće, tako da ugalj pluta dok teži, mineralni materijal tone i sa dna se odvodi iz bubnja, da bi se pročišćeni ugalj zatim samljeo u finu prašinu pogodnu za sagorijevanje), slika 2;



Sl. 2. Primjer tehnologije za ispiranje uglja, [15]

- b) *tehnologija odvajanje čvrstih čestica*, uz korišćenje elektrostatskih (alt. vrećastih) filtera i odstranjenje i do 99 % pepela iz dimnih gasova (rade na principu elektrostatskog polja u kojemu se čestice električki nabijaju i sakupljaju na anodi), slika 3;



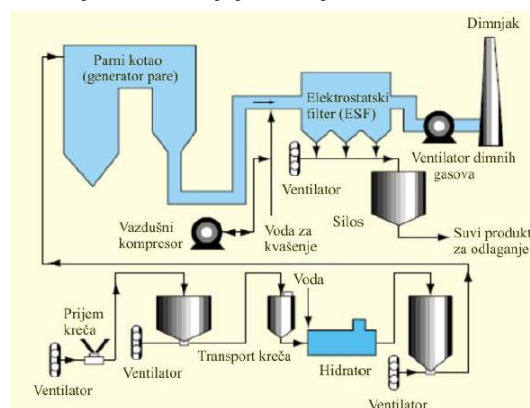
a) elektrostatski filteri (ESF)

b) vrećasti filteri (VF)

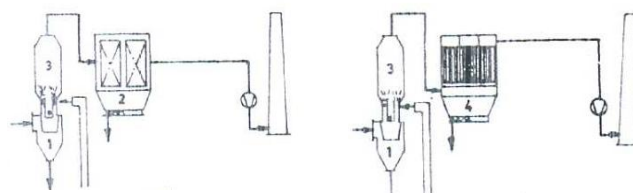
Sl. 3. Amplituda magnetne indukcije duž z-ose dobijena proračunom (puna linija) i mjerenjem na laboratorijskom modelu

- c) *tehnologije sa redukovanjem sumpornih oksida (odsumporavanje)*, najčešće sa mokrim postupkom odsumporavanja, kojim se iz dimnih gasova odstranjuje do 99 % SO_x (dimni gasovi reagiraju s raspršenom smjesom kalcijevog karbonata (krečnjak) i vode, pri čemu se stvara gips (kalcijev sulfat), koji se odstranjuje i koristi u građevnoj industriji), slika 4;
- d) *tehnologije sa redukcijom azotnih oksida (NO_x)*, prvo kroz primarne mjere tokom procesa sagorijevanja, što se postiže odgovarajućom konstrukcijom plamenika i postepenim dovođenjem vazduha i goriva, uz smanjenje maksimalne temperature u jezgri plamena i smanjenje koncentracije kiseonika u zoni sagorijevanja (količinu proizvedenog NO_x na taj se način može smanjiti na vrijednost manju od 300 mg/m³ (do 40 %), a zatim kroz sekundarne mjere za smanjenje emisije NO_x, koje se primjenjuju iza zone sagorijevanja, a što uključuje selektivnu nekatalitičku redukciju (SNCR) kojom se

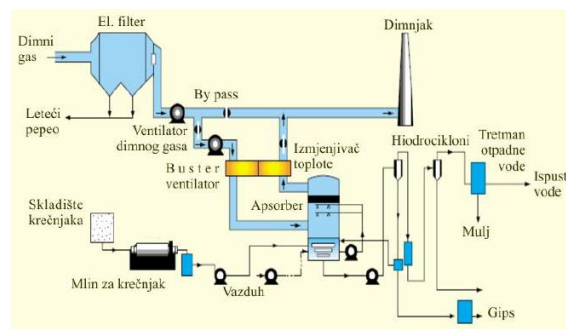
amonijak uvodi u generator pare na mjestu gdje vladaju temperature dimnih plinova od 850 do 900 °C, čime se postiže smanjenje emisije od oko 70 % (uvođenjem katalizatora ostvaruje se selektivna katalitička redukciju (SCR), kojom se smanjuju emisije NO_x i do 90 %);



a) suve metode (proces dodavanja suvog sorbenta - hidratirani kreč, Dry sorbent Injection Process - DSIP)



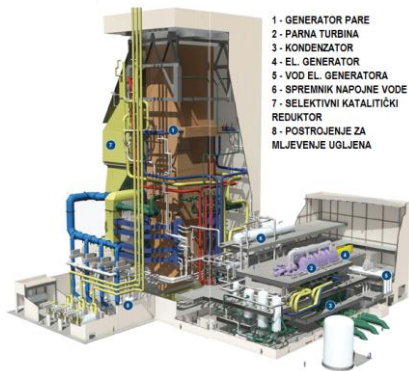
b) polusuve metode sa ESF/VF (1- sabirni sud, 2- ESF, 3- reaktor, 4- VF)



c) mokre metode (mokr proces sa krečnjakom - Wet Process with Limestone - WPL, alternativno sa by-passom)

Sl. 4. Tehnologije sa odsumporavanjem, [8] i [9]

- e) *tehnologije sa povećanjem termičkog iskorišćenja postrojenja*, počev od današnjih TEP na ugalj u radu, koja predstavljaju u većini slučajeva konstrukcije stare 20÷40 godina, sa podkritičnim parametrima pare (530÷540 °C i 14,0÷18,0 MPa) i sa stepenom termičkog iskorišćenja 33 do 39% (neostvareni projekt Lukovo Šugarje je predviđao SKD veći od 43%, dok zadnje izgrađene njemačke i danske elektrane na kameni ugalj ostvaruju maksimalne SKD od 47%, pri čemu najnovije konstrukcije elektrana na ugalj sa ultra-nadkritičnim parametrima pare (> 600 °C i > 30,0 MPa) predviđaju stupene korisnog dejstva veće od 50%, [7]-[9] i [15]), slika 5;



a) parni kotao sa nadkritičnim parametrima pare



b) demonstraciona termoelektrana klase 700 °C

Sl. 5. Prikaz elektrana na ugljal sa ultra-nadkritičnim parametrima pare (>600 °C i >30,0 MPa)

buduća postrojenja ostvarivati stupanj iskoristivosti 50÷60%);



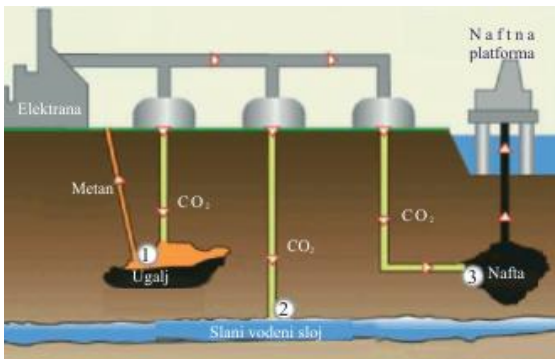
Sl. 6. Tehnologije sa kosagorijevanjem biomase i uglja

- f) *tehnologije sa dodatnim sagorijevanjem biomase*, koju čine različiti proizvodi biljnog i životinjskog svijeta (poput granja, piljevine, ostataka žetve ili berbe plodova, životinjski izmet, komunalni i industrijski otpad), neutralne sa stanovišta proizvodnje CO₂ (nastala uzimanjem CO₂ iz prirode, iako se dio CO₂ proizvodi tokom kultiviranja, berbe i transporta biomase ili materijala iz kojega je nastala, pri čemu se proces spaljivanja biomase s ugljem smatra prelaznom fazom u procesu zamjene fosilnih goriva i redukcije CO₂), pri čemu dosadašnja iskustva pokazuju da se može spaljivati do 10 % biomase s ugljem bez nepoželjnih efekata, a dalja istraživanja teže ka podizanju udjela biomase i do 50%, čime bi korišćenje biomase s tehnologijama izdvajanja i skladištenja CO₂ moglo osigurati čišćenje atmosfere od CO₂, slika 6;
- g) *tehnologija gasifikacije (rasplinjavanja) uglja*, koja po mnogima ima veliku perspektivu da nadomjesti današnje konvencionalne tehnologije spaljivanja uglja (koristi se u sklopu kombinovanog postrojenja gasne i parne turbine, pri čemu se ugljal ne spaljuje potpuno već se rasplinjava uz nedostatak kisika te u reakciji s vodom stvara sintetski gas bogat vodikom, danas postoje samo četiri postrojenja u svijetu koja koriste kombinovani ciklus s integrisanim rasplinjavanjem uglja za proizvodnju električne energije i SKD od 37÷45%, pri čemu neke procjene govore da će

- h) *tehnologije sa sagorijevanjem u fluidizovanom sloju*, sa tipovima ložišta: *Fluidized Bed Combustion - FBC*, koji se odvija pri atmosferskom pritisku, a u generatoru pare se stvara para pogodna za pogon parne turbine, *Pressurized Fluidized Bed Combustion - PFBC*, sa sagorijevanjem na povišenom pritisku, što poboljšava pogonske karakteristike FBC (u ovu grupu pripada i *Circulation Fluidized Bed Combustion - CFBC*, kod kojega fluidizirani sloj zbog velike brzine upuhivanja zraka cirkuliše te se odneseni materijal i gorivo odvajaju iz dimnih gasova i vraćaju u ložište), *Gasification Fluidized Bed Combined Cycle - GFBC*, koja se zasniva na PFBC tehnologiji, sa dodatim rasplinjačem radi stvaranja sintetičkog gasa, pri čemu se toplota rasplinjavanja koristi za proizvodnju pare za parnu turbinu, dok sintetički gas sagorijeva u gasnoj turbini (postrojenje ima vrlo visoki SKD od 57 do 59 %);
- i) *tehnologije sa izdvajanjem CO₂ iz dimnih gasova*, koje još nisu optimizirane za potpunu primjenu u TEP na ugljal, jer je njihov razvoj bio više usmjeren na dobijanje čistog CO₂ za industrijske potrebe nego na smanjivanje emisije CO₂ iz energetskih postrojenja (tipovi: postrojenje sa integrisanim rasplinjavanjem u kombinovanom ciklusu (IGCC) koristi ugljal i vodenu paru da bi proizvelo vodonik i ugljen monoksid (CO) koji se zatim spaljuju u gasnoj turbini kombinovanog postrojenja s parnom turbinom, radi proizvodnje električne energije (ako se IGCC postrojenje napaja kisikom umjesto vazduhom, dimni gasovi sadrže visokokoncentrični CO₂ u dimnim gasovima koji se lagano može odstraniti postupkom "pranja" u aminovoj otopini, za otprilike pola cijene u odnosu na postrojenje koje koristi sagorijevanja sa vazduhom; razvoj IGCC postrojenja koja za sagorijevanje koriste čisti kiseonik predviđa uključivanje reaktora za oksidaciju CO s vodom (Shift-reaktor), tako da će se nastali gas sastojati samo od CO₂ i vodonika, pri čemu prije sagorijevanja vodonika odvajati će se CO₂ iz smješe tako da će se za proizvodnju električne energije koristiti

kao gorivo samo vodonik, dok će se komprimirani CO₂ odlagati, tehnologija sagorijevanja s čistim kisikom (oxy-fuel) mogla bi se koristiti za obnavljanje postojećih postrojenja na ugljenu prašinu koja su okosnica proizvodnje električne energije u mnogim zemljama, pa time značajno doprinijeti smanjenju ispuštanja CO₂ u atmosferu), sa trenutnim SKD IGCC postrojenja od oko 45 %);

- j) *tehnologije geološkog skladištenja CO₂ (sekvencijacija)*, koja podrazumijeva odvajanje CO₂ te različite varijante za njegovo skladištenje duboko u zemljinoj unutrašnjosti s ciljem sprječavanja prodora u atmosferu (CO₂ se komprimira u napušteni rudnik ugljena iz kojega potiskuje CH₄ (metan) koji se može koristiti kao gorivo, CO₂ se skladišti pod tlakom u geološkom sloju zasićenom slanom vodom, CO₂ se komprimira u naftnu bušotinu poboljšavajući iscrpljivanje nafte), pri čemu su dosadašnja istraživanja pokazala da su prikazane tehnologije skladištenja ugljika tehnički izvodljive, a potrebno je uložiti napore da se dokaže njihova komercijalna isplativost za količine koje se proizvode u velikim energetskim i industrijskim postrojenjima ([11]-[15]), slika 7.



Sl. 7. Prikazi mogućeg skladištenja CO₂, [10]-[13]

B. Prednosti i nedostaci tehnologija "čistog" uglja

Razvoj tehnologija čistog uglja predstavlja odgovor na zahtjeve vezane za zaštitu životne sredine, posebno prema smanjenju CO₂ emisija.

Čišćenje uglja ispiranjem (*Washing Coal*) predstavlja već standardnu proceduru u razvijenim zemljama, čime se može pozitivno uticati na proces sagorijevanja i smanjenje emisija pepela i SO_x. Transportovani ugalj sa nesagorljivim mineralnim sadržajem i drugim štetnim sastojcima se na termoelekttranama dodatno čisti, slika 2. Nakon usitnjavanja na sekundarnoj drobilici, ugalj se uvodi u spororotirajući bubanj sa tečnosti veće gustine, koja omogućava da ugalj pluta, dok teži mineralni materijal tone na dno, odakle se dalje odvodi iz bubnja. Prečišćeni ugalj se zatim melje u mlinovima u finu prašinu, pogodnu za proces sagorijevanja u sprasenom stanju (klasično sagorijevanje).

Tehnologije prečišćavanja dimnih gasova na klasičnim termoelekttranama odvajanjem čvrstih čestica korištenjem elektrostatskih ili vrećastih filtera (slika 3), ugradnjom

postrojenja za odsumporavanje (ODG sistemi) i DeNOx postrojenja (primarne i sekundarne mjere), kao i povećanje termičke iskoristivosti postrojenja imaju više svoju primjenu u procesu ostvarivanja preduslova za produženi životni vijek postojećih postrojenja, [15]. Za prečišćavanje dimnih gasova iz parnih kotlova TEP koriste se *mehanički* i *elektrostatički otprašivači*. Mehanički otprašivači, koji imaju primjenu kod manjih kotlovskih postrojenja ili u kombinaciji sa elektrostatičkim otprašivačima, dijele se na *suve* (rade na principu dejstva centrifugalne i inercijalne sile) i *mokre* (sa kvašenjem površina na koje se čestice pepela lijepe). U suve otprašivače spadaju cikloni, multicikloni i žaluzinski otprašivači. Elektrostatički otprašivači (elektrofilteri) rade na principu korišćenja osobina električnog polja, slika 3.a. Kao najefikasniji otprašivači, oni se najviše i koriste kod TEP najvećih snaga. Prečišćavanje dimnih gasova elektrofilterima zasniva se na stvaranju neravnomjernog električnog polja visokog napona i koronarnog razređenja pri atmosferskom pritisku između elektroda koje se nalaze u kućištu. Pod pojmom koronarnog razređenja podrazumijeva se samostalno električno razređenje u gasu karakteristično za sistem elektroda sa nejednakim poljem, u kojem je odnos maksimalnog prema srednjem naponu veći ili jednak 4. U opštem slučaju, najčešće se razmatraju dva tipa filtera: *vrećasti filteri* (VF) i *pulsni filteri* (PF). Glavna razlika između ova dva tipa filtera je da kod vrećastog tipa tok dimnog gasa ide od unutrašnjosti ka spoljašnjosti filter-kese (slika 3.b), a kod pulsno filtera tok ide u obrnutom smjeru. Za velike količine dimnog gasa za kese filtera koriste se različit spektar modernih tipova materijala (tekstil, tkani fiberglas i sl.). Filter od tekstila služi za kontrolisano odvajanje čestica njihovom separacijom iz gasnog toka, prilikom prolaska gasa kroz tkaninu filtera od unutrašnjosti ka spoljašnjom dijelu ili obrnuto, pri čemu materijal filtera vrši sakupljanje prašine. Prašina na filteru formira sloj, što filtriranje čini još efikasnijim. Kada se čestice skupe na tkanini filtera moraju se odstraniti duvanjem u obrnutom smjeru. Skupljene i odstranjene čestice padaju u lijevke filtera silom zemljine težje. Lijeve se prazne odgovarajućim sistemom opreme. Za velike količine gasa potreban je specijalne konstrukcije sa većim brojem komora. Korišćenjem većeg broja komora dobija se i veća raspoloživost.

Svi postupci za smanjenje emisija sumpornih oksida nakon sagorijevanja uslovno se, prema kriterijumu dobijenog agregatnog stanja jedinjenja nastalih reakcijom aktivne materije i sumpor-dioksida, mogu podijeliti na suve, polu-suve i mokre procese (slika 4), s tim da se procesi sa raspršivanjem ponekad izdvajaju kao posebna grupa postupaka odsumporavanja. Sa aspekta obnavljanja aktivne materije, ovi postupci mogu biti regenerativni i neregnerativni. Kod *suvih metoda*, dimni gas dolazi u dodir sa suvim apsorbtom udvanim u konvektivni gasni kanal ispred zagrijača vode, u dimni kanal između kotla ili elektrofiltera ili u prvu sekciju elektrofiltera. Većina mokrih postupaka kao aktivnu materiju koristi alkalnu suspenziju, najčešće na bazi krečnjaka i kreča. Kod mokrih procesa, dimni gas dolazi u dodir sa apsorbujućom tečnošću ili suspenzijom. Odsumporavanje se

dešava u tečnoj fazi. U zavisnosti od sorbenta, ovi procesi stvaraju različite krajnje produkte. Kod metoda sa raspršivanjem, sorbent (kreč ili kalcijum-hidroksid) se raspršuje u obliku suspenzije vode u absorber. Tokom isparavanja vode u suspenziji, SO_2 reaguje sa sorbentom. Rezultujući produkt je smjesa fine granulacije, koja se skuplja u filteru. U većini termoelektrana koje se danas nalaze u eksploataciji, dimni gasovi se odsumporavaju putem *mokre metode* sa emulzijom krečnjaka kao sorbentom i gipsom kao završnim produktom. Tako se u Njemačkoj ovaj metod koristi za tretiranje dimnih gasova iz elektrana ukupnog kapaciteta većeg od 40.000 MW_{el} (što čini cca 90 % svih procesa odsumporavanja). Prema saznanjima, većina ovako proizvedenog gipsa koristi se u cementarama i gipsarama. *Polusuvu procesi* rade po principu apsorpcije raspršivanjem. Suspenzija se raspršuje u dimne gasove, kapljice apsorbuju gasovite komponente i istovremeno teče proces sušenja. Na kraju procesa se dobija osušena čestica. U odnosu na mokre postupke, kod polusuvih postupaka prečišćavanja dimnih gasova nije potrebno dogrijavanje dimnih gasova. Minimalna temperatura dimnih gasova je $120\text{ }^\circ\text{C}$. Time se obezbjeđuje dobijanje čvrstih produkata reakcije (bez tečne faze) i sprečava niskotemperaturna korozija. Dakle, u odnosu na vlažne postupke, kod polusuvog prečišćavanja dimnih gasova nisu potrebni uređaji za prijem i preradu otpadnih voda. Ovaj postupak se naziva i *postupkom sprej-spsorpcije*. Osnovni kriterijumi za polusuvu postupak su kvalitet raspršivanja sredstva za apsorpciju, površina kontakta kapljica sredstva za apsorpciju i gasne struje. Glavni problem polusuvih postupaka (sprej-apsorpcija) je način raspršivanja sredstva za apsorpciju. Često se javlja i taloženje čvrste faze na zidovima aparata i dimnih kanala. Primjenjuju se mlaznice za raspršivanje i rotacioni raspršivači. Ugaona brzina rotacionih raspršivača je 100 do 140 l/s. Za izdvajanje čvrstih čestica iz dimnih gasova koriste se elektrostatski filteri (ESF) i rukavni ili vrećasti filetri (VF). U cilju smanjenja eksploatacionih troškova vrši se recirkulacija čvrstog ostatka u procesu prečišćavanja. Daleko najviše postrojenja za odsumporavanje dimnog gasa u elektranama su mokri sistemi i većina njih radi u skladu sa mokrim procesom s krečnjakom, koji koristi suspenziju kreča kao sorbent, a proizvodi gips kao nusprodukt. Pri ovom procesu krečnjak (CaCO_3), koji se koristi kao sorbent, reaguje sa SO_2 i kiseonikom da bi stvorio gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$). Proces odsumporavanja se vrši u absorberu ("*Scrubber*"), gdje SO_2 iz dimnog gasa u reakciji sa reagensom u vidu suspenzije stvara kalcijum-sulfit i kalcijum-sulfat. Da bi se završilo oksidiranje u sulfat, dodatno se u absorber udvava vazduh (*forsirana oksidacija*). Suspenzija u absorberu se recirkuliše i dolazi do približno adijabatskog hlađenja dimnog gasa. Na taj način dimni gas prima određenu količinu vode koja ispari iz sorbenta. Prije upotrebe u procesu odsumporavanja dimnog gasa, krečnjak se drobi i priprema se njegova suspenzija za uvođenje u absorber. Kao što je prikazano na slici 4.b, dimni gas kruži iz elektrostatičkog filtera do izmjenjivača toplote. Dimni gas se hladi čistim gasom koji dolazi iz apsorbera. Ohlađeni dimni gas ulazi u absorber, gdje struji u smjeru suprotnom od toka strujanja

suspenzije. Istovremeno, dimni gas se hladi do temperature adijabatskog zasićenja. Reakcija odsumporavanja se odvija u apsorberu, pri čemu SO_2/SO_3 iz dimnog gasa i suspenzija reaguju i stvaraju kalcijum sulfit ($\text{CaSO}_3 \times \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) i kalcijum sulfat ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$). Razmatrani proces takođe eliminiše i kisele komponente u dimnom gasu, prvenstveno *HCl* i *HF*.

Postupci za smanjenje emisije azotnih oksida pri sagorijevanju ugljenog praha se mogu podijeliti u dvije grupe: *primarne*, koji u suštini predstavljaju modifikaciju procesa sagorijevanja i *sekundarne*, koji se odnose na prečišćavanje dimnih gasova. Primarni postupci su zasnovani uglavnom na sniženju temperature sagorijevanja i smanjenju koeficijenta viška vazduha (kao dva najvažnija faktora nastanka azotnih oksida), korišćenjem višestepenog dovođenja vazduha u ložište, recirkulacijom dimnih gasova niske temperature u gorionike ili jezgro plamena, višestepenim uvođenjem goriva i primjenom gorionika sa niskom emisijom azotnih oksida (tzv. "*Nisko NOx*" gorionici). Druga grupa postupaka zasniva se na preduzimanju određenih radnji na polju dimnog gasa (mjere nakon sagorijevanja ili sekundarne mjere), u svrhu odstranjivanja NOx između zone sagorijevanja u kotlu i dimnjaka, a nakon što dođe do stvaranja NOx . Od sekundarnih mjera, uglavnom su procesi SNCR (selektivna nekatalitička redukcija) i SCR (selektivna katalitička redukcija) dostigli visok tehnološki status razvoja, kao i široku primjenu. Drugi procesi, poput mokrih procesa odstranjivanja NOx ili proces elektronski snop ("*Electron Beam - EB*"), nisu pronašli svoju praktičnu primjenu. *Selektivna katalitička redukcija (SCR)* predstavlja proces koji uz pomoć amonijaka razlaže okside azota na azot i vodenu paru. Proces se naziva selektivnim, jer se istovremeno ne odvajaju i ostali gasovi (npr. SO_2 i/ili NH_3). Temperatura procesa treba biti pažljivo kontrolisana, s ciljem obezbjeđenja uslova odvijanja reakcije u pravom smjeru. Naime, u slučaju preniske temperature NOx prelazi u NH_3 i obratno. Efikasnost ovog postupka je oko 50 %, potrošnja energije manja od 0,2 % od ukupno proizvedene energije. Problemi koji se javljaju kod korišćenja ovih postupaka su ispuštanje amonijaka, velika osjetljivost na uslove rada, manja efikasnost, veći potrošak hemikalija i stvaranje N_2O . Prednosti ovog postupka u odnosu na onaj sa katalizatorom su jednostavnost, manji zahtjevi prostora, te manji operativni troškovi. *Selektivna nekatalitička redukcija (SNCR)* se ugrađuje za redukciju sadržaja NOx , u cilju osiguranja emisije prema lokalnim zahtjevima. SNCR sistem se isporučuje uz kotao. Selektivna nekatalitička redukcija (SNCR) predstavlja proces zasnovan na redukciji oksida azota amonijakom u homogenoj reakciji gasa i na visokoj temperaturi. Prilikom glavne reakcije, oksidi azota se pretvaraju pomoću NH_3 u azot i vodenu paru. Traženi opseg temperature za efikasnu eliminaciju NOx veoma je uzak, a optimalna temperatura je $950\text{ }^\circ\text{C}$. Snižanjem temperature rapidno opada brzina reakcije homogenog gasa, a time i stepen redukcije NOx . Na temperaturama iznad optimuma dolazi do porasta nivoa oksidacije NH_3 uz stvaranje NO , što na sličan način dovodi do smanjenja efikasnosti odstranjenja NOx . Amonijak, kao redukujući agens, skladišti se u tečnoj formi pod pritiskom ili kao 25 % rastvor NH_3 (nije pod pritiskom). Nakon isparavanja

redukujućeg agensa, dodaju mu se vazduh ili para, a rezultujuća smjesa (udio $\text{NH}_3 < 5\%$) se tada ubrizgava u kotao. S jedne strane, ključno je da se ubrizgavanje izvede u okviru traženog temperaturnog opsega, dok je s druge strane ključno da se osigura efikasna i stalna distribucija redukujućeg agensa u protoku dimnog gasa. SNCR proces je sam po sebi prilično jednostavan, ali njega komplikuje činjenica da se pozicija optimalnog temperaturnog opsega mijenja u skladu sa opterećenjem kotla. Pored toga, neregularnosti (disbalansi) temperature i koncentracije NO_x javljaju se duž kotla. Zato je obično neophodno obezbijediti veći broj nivoa ubrizgavanja na relativno velikoj površini. S druge strane, kao neophodno pojavljuje se potreba dodatne podjele svakog nivoa na veći broj polja, svako sa posebnim mjerenjem NH_3 . Ovakve karakteristike procesa stvaraju visok nivo kompleksnosti kod sistema mjerenja i regulacije procesa. Pošto se u praksi rijetko pokazuje da je moguće optimalno podesiti i uskladiti sve ove faktore, efikasnost odstranjivanja NO_x koja se može postići sa SNCR procesom često je ograničena na srednje vrijednosti. Jedan problem sa SNCR procesom je pojava poznata kao "iskliznuće amonijaka". Udio nekonvertovanog amonijaka raste u skladu sa sljedećim uslovima: padom temperature ubrizgavanja ispod optimalne proces ubrizgavanja je nestalniji, odnosno što je ubrizgavanje manje prilagođeno asimetričnim temperaturama i koncentraciji NO_x veća je namjeravana efikasnost odstranjenja NO_x . Nakon pojave iskliznuća amonijaka, javljaju se dodatni problemi vezani za ostatak toka dimnog gasa. Problemi sa prljanjem moraju se očekivati u zagrijaču vazduha, jer se pomoću SO_3 i vlage iz dimnog gasa NH_3 kondenzuje u hladnijim dijelovima u obliku amonijum-vodonik-sulfata. Kao rezultat obično ljepljivog taloga, povećava se prljanje letećim pepelom. Posljedica toga je korozija i potreba da se zagrijač vazduha češće čisti (i da se voda za pranje prerađuje i odstranjuje). Povećanje NH_3 u pepelu može da ograniči upotrebljivost samog pepela ili da iskomplikuje način postupka s pepelom (npr. problemi sa neugodnim mirisom nakon vlaženja). Konačno, porast NH_3 može kao rezultat da ima korespondentno visok sadržaj amonijaka u vodi za ispiranje postrojenja ODG. Teško je dati neku generalnu ocjenu o efikasnosti odstranjenja NO_x koja se može postići putem SNCR procesa. U svakom slučaju, neophodni troškovi i opisani posljedični problemi povećavaju se sa većom traženom efikasnosti odstranjenja NO_x . Sa povećanjem efikasnosti takođe raste i specifična potrošnja NH_3 i znatno je veća nego kod SCR procesa. Kao opšte načelo može se reći da je pri molarnom odnosu $\text{NH}_3/\text{NO}_x=1$, moguće postići redukciju NO_x do 50 % (u zavisnosti od početne vrijednosti NO_x , kvaliteta ubrizgavanja i miješanja, i sl.). Veće efikasnosti redukcije, do 80 % teorijski su moguće, uz povoljne uslove, ali sa nesrazmjerno velikim molarnim odnosom $\text{NH}_3/\text{NO}_x=2$ do 3 i korespondentno visokim porastom NH_3 . Iz ovih razloga, efikasnost redukcije NO_x kod primjene SNCR procesa u elektranama treba ograničiti na srednje vrijednosti od cca 50 %.

Azot u dimnim gasovima po izlasku iz SCR reaktora prolazi kroz uređaje za smanjenje emisija, u kojima se uklanja iz dimnih gasova, te na izlasku iz dimnjaka ostaju njegove

zanemarljive količine. Po izlasku iz SCR reaktora, dimni gasovi prvo prolaze kroz predgrijač vazduha. Zbog sniženja temperature dimnih gasova dolazi do formiranja azotnog bisulfata (reakcija preostalog azota i SO_3 nastalog oksidacijom SO_2 u katalizatoru), koji se taloži na stjenkama uređaja. Očekuje se uklanjanje 20 do 25 % preostalog azota u formi naslaga azotovog bisulfata. Nakon predgrijača vazduha, dimni gasovi prolaze kroz elektrostatski filter (ESF), u kojem se iz dimnih gasova uklanja prašina (pepeo). S prašinom se uklanja i dio preostalog azota, koji se veže za čestice i to oko 80 %. Garantovani udio azota u pepelu će biti niži od 90 ppm, čime se ne očekuje negativni utjecaj na mogućnosti njegovog zbrinjavanja ili upotrebe u cementnoj industriji. Nakon ESF-a, azot iz dimnih gasova se, zajedno sa sumponim oksidima i prašinom spira u postrojenju za mokro odsumporavanje. U dimnim gasovima, koji izlaze iz dimnjaka, tako ostaje zanemarljiva količina azota. Emisija gasovitog azota u vazduh može se javiti i iz sistema iskrcavanja i skladištenja vodenog rastvora azopta. Međutim, ova emisija je eliminisana kroz način iskrcavanja primjenom cijevi za povrat para, te opremanjem skladišnog spremnika apsorpcijskim spremnikom napunjenim demineralizovanim vodom za apsorpciju ispuštenih para azota.

Posmatrajući pravce razvoja energetskih postrojenja tokom njihove eksploatacije, lako se može uočiti tendencija povećanja radnih parametara pare. Osnovni razlozi za ovo proizilaze iz činjenice da se povećanjem radnih parametara povećava i SKD, jer je termodinamički ciklus efikasniji pri povećanim početnim parametrima pare. Za unaprijeđena USC postrojenja (projekti sa ultra super-kritičnim parametrima pare) za sagorijevanje uglja u letu predviđa se povećanje SKD na vijednosti preko 50%, slika 5. Postizanje visokih parametara uslovljeno je ugradnjom novih konstruktivnih materijala koji imaju bolje osobine na visokim temperaturama. Iako ti materijali danas još uvijek imaju znatno veću cijenu koštanja u odnosu na dosada korištene, ekonomska opravdanost izgradnje USC postrojenja postiže se kroz smanjenu potrošnju uglja po jednom kWh električne energije. Smanjena potrošnja uglja po kWh električne energije praćena je i manjom emisijom CO_2 i drugih štetnih gasova, što danas ima veliki značaj koji se ogleda u doprinosu očuvanju životne sredine i smanjenju efekta staklene bašte. Sam proces generisanja pare u oblasti ultra super-kritičnih parametara, sa termodinamičkog stanovišta, je manje kompleksan nego proces koji se odvija neposredno u području subkritičnih parametara bliskom kritičnoj tački, jer se sa "udaljavanjem" od kritične tačke postiže veća uravnoteženost termodinamičkih veličina vode, pri kontinuiranom prelazu iz tečne faze u stanje pare. Ovakvim režimom ublažavaju se rizici od pregrijavanja materijala cijevi koji su izraženi upravo u zoni visokih specifičnih toplota, odnosno u području bliskom kritičnoj tački. Ta činjenica predstavlja još jedan u nizu razloga koji opravdavaju razvoj ovih postrojenja. Veću prepreku u daljem razvoju, uslovno rečeno, može predstavljati nedostatak materijala za konstrukciju, pa se uporedo razvijaju i novi konstrukcioni materijali koji mogu da zadovolje sve potrebne zahtjeve pri parametrima ranga 700-760 °C pritiska 35-38,5 MPa.

Tehnologije suspaljivanja biomase predstavljaju direktno suspaljivanje u velikim postrojenjima na uglj i trenutno predstavljaju najefikasnije korišćenje biomase za proizvodnju električne energije, slika 6. Efikasnost iskorištavanja biomase iznosi 35 do 45 %. Međutim, u većini slučajeva udio biomase je ograničen na otprilike 5÷10 %. Najveći problemi javljaju se vezano uz pepeo nastao sagorijevanjem. Iz toga razloga razvijene su tehnologije koje omogućavaju izbjegavanje ovakvog onečišćenja, no trenutno su ovakve tehnologije još uvijek dosta skupe. Pri indirektnom suspaljivanju vrši se rasplinjavanje biomase prije suspaljivanja s ugljem, dok se kod paralelnog suspaljivanja biomasa sagorijeva u odvojenom kotlu, ali koristeći paru proizvedenu unutar glavnog parnog kotla u postrojenju. U slučaju proizvodnje električne energije troškove ulaganja treba razgraniti na postrojenja koja proizvode električnu energiju isključivo iz biomase, te na postrojenja koja proizvode električnu energiju suspaljivanjem biomase sa fosilnim gorivima. Pri tome, postrojenja za proizvodnju električne energije isključivo iz biomase zahtijevaju složenije kotlove, što povećava investicijske troškove. Glavna komponenta varijabilnih troškova u postrojenjima za proizvodnju električne energije je trošak goriva (biomase), čak i u slučaju inustrijskog otpada. Uzimajući u obzir veliku potrošnju biomase u ovakvim postrojenjima, uticaj snabdijevanja je prilično velik, što implicira i veliki uticaj troškova prijevoza na konačnu cijenu biomase. Za postrojenja koja koriste suspaljivanje, trošak ulaganja svodi se na trošak opreme koja je namijenjena pripremi biomase za ubrizgavanje u kotao, te na prepravljavanje postojećih kotlova i priključnih elemenata. Ostala oprema jednaka je kao i u tradicionalnim postrojenjima. Ova vrsta proizvodnje električne energije omogućava veću instalisanu snagu i do 30% veću efikasnost u odnosu na 23% u specifičnim ili inustrijskim pogonima.

Gasifikacija (rasplinjavanje) uglja predstavlja postupak nepotpunog sagorijevanja pomoću reakcionih sredstava gasovitog oblika, pri čemu se proces gasifikacije može da izvodi podzemno (u sloju) i nadzemno (u gasogeneratorima). Svi ugljevi se mogu podvrgnuti procesu gasifikacije, pri čemu na kvalitet utiču od starost uglja, sadržaj vlage, ponašanje uglja pri zagrijavanju, topivost pepela, sadržaj sumpora, itd. Sredstva za gasifikaciju su vazduh, kiseonik, vodena para, vodonik, a dobijeni produkti gasifikacije je gas (visokokalorični prirodni gas 33 do 37 MJ/m³, srednjekalorični prirodni gas 15 do 19 MJ/m³ i niskokalorični gas 5 do 10 MJ/kg). Podzemna gasifikacija uglja, autotermički proces, obuhvata proces degasacije, odnosno pirolize i samu gasifikaciju. Ti procesi nastaju kao rezultat uticaja visoke temperature i upravljanja sagorevanja uglja pri dovođenju sredstava za gasifikaciju, koja je najčešće vazduh, vodena para sa vazduhom u određenom odnosu, te vazduh ili vodena para obogaćeni kiseonikom, ili pak sam kiseonik. Danas uglavnom egzistiraju dve poznate metode PGU: metoda bez podzemnih prostorija, koja se zasniva na bušenju bušotine sa površine kroz slojeve i provođenjem gasifikacije dovođenjem gasifikujućeg agensa kroz bušotinu, odnosno kanala, a odvođenjem produkta gasifikacije kroz produkcionu bušotinu,

kao i metode iz podzemnih prostorija u kojoj se sloj, preostao nakon izrade sigurnosnih stubova, gasificira korišćenjem izrađenih prostorija. Prva grupa metoda (bušotinska PGU) je uglavnom aktuelna za korišćenje vanbilansnih rezervi uglja, a druga za gasifikaciju zaostalih sigurnosnih stubova, odnosno otkopnih ostataka bilansnih rezervi, posle završene jamske eksploatacije. Od bušotinskih metoda obično su u primjeni filtraciona, kanalna i protočna metoda (uglavnom je rasprostranjena filtraciona metoda, nakon prethodnog zapaljenja reakcione zone). U eksperimentima izvedenim u SAD-u primenjuje se kanalna metoda, s tim, da se kanali zapaljuju filtracionom metodom. Podzemna gasifikacija uglja, karakteriše se stepenom iskorišćenja uglja, koji predstavlja odnos gasifikovanog uglja prema ukupno raspoloživoj količini uglja za PGU. Termička efikasnost procesa je definisana odnosom toplotne moći dobijene gasne smeše prema toplotnoj moći uglja, iz koga je nastala smeša, svedeno na ekvivalentne dimenzije, što zavisi od vrste gasifikujućeg agensa, njegovog pritiska i temperature, te osobine uglja za gasifikaciju, dubine zaleganja sloja, vlažnosti uglja, kao i tektonskih uslova u ležištu. Kada se radi o povećanju efikasnosti konverzije hemijske energije goriva u toplotnu energiju, uz ostvarenje što bolje zaštite životne sredine i ekonomičnije proizvodnje, prisutna su dva osnovna pravca razvoja i to kroz usavršavanje klasičnih tehnologija sagorijevanja sprasenog goriva (*Pulverized Coal - PC*) i razvoj novih čistih tehnologija sagorijevanja uglja (*New Clean Coal Combustion*).

Paralelno sa usavršavanjem klasičnih tehnologija sagorijevanja sprasenog goriva i tehnologija za prečišćavanje dimnih gasova od čestičnih i gasovitih influenata iz ovih postrojenja, u razvoju je niz novih čistih tehnologija za sagorijevanje uglja koje, u odnosu na klasičnu tehnologiju sagorijevanja uglja, potencijalno nude veću energetsku efikasnost, bolje ekološke i ekonomske efekte. Pored razlika u stepenu efikasnosti, stepenu emisije štetnih materija, potrošnji vode, količinama otpadnih čvrstih materija, investicionih troškova i troškova održavanja, veličine, fleksibilnosti u eksploataciji, nove tehnologije se razlikuju i u stepenu razvoja i stepenu komercijalne primijene. Sagorijevanje uglja u fluidizovanom sloju pod atmosferskim pritiskom, sagorijevanje uglja u fluidizovanom sloju pod pritiskom većim od atmosferskog (PFBC) ili čak sa nadkritičnim parametrima i sagorijevanje u cirkulirajućem fluidizovanom sloju (CFBC) se danas širom svijeta smatraju kao komercijalno raspoložive tehnologije. Tehnologije sagorijevanja u fluidizovanom sloju kao takve imaju prednost jer koriste čvrsta goriva niže toplotne moći i veće granulacije zrna u odnosu na tehnologije sagorijevanja u vidu ugljene prašine. Takođe, kod fluidne tehnologije mogu da se koriste abrazivni ugljevi ili ugljevi sa visokim sadržajem pepela. Sagorijevanje uglja u fluidizovanom sloju (lebdeći sloj) predstavlja prelazni proces između sagorijevanja uglja u sloju i sagorijevanja uglja u letu. Tehnologije od kojih se puna konkurentnost klasičnoj tehnologiji sagorijevanja uglja očekuje u prvoj polovini 21-og vijeka su sagorijevanje u fluidizovanom sloju (*Fluidized Bed Combustion - FBC*) i

integrirani gasifikacioni i kombinovani ciklusi (*Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC*).

Tehnologije, čija se primjena u velikoj energetici ne očekuje prije 2020. godine, obuhvata gorivne ćelije i magnetno-hidrodinamički generator (MHD). Tehnologija IGCC se zasniva na gasifikaciji uglja i dobijanju sintetičkog gasa koji sagorijeva u komori gasne turbine. Osnovne komponente postrojenja su gasifikator, postrojenje za prečišćavanje sintetičkog gasa, gasna turbina sa komorom za sagorijevanje, kotao utilizator i parno-turbinsko postrojenje. Uz danas ostvarenu efikasnost kombinovanog gasno-parnog ciklusa sa prirodnim gasom od $52 \div 58$ % i efikasnost gasifikacionog procesa od $75 \div 90$ %, komercijalno je ostvarena efikasnost IGCC postrojenja od preko 42 %. IGCC tehnologija sa kvalitetnijim ugljem se nalazi u fazi dokazivanja potencijala na postrojenjima srednje snage (primjeri: Tampa Electric, USA, 260 MWe, 1996.; SUV/EGT, Češka, 250 MWe, 1996.; Buggenum, Holandija, 2x250 MWe, 1998.; Puertolano, Španija, 300 MWe, 2000.), dok sa kod lignita radi o malim snagama (primjeri: Schwarze Pumpe, Njemačka, 40 MWe, 1996.; IBIL/Sanghi, Indija, 60 MWe, 1998.). Njeno uvođenje sa komercijalnim garancijama na tržište tehnologija se očekuje do 2020. godine. Puna konkurentnost tehnologije IGCC klasičnoj i drugim novim tehnologijama očekuje u trećoj dekadi 21-og vijeka.

Sekvestracija (*sequestration*, [10]-[13]) ili geološko skladištenje CO₂ (*geological storage of CO₂*, [14]) je jedna od tehnologija čistog uglja, koja podrazumijeva skladištenje već odvojenog CO₂ duboko u zemljišnjoj unutrašnjosti, a s ciljem sprečavanja zagađenja atmosfere, slika 7. Slika pokazuje različite mogućnosti skladištenja: sabijanje CO₂ u napušteni rudnik uglja iz kojeg potiskuje metan (CH₄) koji se može koristiti kao gorivo, skladištenje CO₂ pod pritiskom u geološkom sloju zasićenom slanom vodom i sabijanje CO₂ u naftnu bušotinu, poboljšavajući tako njenu eksploataciju, [13]-[19]. Iako su ove tehnologije primjenljive, neophodno je u narednom periodu postići i njihovu komercijalnu isplativost za količine proizvedene u velikim energetske-procesnim postrojenjima. Komercijalnost je već dokazana kod poboljšavanja vađenja nafte (Zapadni Teksas, Great Plains Synfuels Plant u Sjevernoj Dakoti i sl.). Uz postizanje komercijalne isplativosti, neophodno je sljedećim istraživanjima dati i odgovore na pitanja ostvarivanja potrebne sigurnosti i trajnosti odlaganja

IV. ČISTE TEHNOLOGIJE U PROIZVODNJI KORISNIH OBLIKA ENERGIJE U REPUBLICI SRPSKOJ

Uticaj energetike na održivi razvoj je najizrazitiji kroz ekonomski aspekt održivosti. Kontinuirani ekonomski rast moguć je jedino kada je postignuta dovoljno sigurna snabdjevenost električnom energijom uz prihvatljive cijene kako za domaćinstva tako i za industrijska preduzeća. Današnja industrija u Rep. Srpskoj odnosno BiH kao cjelini zavisna je dosta od fosilnih goriva, a najviše od uglja. Povećanje energetske efikasnosti podrazumeva korištenje ukupne toplotne energije u okviru energetske sistema na različitim raspoloživim temperaturnim nivoima, za

proizvodnju korisnog mehaničkog rada ili toplote pare za tehnološke procese ili grijanje, uz minimalno odvođenje toplote u okolinu kao otpadne toplote. Ovakav pristup se najčešće realizuje u tzv. kombinovanim ciklusima za istovremenu proizvodnju korisnog mehaničkog rada odnosno električne energije sa jedne i toplotne energije sa druge strane, tj. u termoelektranama toplana (TE-TO). Primjena kombinovane proizvodnje toplotne i električne energije omogućuje uštedu primarne energije u odnosu na odvojenu proizvodnju toplotne i električne energije. U Republici Srpskoj prvi planirani (ali i nerealizovani) je projekat rekonstrukcije toplane u Doboju u TE-TO Doboj instalisane snage 34,8 MWe i 27,5 MWt. Imajući u vidu izraženu tendenciju korišćenja obnovljivih izvora energije u zemljama EU, potencijalno značajne količine otpadaka drvne industrije raspoložive na području BiH i pozitivna iskustva u korišćenju biomase kao osnovnog ili dopunskog goriva u sagorijevanju sa kotlovima manje snage, nameće se i potreba analize mogućnosti korišćenja biomase kao dodatnog goriva u TE-TO Doboj.

Prema planu proizvodnje drvnih sortimenata (JP „Šume Republike Srpske“ a.d. Sokolac), plan proizvodnje ogrijevnog drveta za 2017. godinu iznosi 980.749 m³ ogrijevnog drveta. Na osnovu ranijih anketa koje su provedene u urbanom i ruralnom dijelu Republike Srpske, procjenjuje se da će potrošnja ogrijevnog drveta u 2017. godini, preračunato u energiju, iznositi oko 16,7 PJ. Većina potrošnje u domaćinstvima se odnosi na potrošnju ogrijevnog drveta (primarna čvrsta biomasa), dok se procjenjuje da se manji dio troši kao biomasa (drvni i biljni otpaci). Ipak, podaci o proizvodnji i potrošnji ogrijevnog drveta i drvnog otpada, moraju se uzeti s rezervom, najprije zbog nepouzdanosti podataka o proizvodnji drvnog otpada. Posmatrajući energetske vrijednosti koje se dobije sagorijevanjem ogrijevnog drveta, vidi se da čak i pri niskom stepenu iskorišćenja (65 %), ovakav rezultat predstavlja značajan energetske podatke, tako da se u vođenju energetske politike u Republici Srpskoj mora imati u vidu na koji način se u budućnosti planira vršiti toplifikacija. Značajnije korišćenje biomase u vidu industrijskih drvnih i biljnih otpadaka i drveta za proizvodnju toplotne energije je prisutno kod toplana u Banja Luci (kotlovnice „Starčevica“ i „Kosmos“, nova kotlovnica u izgradnji na lokaciji postojeće toplane Banja Luka), Prijedoru, Sokocu, Palama i Gradišci, [19].

U sektoru daljinskog grijanja grije se oko 40 hiljada stanova ukupne površine oko 2,3 miliona m² i 460 hiljada m² poslovnog prostora, [19]. Isključivo se vrši isporuka toplote za grijanje prostora i nema snabdjevanja potrošnom toplom vodom. Kao primarno gorivo koriste se mazut, ugalj, prirodni gas i drvni otpad i drvo. Kao primarni energent najzastupljeniji je mazut sa ukupnim učešćem od 40%. U odnosu na prethodnu godinu, gdje je učešće mazuta bilo 42%, u 2017. godini će doći do daljeg smanjenja korišćenja ovog energenta u korist drvnog otpada i drveta. Osnovni nosioci toplifikacije u Republici Srpskoj su toplane, organizovane kao javna preduzeća i trenutno u Republici Srpskoj uslugu daljinskog grijanja pruža 13 toplana sa ukupnom instalisanom

snagom od 406,7 MW. Pored 13 javnih toplana, u sistem snabdijevanja je uključena i TE „Ugljevik“ koja obezbjeđuje toplotnu energiju za potrebe Ugljevika. Djelatnost distribucije i snabdijevanja toplotnom energijom nije razdvojena od proizvodnje. Predviđeno je da ukupna bruto proizvedena toplota za grijanje u 2017. godini iznosi 1.761 TJ od čega će toplane proizvesti 1.731 TJ, a TE Ugljevik za grijanje grada Ugljevika 30 TJ. Gubici u prenosu i distribuciji toplote iznose 297 TJ, a sopstvena potrošnja u toplanama je 84 TJ. Finalna potrošnja toplotne energije je 1.380 TJ, od čega industrija 30 TJ, domaćinstva 1.032 TJ i ostali 318 TJ, [19].

Ukupna finalna potrošnja energije u Republici Srpskoj u 2017. godini planirana je u iznosu od oko 50 PJ, [19]. Treba imati u vidu činjenicu da osim niza aproksimacija i procjena koje su korišćene pri izradi energetske bilansa Republike Srpske za 2017. godinu, čak i broj stanovnika (sa svim ratnim i posleratnim uticajima) predstavlja stvar procjene kroz dugi niz godina, mora se uvažiti realna potreba da se sa obezbjeđenjem pouzdanijih ulaznih podataka u narednom periodu vrše korekcije bilansnih veličina (rebalansi).

V. ZAKLJUČAK

Održivi razvoj na principima ekonomskog rasta uz imperativ očuvanja okoline i uvažavanja socijalnog aspekta, suština je energetske i razvojne politike Europske unije. Rastuće cijene energije i ovisnost od uvoza energije ugrožavaju stabilnost isporuke energije, kao i konkurentnost Europe. Osim toga, negativni uticaji na okolinu i postepeno iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva, ključni su problemi u energetici EU danas. Dodatni problem je imperativ smanjenja emisija, kao i borba protiv klimatskih promjena. Zbog toga centralni ciljevi energetske politike EU su: stabilnost snabdijevanja (donosi smanjenje ovisnosti od uvoza energenata), konkurentnost (omogućava ekonomski rast) i održivost (omogućava očuvanje okoline i socijalnu prihvatljivost. Reforma elektroenergetskog sektora BiH kroz implementaciju strateških projekata, koji imaju za cilj obezbjeđenje visokog kvaliteta univerzalne usluge isporuke energije i snabdijevanja i zaštite krajnjih kupaca tj. potrošača, stvorice preduslove za regionalnu saradnju na energetskom tržištu u skladu sa Ugovorom o Energetskoj zajednici Jugoistočne Evrope. Iako je trenutna prednost Republike Srpske suficit električne energije, postepena i planirana liberalizacija tržišta energije će ukinuti privilegije monopolskog položaja, a uvesti oštru konkurenciju tržišnog nadmetanja koja ne trpi statične i neprilagodljive sisteme, o čemu će se morati voditi računa u budućnosti. Politika očuvanja klime pretpostavlja radikalno smanjenje emisija CO₂ i ostalih uticaja na okolinu. Zbog toga se, osim do sada korištenih ograničenja koja proizlaze iz »energetsko – tehnološko-lokacijskih« karakteristika postrojenja, uvodi i dominantno ograničenje - kumulativno pravo na emisije stakleničkih gasova koje ima silazni karakter. Može se očekivati da će do 2030. godine prava na emisiju stakleničkih gasova biti najmanje prepolovljena u odnosu na početnu 1990. godinu, što će uticati na strukturne promjene u proizvodnji i potrošnji energije. Obaveze radikalnog smanjenja emisija CO₂

i drugih stakleničkih gasova zahtijevat će povećanje korištenja nefosilnih goriva, prije svega obnovljivih izvora kao što su voda, vjetar, sunce, biomasa, te povećanje energetske efikasnosti i primjenu novih tehnologija. Energetska efikasnost je posebno potencirana kao ekonomski najefektivniji način da se smanje emisije, poboljša energetska stabilnost i konkurentnost, obezbjedi dostupnost energije za potrošače, kao i povećana zaposlenost. Energetski sektor u Republici Srpskoj i BiH u cjelini ima značajan razvojni potencijal. Republika Srpska i BiH trenutno u regiji su rijetki primjeri cjelina koje imaju pozitivan elektroenergetski bilans. Neadekvatan institucionalni i pravni okvir, politička nestabilnost, nedefinisane procedure autorizacije za izgradnju i odabir investitora, uz poznati problem komplikovanih i dugotrajnih procedura za dobivanje velikog broja dozvola i saglasnosti, predstavljaju prepreku značajnijim ulaganjima u energetski sektor u Republici Srpskoj i BiH u cjelini. Treba istaći i da BiH značajno kasni u ispunjavanju obaveza preuzetih potpisivanjem međunarodnih ugovora i sporazuma. Ugovor o energetskoj zajednici predviđa kreiranje pravnog okvira za uspostavljanje slobodnog energetskeg tržišta, promociju investicija u energetski sektor, te pomoć energetskom sektoru zemalja u tranziciji. Sporazum o stabilizaciji i pridruživanju (SAA) također zahtijeva usvajanje europskih direktiva i standarda vezanih za energetiku. Razvoj MH Elektroprivreda Republike Srpske, sa akcentom na buduću proizvodni portfolio kompanije, treba biti trasiran uzimajući u obzir navedene ciljeve EU i pravno naslijeđe (stečevinu) EU, te uvažavajući polazno i buduće tehnološko, ekonomsko, pravno-regulatorno i društveno političko stanje u Republici Srpskoj, kao i okvirne stavove vezane za BiH. Pri tome je posebno važno iskoristiti vlastite energetske resurse i potencijale raspoložive u Republici Srpskoj kao način za razvoj privrede, za rast zapošljavanja i poboljšanja socijalnih prilika.

Polazne analize na osnovu prethodnih sagledavanja upućuju da je za MH Elektroprivreda Republike Srpske optimalan i realan razvojni scenarij sa uključenim miksom obnovljivih izvora energije (hidro, vjetar, sunce, biomasa, geotermalna energija i sl.) i zamjenskih i modernizovanih elektrana na domaći ugalj. Takav miks podrazumijeva optimizirane udjele pojedinih OIE i elektrana na ugalj u funkciji najnižih troškova elektroenergetskog sistema, kao i u funkciji drugih ciljeva koji se odnose na ekološki aspekt (rast obnovljivih, rast efikasnosti, smanjenje emisija) i sigurnost snabdijevanja i energetske nezavisnost. Energetska efikasnost postala je jedna od ključnih tema današnjice. Uštede energije kao posljedica efikasnijeg korištenja energenata, ima značajan uticaj na ekonomsko-finansijski aspekt poslovanja kompanija, ali i život potrošača. Povećanje energetske efikasnosti doprinosi smanjenju emisije stakleničkih gasova (prevažodno CO₂), pa su efikasnija proizvodnja i racionalnija potrošnja energije zapravo ključne mjere u borbi protiv globalnog zagrijavanja i klimatskih promjena. Povećanje energetske efikasnosti treba sagledati i u kontekstu sigurnosti snabdijevanja energijom, kao i očuvanja energenata za buduće generacije, odnosno u funkciji održivog razvoja. EU potencira

energetsku efikasnost kao ekonomski najefektivniji način da se smanje emisije, poboljša energetska stabilnost i konkurentnost, dostupnost energije za potrošače, kao i da se poveća zaposlenost. EU planira da energetsku efikasnost ugradi u sve relevantne politike, uključujući i provođenje edukacije i treninga kako bi se promijenile navike spram 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 sa unaprijeđenim lakovodnim reaktorima, nuklearne elektrane sa visikotemperaturnim reaktorima, nuklearne elektrane sa 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.

LITERATURA

- [1] Z. Milovanović, S. R. Dumonjić-Milovanović, "Energetska efikasnost kogeneracijske proizvodnje energije i ograničenja u Republici Srpskoj", ENEF, Banja Luka, 2015., str. 26-39
- [2] 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.
- [3] Z. Milovanović, „Mogući rizici tokom projektovanja, izgradnje i eksploatacije termoenergetskih postrojenja“, *EEE - Energija, ekonomija, ekologija*, List SE, Broj 1-2, Godina X, 2008., str. 046-052
- [4] Đ. Bašić i drugi, „Nacionalni program energetske efikasnosti - mogućnost korišćenja gasnih motora za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije“, Novi Sad, 2003., 47 str.
- [5] J. Bugge, R. Blum, „High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives“, www.dongenergy.com/SiteCollection/Documents/NEW%20Corporate/PDF/Engineering/45.pdf, 15 str.
- [6] L. Busse, R. Šindelar, „Sekunden - Leistungsreserve und Wärmeverbrauch bei Verschiedenen Betriebsarten von Dampfturbinen“, *VGB Kraftwerkstechnik*, Nr. 9, 1989., pp. 892-895
- [7] 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 Colloquium „Decision Making Principles in Building of Electric Power Sources, Sarajevo, March 27-28, 2008, 33 pages
- [8] Z. Milovanović, „Monografije Energetska i procesna postrojenja, Tom 1: Termoenergetska postrojenja - Teoretske osnove“, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2011.
- [9] Z. Milovanović, „Monografije Energetska i procesna postrojenja, Tom 2: Termoenergetska postrojenja - Tehnološki sistemi, projektovanje i izgradnja, eksploatacija i održavanje“, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2011.
- [10] B. Robyns, B. Francois, G. Delille, C. Saudemont, „Energy Storage in Electric Power Grids“, ISTE Ltd i John Wiley & Sons Inc., London i Hoboken, 2015.
- [11] Global Energy Network Institute "Energy Storage Technologies and their Roll in Renewable Energy Integration", 2012.
- [12] J. Mikulović, "Skladištenje energije kao dio EES", Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu <http://elementarium.cpn.rs/elementi>, septembar 2016.
- [13] E. Malagić, "Vrste energetskih skladišta u distribucijskim mrežama", Zagreb 2010.
- [14] A. Ter-Gazarian, "Energy Storage for Power Systems", Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1994.
- [15] S. Dumonjić-Milovanović, Z. Milovanović, D. Knežević, A. Milašinović, Čiste tehnologije za proizvodnju korisne energije i njihova primjena u Republici Srpskoj, Energija, ekonomija, ekologija, Časopis SE Srbije, Broj 1, Beograd, 2016.
- [16] Studija o utjecaju na okoliš zahvata Rekonstrukcije TE Plomin – zamjena postojeće TE Plomin 1 u cilju modernizacije i povećanja kapaciteta, Knjiga 1/4 (Poglavlja 1. - 3.3.), EKONERG - Institut za energetiku i zaštitu okoliša d.o.o., Zagreb, 2011.
- [17] S. Dumonjić-Milovanović, Prilog optimizaciji hibridnog sistema za proizvodnju električne energije na bazi primarne energije Sunca i vjetra sa analizom primjenljivosti na područje Banje Luke, Magistarski rad, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2013.
- [18] F. Begić, Metoda procjene stepena održivosti energetskih postrojenja različitih izvora u Bosni i Hercegovini, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 2003.
- [19] Energetski bilans Republike Srpske za 2017. godinu, Vlada Republike Srpske, Banja Luka, 2016.
- [20] F. Barbir, Obnovljivi izvori energije i održivi razvoj, Rekapitulacija – Zaključci, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, <http://marjan.fesb.hr/~fbarbir/PDFs%20Obnovljivi%20izvori/Zakljucci.pdf>, Split, 2011.

ABSTRACT

Currently, the energy needs are mostly being settled from conventional energy sources (fossil fuels: coal, oil, natural gas, hydro energy – hydroelectric power plants, and also nuclear fuels for fission processes). As fossil and nuclear fuels belong to the group of nonrenewable energy sources, their reserves are limited, so it is essential to have in mind the possibility of their exhaustion. To ensure safer future regarding the energy, research in the field of theoretical possibility and real, rational usage of energy sources, go in two directions – prolonging the possibility of usage of nonrenewable sources and leaning towards energy sources and technologies which have minimal impact on the environment, so called clean technologies. So, it is necessary to provide continuous growth of energy production, in compliance with growth of the industry and social standard, with, at the same time, searching for adequate technological processes for rational usage of renewable energy sources (the alternative for nonrenewable ones) and improving efficiency of nonrenewable sources exploitation in plants with, so called small scale waste technologies with the least harmful impact on the environment.

Key words: Energy needs; Clean technologies; Sustainable development; Republic of Srpska; Environment protection;

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR USEFUL FORMS OF ENERGY PRODUCTION - CLEAN TECHNOLOGIES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Zdravko N. Milovanović, Svetlana R. Dumonjić-Milovanović, Aleksandar N. Milašinović, Darko M. Knežević, Jovan B. Škundrić

Energetska efikasnost termoenergetskih postrojenja

Faze i metodologija realizacije izrade Studije na primjeru RiTE Ugljevik instalisane snage 300 MW

Zdravko Milovanović¹, Momir Samardžić², Vinko Babić¹, Svetlana Dumonjić-Milovanović³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²JMDP Elektroprivreda Republike Srpske, ZP RiTE Gacko, Gacko, Republika Srpska

³Partner Inženjering d.o.o., Banja Luka, Republika Srpska

zdravko.milovanovic@mf.unibl.org, samarmo@gmail.com, vinko.babic@mf.unibl.org, svetlanadm@ymail.com

Sažetak—Energetska efikasnost predstavlja odnos između ostvarenog rezultata u proizvodnji električne energije i utrošene primarne energije za njenu proizvodnju (iz energenata i za vlastite potrebe). Uz pojam "efikasnost", u srpskom jeziku se često koriste i pojmovi "efektivnost" ili "djelotvornost", za opisivanje radnje koja donosi željeni rezultat, bez obzira na njene karakteristike kao i uz nju vezane gubitke. 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 energetske 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. Energetska efikasnost ima tri komponente: ekonomsko-finansijsku, tehničku, ljudsku i organizacijsku. Razlozi za realizaciju projekata iz oblasti poboljšanja energetske efikasnosti mogu biti: ekonomski (troškovi energije), energetske (lokalni i globalni), zakonodavni (Republika Srpska i BiH u cjelini, Jugoistočna Evropa i EU), zaštita životne sredine (lokalni i globalni) i konkurentnost (lokalno, EU i globalno). Energetsku efikasnost bloka termoelektrane treba da slijede aktivnosti i radnje koje u normalnim okolnostima dovode do provjerenog i mjerljivog povećanja energetske efikasnosti postrojenja bloka, tehničkih sistema bloka, proizvodnih procesa i uštede primarne energije. U okviru ovog rada dat je pregled aktivnosti realizacije izrade Studije na primjeru RiTE Ugljevik instalisane snage 300 MW.

Ključne riječi—termoenergetska postrojenja; energetska efikasnost; studijske analize, ciljevi energetske efikasnosti; optimizacija;

I. UVOD

Kako bi se postigao ambiciozan nivo energetske efikasnosti do 2030. godine, evropska komisija je počela uspostavljati sredstva i instrumente kojima se energetska efikasnost tretira kao zaseban izvor energije. Komisija je tokom 2015. godine kao prvi korak predložila reviziju Direktive o označavanju energetske efikasnosti, čime bi se povećala djelotvornost postojeće legislative o označavanju energetske efikasnosti i jačala baza za njenu realizaciju. Takođe, u toku 2015. godine na snagu su stupile mjere za ekološki dizajn i označavanje energetske efikasnosti, koje bi mogle dodatno smanjiti potrošnju energije u domaćinstvima, a

time i račune. Energetska efikasnost igra važnu ulogu u Evropskom fondu za strateška ulaganja, iz kojeg se već podstiču strateški projekti u području energetske efikasnosti u Francuskoj i Italiji, kao i nekim drugim zemljama iz EU. Takođe, u pripremi je i mnogo drugih projekata za koje se čeka odobrenje.

Izvjestaj o napretku u postizanju cilja povećanja energetske efikasnosti za 20 % do 2020. godine, ukazuje na to da je zajedničkim naporima država članica postignuto samo 17,6 % uštede primarne energije u odnosu na projekcije za 2020. godinu. Ipak, EU komisija vjeruje da se cilj od 20 % može postići, pod uslovom da se postojeće zakonodavstvo EU-a sprovede pravilno i u cjelini. Države članice trebale bi postati ambicioznije i poboljšati uslove za ulaganja kako bi energetska efikasnost u Evropi mogla i dalje rasti. Kao jedan od ciljeva strategije energetske unije navednen je dalji napredak koji treba ostvariti od privrede koje je zasnovana na fosilnim gorivima. Tokom 2015. godine postignut je napredak u tri područja koja su ključna za taj prelaz - trgovanju emisijama, obnovljivim izvorima energije i daljim ulaganjima u niskougljenične tehnologije i energetsku efikasnost. Sporazumom o uvođenju rezervi za stabilnost tržišta, koje će biti na raspolaganju od 2019. godine, očekuje se stabilizacija i povećanje efektivnosti sistema EU-a za trgovanje emisijama. Kao rezultat obavljenih analiza, EU komisija je sredinom 2015. godine predstavila prijedlog za reviziju sistema EU-a za trgovanje emisijama, kao zadnji korak prilagođavanja sistema EU-a za trgovanje emisijama, s ciljem ostvarenja preduslova za njegovu punu primjenu, potencirajući ga kao glavni instrument EU za postizanje ciljeva u pogledu emisija stakleničkih gasova do 2030. godine. Podržavajući ambiciju da EU preuzme vodeći položaj u svijetu u području obnovljivih izvora energije, komisija je takođe 2015. godine objavila savjetodavnu komunikaciju o novom modelu tržišta električne energije, čiji je glavni cilj priprema tržišta na sve veći udio obnovljivih izvora energije, koji bi trebali postati uobičajen izvor energije. Iz njih se već danas zadovoljavaju potrebe za energijom 78 miliona Evropljana, dok je EU na dobrom putu da postigne cilj od 20 % konačne potrošnje energije iz obnovljivih izvora do 2020. godine. Svakako da prelaz na niskougljeničnu privredu zahtijeva znatnija ulaganja (posebno u elektroenergetske mreže, proizvodnju energije, energetsku efikasnost i inovacije i sl.). Jedna od značajnijih stavki budžeta EU-a planirana je kao doprinos ostvarivanju tog

napretka, uz uključivanje ciljeva u području klime u sve relevantne političke inicijative i osiguranjem minimuma od 20 % budžeta EU-a za ove namjene u periodu od 2014. do 2020. godine (planiran okvirni budžet u okviru evropskih strukturnih i investicijskih fondova od oko 180 milijardi EUR-a). Takođe, projekti u području održivih izvora energije bili su jedni od prvih projekata odobrenih za podršku u vidu izdatih finansijskih garancija Evropskog fonda za strateška ulaganja, posebno u Danskoj, Finskoj, Francuskoj, Španjolskoj i Ujedinjenoj Kraljevini. Na osnovu energetske i klimatske okvira komisije do 2030. godine, EU je, kao obavezujući cilj smanjenja domaćih emisija stakleničkih gasova u odnosu na nivo iz 1990. godine, definisala prag na nivou cijele privrede od 40 % do 2030. godine. Ovo je predstavljalo i njihov polazni stav za konferenciju o klimi u Parizu, čime je trasirana spremnost da se pregovara o ambicioznom, obavezujućem i transparentnom globalnom klimatskom dogovoru, koji bi jasno odredio put ka ograničavanju rasta prosječne globalne temperature na manje od 2 °C. Za postizanje tih ciljeva potrebne su dalje odlučne mjere na lokalnom nivou. Kao rezultat ove inicijative EU komisija je 15. oktobra 2015. godine sazvala predstavnike iz gradova u okviru EU-a i šire, s ciljem redefinisavanja postojećeg ili pokretanja novog sporazuma gradonačelnika, kojim bi se dodatno obuhvatilo, pored ublažavanja klimatskih promjena, i inicijative za prilagođavanje novim pravilima u oblasti zaštite životne sredine. Pokretanje globalnog sporazuma gradonačelnika gradova treba dodatno da podstakne djelovanje lokalnih vlasti širom svijeta, uključujući u regijama koje dosad nisu bile uključene. Takođe, značajan broj preduzeća je uzelo aktivno učešće u preduzimanju mjera do početka i nakon održavanja konferencije u Parizu, što je za rezultat imalo značajnih poslovnih prilika za inovativna poduzeća iz EU-a, ako i stvaranju novih radna mjesta i rast GDP u EU-u.

Energetska efikasnost je sastavni dio razvojnih smjernica svih sektora energetske sistema. Posebnu pažnju treba posvetiti energetske efikasnosti u sektorima neposredne potrošnje, zgrada, industrije i saobraćaja, jer su tu najveći mogući efekti. Mjerama energetske efikasnosti smanjuje se porast potrošnje energije (što smanjuje potrebu za izgradnjom novih kapaciteta), kao uvoz energije i povećava sigurnost i kvalitet snabdijevanja. Povećanje energetske efikasnosti, uz ostvarene energetske uštede, doprinosi smanjenom korišćenju fosilnih goriva i smanjenju emisija štetnih gasova u okolinu, a ubrzava i razvoj privrede, kroz povećanje broja radnih mjesta, te većoj konkurentnosti na liberalizovanom tržištu.

II. PROJEKTI ENERGETSKE EFIKASNOSTI I PRATEĆA DOKUMENTACIJA

A. *Mogućnosti i potencijali poboljšanja energetske efikasnosti upravljanja energetskim tokovima u Republici Srpskoj*

U razmatranju mogućnosti i potencijala poboljšanja energetske efikasnosti, te racionalnog upravljanja energijom u svim sektorima potrošnje u Republici Srpskoj, sagledana je trenutna situacija u sektoru zgrada (zgrade stambene i nestambene namjene), saobraćaja i industrije, te su na osnovu prikupljenih podataka i saznanja identifikovane moguće

konkretne mjere za povećanje energetske efikasnosti u pojedinim sektorima potrošnje, uz analizu uticaja i posljedica njihove implementacije, [2,3]. Pri tome je dat naglasak na potrebu izgradnje institucionalnog i zakonodavnog okruženja, kao jednog od osnovnih preduslova uspješne implementacije mjera energetske efikasnosti. Sva raspoloživa iskustva drugih zemalja su jednoglasna u zaključku da je bez podsticajnih mjera izuzetno teško, gotovo nemoguće, pokrenuti primjenu mjera energetske efikasnosti (EE), koje traže veće investicije, [4].

B. *Faze realizacije projekata energetske efikasnosti iprateća dokumentacija*

Faze realizacije projekata energetske efikasnosti u industriji mogu se prikazati u sljedećoj hijerarhiji, [1, 17]:

- preliminarni audit (saznanja o potencijalima);
- puni energetske audit (snimljeno stvarno stanje i poznate potrebne mjere);
- studija izvodljivosti (tehnička i ekonomsko-finansijska analiza);
- projekat za izvođenje (tehnički detalji i finansijski plan);
- implementacija projekta (uštede i racionalno korišćenje energije).

Zastupljenost svih navedenih elemenata zavisi od kompleksnosti projekata, ali u osnovi rezultati jedne faze omogućuju kvalitetnu pripremu druge. U skladu sa tim, tamo gdje su pojedine faze realizacije nedovoljne ili izostaju, potrebno ih je promotivno, finansijski i organizaciono podržati. Tako, potencijali uštede kod potrošnje električne energije efektivno se mogu grupisati na uštede kod elektromotornih pogona postrojenja, uređaja i aparata, rasvjete, klimatizacije i ventilacije, kao i grijanja. Pomenute grupe uglavnom su prisutne pri posmatranju svih grupa potrošača. Specifične tehnološke procese u industriji, koje troše veće količine električne ili toplotne energije, treba analizirati zasebno. Korišćenje toplotne energije u industriji vezano je uz specifičnosti tehnološkog procesa pojedine industrije. Kao medij se najčešće koristi voda, dok procesna industrija u svojoj tehnologiji koristi i druge fluide kao medije za prenos toplote. Ovdje treba posmatrati efikasnost toplotnih agregata – uglavnom kotlova, zavisno od korišćenog goriva, zatim gubitke pri distribuciji radnog medijuma, kao i racionalnost korišćenja toplotne energije u samom proizvodnom procesu.

Sprovođenje energetske pregleda (audita) u industrijskim postrojenjima se pokazalo kao izuzetno efikasna mjera povećanja energetske efikasnosti. Elementi sprovođenja energetske pregleda proizvodnih postrojenja, koji se baziraju na praćenju i analizi korišćenja toplotne i električne energije za razne kategorije potrošača, najčešće se odnose na sljedeća područja korišćenja energije: rasvjetu, elektromotorne pogone, ventilatore i pumpe, kompresore i sisteme sabijenog vazduha, sisteme pare, kao i ostale proizvodne procese karakteristične za pojedina industrijska postrojenja (hlađenje, sušenje, specifične toplotne procese, druge zasebne industrijske procese). Treba uzeti u obzir to da je proizvodnja i prerađiva

aluminijuma energetska naročito intenzivna industrija, gdje se specifično troši približno 22,3 GJ energije po toni glinice (Alumina Zvornik, Aluminijski kombinat Mostar i dr.). Pozicija ove industrije naglašava posebnu pažnju u razmatranju energetske racionalnosti. Potrošnju energije u sljedećem sektoru po iznosu potrošnje u industriji hrane, pića i cigareta, teško je specificirati, jer se radi o puno različitih procesa, pri čemu se sve donedavno smatralo da u ovoj grani industrije utrošak energije i nije tako značajan. Međutim, analize pokazuju da se u razvijenim zemljama na prehrambenu industriju troši oko 10% od ukupne količine energije potrebne za cjelokupni industrijski sektor. Ovdje su posebno značajne mjere štednje toplotne energije.

Prethodne analize govore da se, među industrijskim preduzećima u Republici Srpskoj (osim u Alumini Zvornik), u većini slučajeva ne smatra da postoji potreba za naporima u povećanju racionalnosti korišćenja energije. Posebno kod toplotne energije, gdje se u preko 90% situacija smatra da nema te potrebe, dok u slučaju električne energije u nešto preko 15% situacija se smatra da su potrebna poboljšanja. Da bi se stanje u tom području popravilo, Vlada Republike Srpske će preduzeti konkretne mjere kako bi se podigla svijest o važnosti racionalizacije potrošnje energije kod industrijskih subjekata, [2].

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 (ugalj kao osnovni energent, nafta i naftni derivati kao pomoćni energent). Ove aktivnosti se zasnivaju na primjeni energetske 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. Pri tome, energetska efikasnost ima tri komponente: ekonomsko-finansijsku, tehničku, ljudsku i organizacijsku. Razlozi za realizaciju projekata iz oblasti poboljšanja energetske efikasnosti mogu biti: ekonomski (troškovi energije), energetska (lokalni i globalni), zakonodavni (Republika Srpska i BiH u cjelini, Jugoistočna Evropa i EU), zaštita životne sredine (lokalni i globalni) i konkurentnost (lokalno, EU i globalno).

Rad u oblasti obuke za energetsku efikasnost treba da bude neprekidan (kontinuirana aktivnost). Povećanje energetske efikasnosti rezultat je korišćenja novih tehničkih znanja i primjene savremenog iskustva kroz obuke osoblja, s ciljem ostvarivanja politike štednje energije, uz zadržavanje postignutog nivoa kvaliteta korisnika energije. Program obuke naglašava prenos znanja i iskustava kroz razmatranje energetike u međunarodnim razmjerama radi izvlačenja koristi iz iskustava drugih zemalja, prije svega kako bi se obezbijedilo razumijevanje situacije u svjetskoj energetici i uvid u njenu složenost (posebno na geopolitičkom, ekonomskom i ekološkom planu). Cilj obuke je razumijevanje, formiranje i ostvarivanje politike obezbjeđenja efikasnosti korišćenja energije. Proces obuke se tiče svih sektora privredne i vanprivredne djelatnosti i usmjeren je ka svim sadašnjim i budućim specijalistima u ovim oblastima. Obuka

je namijenjena inženjersko - tehničkom personalu, ekonomistima, arhitektama, rukovodiocima privrednih organizacija, rukovodiocima javno-komunalnih preduzeća i dr., s ciljem sticanja savremenih znanja u oblasti standardizacije u oblasti štednje energije, energetske efikasnosti i energetske menadžmenta. Zainteresovanost kompanija za uvođenje energetske menadžmenta i, samim tim, povišenje svoje energetske efikasnosti, prati i uvođenje međunarodnog standarda ISO 50001, koji im u tim aktivnostima pruža stvarnu podršku. U mnogim organizacijama se već primjenjuju elementi energetske menadžmenta, na primjer, pripremaju se i realizuju programi, planovi ili projekti štednje energije, vrše nabavke opreme sa višom energetske efikasnošću, analiziraju mogućnosti za povišenje energetske efikasnosti pojedinačnih procesa i/ili proizvodnje ili slično. Zato, koristeći međunarodni standard ISO 50001, organizacija može otkriti da ona već ispunjava dio od tih zahtjeva koji su u njega uključeni. Dakle, međunarodni standard ISO 50001 je poseban orijentir po kome je moguće ocijeniti i poboljšati metode upravljanja, koje se već primjenjuju u organizaciji, usmjerene ka štednji energije. One su ona polazna tačka u primjeni međunarodnog standarda ISO 50001 koja omogućuje da se obezbijedi sistemski prilaz energetske menadžmentu. Međunarodni standard ISO 50001 treba da snabdije svaku organizaciju, nezavisno od njene veličine, valjanom strategijom rada (djelovanja), kako u oblasti upravljanja, tako i u tehničkim aspektima, da bi ona mogla realno da poviši svoju energetsku efikasnost, povećajući korišćenje obnovljivih izvora energije i smanji efekat staklene bašte. Očigledno, uvođenje sistema energetske menadžmenta predstavlja inovativno rješenje, koje je povezano sa modernizacijom postojeće proizvodnje i upravljanja na osnovu korišćenja najbolje svjetske prakse u oblasti štednje energije.

C. Izrada Studije o energetske efikasnosti

Izrada Studije o energetske efikasnosti termoelektrane Ugljevik [1] realizovana je u skladu sa ranije definisanim Projektnim zadatkom. Pri tome, vođeno je računa o osnovnim načelima na kojima se zasniva efikasno korišćenje kapaciteta proizvodnje električne energije, od kojih su najvažnija: energetska sigurnost, konkurentnost proizvoda i usluga, održivost korišćenja energije, organizovano upravljanje energijom, ekonomska isplativost mjera energetske efikasnosti, kao i minimalni zahtjevi energetske efikasnosti. Studija o energetske efikasnosti termoelektrane Ugljevik imala je za cilj da obradi i prikaže analizu energetske efikasnosti u dosadašnjem radu termoelektrane, mogućnosti za efikasnije korišćenje proizvodnih kapaciteta termoelektrane, načine za povećanu konkurentnost na tržištu električne energije, kao i mjere za smanjenje negativnog uticaja energetske sektora na životnu sredinu. Ne treba zaboraviti ni mjere za podsticanje odgovornog ponašanja prema proizvodnji električne energije, zasnovane na osnovama sprovođenja politike efikasnog korišćenja električne energije i primjeni mjera energetske efikasnosti u sektoru proizvodnje električne energije.

Polazeći od definicije energetske efikasnosti kao odnosa između ostvarenog rezultata u proizvodnji električne energije i za to utrošene energije iz energenata i guibitaka vezanih za

vlastitu potrošnju na elektrani, potrebno je, koristeći postojeću metodologiju za ocjenu rada termoenergetskih postrojenja (TEP) u okviru elektroenergetskog sistema (EES), izračunati određene pokazatelje efektivnosti, kao što su to: koeficijenti iskorišćenja vremena i snage, koeficijent energetske korisnosti sastavnih postrojenja i bloka u cjelini, način i količine proizvedene električne energije i utrošene toplotne energije iz goriva, količine upotrebene toplotne i električne energije za vlastite potrebe i sl., [4]-[16]. Pravilno izračunavanje ostvarenih karakteristika bloka omogućuje ocjenu energetske efikasnosti. Energetsku efikasnost bloka termoelektrane treba da slijede aktivnosti i radnje koje u normalnim okolnostima dovode do provjerenog i mjerljivog povećanja energetske efikasnosti postrojenja bloka, tehničkih sistema bloka, proizvodnih procesa i uštede primarne energije.

Sama studija vezana za ocjenu energetske efikasnosti proizvodnog preduzeća u okviru EES-a koncipirana je iz nekoliko cjelina: analize energetske efikasnosti postrojenja bloka, tehnokonomske ocjene mogućnosti povećanja energetske stepena korisnosti postrojenja i prijedloga mjera za poboljšanja energetske svojstava bloka i proizvodnje električne i toplotne energije, bez izmjene opreme, poboljšanje efikasnosti proizvodnih kapaciteta za snabdijevanje toplotnom i električnom energijom uvođenjem nove opreme ili demontažom stare i zamjenom novom energetski efikasnijom opremom (ovu vrstu mjera karakterišu neophodna investiciona ulaganja kojima se u kratkom roku može značajno povećati energetska efikasnost, čime se posredno, preko ostvarenih ušteda, obezbjeđuju finansijska sredstva za povraćaj investicije).

U prvu grupu mjera spadaju inicijative i mjere u pogledu upravljanja i smanjenje potrošnje i gubitaka energije bez promjene procesa kao i korišćenje otpadne energije i to: zaustavljanje rada opreme u praznom hodu, sniženje nepotrebno visoke temperature u tokovima procesa, ograničenje upotrebe tople vode za čišćenje i ispiranje, monitoring potrošnje energije, daljinski ili "on line" nadzor i upravljanje potrošnjom električne energije s ciljem izbjegavanja velikog faktora istovremenosti i smanjenja vršnih opterećenja, sistematsko i plansko održavanje opreme, eliminacija curenja radnih fluida - pare, vode, sabijenog vazduha i vakuuma, poboljšano planiranje operacija, bolja izolacija cijevi koje prenose toplotnu energiju, automatska kontrola temperature i pritiska, uvođenje centralizovanog upravljanja sistemima klimatizacije i grijanja, uvođenje prediktivnog održavanja, kontrolisano i racionalno korišćenje osvjetljenja u radnim prostorijama, instalisanje visoko efikasne rasvjete (zamjena standardnih sijalica "štedljivim"), frekventno „vođenje“ velikih elektro-motornih potrošača radi poboljšanje faktora snage elektromotora, kompenzacija reaktivne električne energije, predgijevanje toplotom otpadnih radnih materija, povrat kondenzata, kao i instalisanje dodatnih razmjenjivača toplote.

Druga grupa mjera se odnosi na promjene u proizvodnom procesu i uvođenje tehnoloških i tehničkih inovacija: zamjena dijelova ili cijelog proizvodnog postrojenja savremenijim i efikasnijim, rekonstrukcija toplovodnih i parnih instalacija,

instalisanje savremenih visoko efikasnih kotlovskih postrojenja, zamjena indirektnog sušenja grejanim vazduhom direktnim sušenjem toplim (otpadnim) gasovima iz procesa sagorijevanja prirodnog gasa, kao i primjena novih ili poboljšanih tehnologija, kao što je kogeneracija (spregnuta proizvodnja toplotne i električne energije iz jednog izvora, čime se postiže faktor iskorišćenja primarnog goriva preko 85%), trigeneracija ili korišćenje kombinovanih parno-gasnih postrojenja.

III. PLANIRANJE I MODELIRANJE ENRGETSKE EFIKASNOSTI I METODOLOGIJA REALIZACIJE SA ASPEKTA ENERGETSKE POLITIKE

A. Energetska efikasnost i energetska politika Republike Srpske

Povećanje energetske efikasnosti mora biti trajan proces u svim sektorima korišćenja energije, što danas sve više predstavlja redovnu praksu u sve većem dijelu naše planete. Uzrok nepostojanja interesovanja za oblast energetske efikasnosti u proteklom periodu leži u činjenici da je električna energija (kao najdostupniji oblik energije) bila netržišna roba, koja je imala relativno nisku cijenu (ima je i danas, posebno za domaćinstva). Realan paritet tržišno formiranih cijena energenata i energetske usluga je najbolji pokretač aktivnosti na povećanju energetske efikasnosti u svim sektorima, uz neophodne socijalne programe za one kategorije korisnika energije, koje je neophodno dodatno subvencionisati.

Postepenom liberalizacijom domaćeg tržišta energije, projekti povećanja energetske efikasnosti tek sada postaju ravnopravni i interesantni za ulaganja, tako da država ima interesa da dodatno pojača svoj doprinos kroz stvaranje adekvatnog pravnog okvira (zakona, podzakonske regulative, propisa, pravila, uredbi, itd.) i podsticajnih uslova za primjenu brojnih tehničko-tehnoloških mjera, koje dovode do povećanja energetske efikasnosti. Ovdje je značajan i uticaj na ponašanje krajnjih korisnika, kroz podizanje njihove svijesti u ovoj oblasti. Osim toga, uspostavljanje obaveza u pogledu gazdovanja energijom (uvođenja energetske menadžmenta) i stalna briga o povećanju energetske efikasnosti u svim sektorima potrošnje i proizvodnje energije - nužan su preduslov za realizaciju sistemskih mjera povećanja energetske efikasnosti u Republici Srpskoj, odnosno BiH kao cjelini.

Detaljna analiza stanja u sektorima potrošnje finalne energije moguća je ukoliko postoji kvalitetna baza energetske podataka, odnosno uređena baza energetske indikatora. U zemljama u tranziciji, kakva je BiH i veći dio zemalja sa prostora bivše Jugoslavije, ovakve baze još nisu u potpunosti uspostavljene, te se pri bilansiranju energetske tokova i potrošnje finalne energije u velikoj mjeri vrše aproksimacije i procjene u sektorima (npr. industrije, saobraćaja, usluga, zgradarstva i dr.), pa je mjerenje efekata u pogledu efikasne upotrebe energije u sektorima takođe teško procijeniti (tim više jer se radi o malim pomacima). Procjenjuje se da bi se samo dosljednom primjenom savremenih standarda za projektovanje

i gradnju objekata ostvarile uštede specifične toplotne snage od 10 do 40 % u objektima za boravak ljudi (stambeni i poslovni prostori). U narednom periodu ovoj analizi treba dodati i aspekt certificiranja objekata, [1]-[3]: energetska efikasnost u zgradarstvu i certificiranje - smjernice, indikatori, mjere i sl., iskustva u zemljama u okruženju, kao i EU - direktive, standardi i sl.; energijsko-finansijski proračuni i indikatori energetske efikasnosti i certificiranje, proračun smanjenja CO₂ smanjanjem potrošnje energije, kroz mjere energetske efikasnosti i certificiranje - ekološki efekti i sl., energetska efikasnost u industriji i certificiranje, metodologija izrade energetskih bilansa i certificiranja energetske efikasnosti, integracija sa informatičkim sistemom, npr. primjena takozvanih inteligentnih zgrada, energetski bilansi kod niskoenergetskih kuća i certificiranje, pasivne kuće i certificiranje.

Osnovama energetske politike bilo koje zemlje daje se presjek stanja i definišu osnovni prioriteti, pravci i smjernice u pojedinim sektorima u energetici. U okviru nje se, takođe, uvažavaju specifičnosti različitih vrsta i oblika energije, te se kao takvi pojedinačno i razmatraju, isto kao i u samom energetskom bilansu. Najčešće se preko osnova energetske politike definišu njeni strateški ciljevi, poput: obezbjeđenja sigurnosti snabdijevanja energijom, unapređenje održivog razvoja u kontekstu proizvodnje i korišćenja energije, obezbjeđenja postepenog uvođenja konkurencije u energetske tržište, stvaranja uslova za dostupnost i ravnomjerno korišćenje umrežene energije na čitavom geografskom prostoru zemlje, i obezbjeđenja usklađenosti između gore navedenih ciljeva. Pri tome, potrebno je prethodno stvoriti potrebne zakonske pretpostavke za prikupljanje preciznijih podataka energetske statistike u skladu sa EUROSTAT metodologijom (Zakon o energetici, Pravilnik o energetskom bilansu i sl.).

Reforma elektroenergetskog sektora BiH kroz implementaciju strateških projekata, koji imaju za cilj obezbjeđenje visokog kvaliteta univerzalne usluge isporuke energije i snabdijevanja i zaštite krajnjih kupaca tj. potrošača, stvorice preduslove za regionalnu saradnju na energetskom tržištu u skladu sa *Ugovorom o Energetskoj zajednici Jugoistočne Evrope*. Iako je trenutna prednost Republike Srpske suficit električne energije, postepena i planirana liberalizacija tržišta energije će ukinuti privilegije monopolskog položaja elektroprivrednih preduzeća u BiH, a uvesti oštru konkurenciju tržišnog nadmetanja, koja neće trpjeti statične i neprilagodljive sisteme, o čemu će se morati voditi računa u budućnosti.

U naftnoj industriji Republike Srpske u narednom periodu planira se domaća proizvodnja naftnih derivata za potrebe tržišta, a višak će se izvoziti u susjedne zemlje. Otprema naftnih derivata prema sadašnjim prilikama usmjerena je na prevoz derivata autocisternama i jednim dijelom željeznicom. U narednom periodu provodiće se aktivnosti koje će obezbjediti kvalitetniju i sigurniju otpremu naftnih derivata. Privatizacijom preduzeća naftne industrije trebale su se obezbjediti poboljšanje organizacione strukture i čvršće

međusobno povezivanje proizvodnih i prometnih organizacija, sa ciljem da kroz prometne organizacije obe rafinerije obezbijede što uspješniji plasman i izvoz gotovih proizvoda. Ovo je većim dijelom i realizovano, uz poslovanje sa značajnim gubitkom, čije objektivne i subjektivne uzroke treba u narednom periodu eliminirati.

Sigurnost snabdijevanja potrošača prirodnim gasom je uslovljena diversifikacijom izvora, postojanjem skladišta prirodnog gasa, dugoročnim ugovorima za snabdijevanje i dugovanjem BiH prema GazPROM-u. Obzirom da je infrastruktura prirodnog gasa u Republici Srpskoj i BiH izrazito nerazvijena, te da ne postoje navedeni elementi koji bi osigurali sigurnost snabdijevanja, neophodno je neprekidno praćenje situacije u snabdijevanju potrošača prirodnim gasom, uz pravovremeno preduzimanje mjera neophodnih za obezbjeđenje kontinuiranog snabdijevanja potrošača ovim energentom, odnosno interventnih mjera prelaska na druge vidove energije (npr., korišćenje mazuta umjesto prirodnog gasa u toplanama). Postoji i opredijeljenost da se u strukturu proizvodnje uvedu i alternativni izvori i energija dobijena iz obnovljivih izvora, kao što su: bio dizel, hidroenergija, biogas, biomasa, solarna energija, energija vjetra i dr. Pošto su najznačajniji obnovljivi izvori energije u Republici Srpskoj energija biomase i hidroenergija, stimulativne mjere treba u najvećoj mjeri usmjeriti na ova dva vida obnovljivih izvora energije, pri čemu treba podsticati i povećano korišćenje ostataka biomase za proizvodnju toplotne energije, kao i proizvodnju tečnog motornog biogoriva. Podrazumijeva se da sastavni dio politike upravljanja energijom treba da bude obavezna politika zaštite životne sredine, kako je to predviđeno standardima EU. U svjetlu trenutne energetske pozicije zemalja EU, od posebne važnosti su dva aspekta energetske politike: energetska nezavisnost i energetska sigurnost. Pri tom se u svakom slučaju obavezno uzima u obzir neupitna potreba održivog razvoja energetike (ratifikacija Pariškog ugovora, odustajanje SAD-a od istog i sl.), odnosno ekonomski aspekt i aspekt zaštite životne sredine kroz smanjenje potrošnje fosilnih goriva. U tom kontekstu najbitniji mehanizmi za ostvarivanje ovih ciljeva energetske politike su konstantno povećanje učešća obnovljivih (nefosilnih) izvora energije, i drugi -povećanje energetske efikasnosti. Ova trenutna i široka inicijativa daje poseban značaj detaljnijem vođenju energetskih bilansa, kroz koje se vrši mjerenje i evidentiranje napretka koji se ostvaruje aktivnostima za uštedu energije i smanjenje potrošnje fosilnih goriva. U godinama ekonomske krize treba prepoznati filozofiju energetske efikasnosti i njen potencijal koji može trajno ostvariti značajne uštede (bez gubitka standarda) ne samo u kućnim budžetima građana, nego čak i u javnom budžetu, ako se adekvatne edukacije, programi i tehničko-tehnološke mjere primijene u organima uprave, administrativnim i javnim ustanovama, opštinama, bolnicama, sudstvu, vaspitno - obrazovnim ustanovama, javnim toplanama, javnom saobraćaju i dr.

Energetska nezavisnost čini bitan dio nezavisnosti i stabilnosti jedne države, pa se njoj treba posvetiti poseban značaj i to za svaki sektor posebno (sektor prirodnog gasa,

sektor nafte i derivata nafte, sektor uglja i električne energije, i sektor biogoriva i biomase). Jedinstveno tržište električne energije i gasa koje je potpisivanjem Ugovora o Energetskoj zajednici (*Treaty Establishing the Energy Community*) uspostavljeno u 33 zemlje Evrope, determiniše dio energetske politike između Evropske Unije i zemalja Jugoistočne Evrope. Potpisivanjem Ugovora o Energetskoj zajednici stvorena je obaveza poštovanja pravne regulative Evropske unije za područje energetike, a konačan cilj ovakvog uređenja je stvaranje pravnog i institucionalnog okvira za slobodan prenos i trgovanje energijama, te veću obavezu zaštite okoline i prava krajnjeg kupca tj. potrošača. Sve ovo zahtijeva usklađivanje regulative u skladu sa dobrom praksom i direktivama Evropske Unije. Stoga se i energetska politika u BiH bazira prije svega na obezbjeđenju sigurnog, kvalitetnog i pouzdanog snabdijevanja energijom i energijama, obezbjeđenju optimalnog razvoja energetske infrastrukture, uvođenju savremenih tehnologija, obezbjeđenju uslova za unapređenje energetske efikasnosti, stvaranju uslova za stimulisanje korišćenja obnovljivih izvora energije i unapređenja zaštite životne sredine.

B. Definisane metodologije za utvrđivanje energetske efikasnosti

Definisane metodologije za utvrđivanje energetske efikasnosti predstavlja polaznu osnovu za definisanje načina prikupljanja podataka o postrojenjima, projektima i sistemima, radi procjene aktuelnog stanja u području energetske efikasnosti, a na bazi kojeg bi se mogle predvidjeti mjere za poboljšanje energetske efikasnosti, posebno na mjestima gdje je uočeno značajno korišćenje energije i energenata. Po definisanju prijedloga mjera, aktivnost koja slijedi obuhvatila bi izradu akcionih planova za njihovu realizaciju, kao i način praćenja realizacije mjera energetske efikasnosti u dužem periodu. Polazeći od specifičnosti pojedinih djelatnosti kojima se bavi MH Elektroprivreda Republike Srpske a.d. Trebinje, kao i strukture njenih zavisnih preduzeća, koje pokrivaju oblast termoenergetike, rudarstva, distributivnih mreža, hidro energetike (hidro elektrana) i građevinskih objekata, neophodno je definisati metodologiju za određivanje energetske efikasnosti u svakoj od navedenih oblasti. Konkretno mjere vezane za ocjenu i poboljšanje energetske efikasnosti u TE Ugljevik I zavise od tipa, namjene i planiranog vijeka trajanja njegovih osnovnih postrojenja i sastavne opreme u okviru njegove tehnološke šeme. Za uspješnu realizaciju procjene mogućnosti unapređenja energetske efikasnosti analiza je sprovedena po oblastima i segmentima postrojenja i u tom smislu je predložena podjela na sljedeće cjeline ([1]-[4]): sistem za snabdijevanje gorivom i praćenje kvaliteta goriva, glavni pogonski objekat (GPO), kojeg čine kotlovsko postrojenje, turbinsko postrojenje sa kondenzatorom i rashladnim sistemom, generatorsko i transformatorsko postrojenje, sopstvena potrošnja električne, toplotne energije i vode, mjerno-upravljački sistem i optimizaciju procesa, kao i uticaj okruženja na rad postrojenja i na energetsku efikasnost. Veliki broj potrošača električne energije su uglavnom asinhroni i sinhroni motori, koji pokreću veliki broj ventilatora, pumpi, mlinova za ugalj, transportnih

uređaja i sistema i slično. Snaga sopstvene potrošnje u termoelektranama kreće se opsegu [6], [7]:

$$N_{sp}=(0,05\div 0,1)N_{nom}, \quad (1)$$

gdje je N_{nom} - nominalna snaga generatora.

Za TE Ugljevik I, sopstvena potrošnja (normativna vrijednost) iznosi $N_{sp}=0,07\cdot 300=21$ MW, dok je stvarna eksploataciona za period 2004. do 2016. godina bila u opsegu 0,0718 (2011. god.) do 0,095 (2006. god.) od N_{nom} , [1], [4]. Prosječna vlastita potrošnja u dosadašnjoj eksploataciji TE Ugljevik iznosila je 0,0825 od N_{nom} .

U okviru segmenta upravljanja i kontrole kvaliteta uglja na površinskom kopolu potrebno je definisati konceptualni model upravljanja kvalitetom uglja, a zatim odgovarajući simulacioni model sa razvijenim pratećim softverskim rješenjem, koje treba da omogući brzu simulaciju, s ciljem sagledavanja nivoa ispunjenja planiranih i zahtijevanih uslova vezanih za homogenizaciju uglja, odnosno definišu potrebne mjere energetske performansi površinskog kopa u odnosu na raspoložive resurse uglja u ležištu, a sve na osnovu praćenja i upravljanja kvalitetom isporučenog uglja termoelektranama, [1]-[3]. Što se tiče dijela vezanog za utvrđivanje energetske efikasnosti u mreži i pogonima (motorima) postrojenja i uređaja termoelektrane i površinskog kopa potrebno je početno definisanje gubitaka aktivne energije i inicijalna analiza ušteta u troškovima za električnu energiju kroz smanjenje potrošnje reaktivne energije, dostizanjem ciljnog faktora snage - $\cos\varphi$. Mogući potencijali za uštede energetske efikasnosti predstavljaju primjena kompenzacije reaktivne snage, smanjenje napona u mreži napajanja motora 6 kV kroz korišćenje motora sa višim stepenom efikasnosti, kao i primjenom frekventnih regulatora za pogon motora, tamo gdje se zahtijeva rad sa promjenljivom brzinom. Segment analize vezan za postojeće građevinske objekte daje metodologiju za unapređenje energetske efikasnosti, koja u poslovnim zgradama podrazumijeva kontinuirani i širok obim procesa i aktivnosti s ciljem smanjenja potrošnje svih vrsta energije uz iste ili bolje radne uslove u poslovnim prostorima, a na bazi primjene odgovarajućih direktiva EU, zakonske legislative na nivou BiH i Republike Srpske, kao i prateće legislative (pravilnici, standardi, uredbe, kao i investiciono-tehnička dokumentacija, npr. arhitektonsko-građevinski projekti izvedenog stanja objekata i projekti instalacija.

C. E^3 modeliranje energetske sistema

Planiranje kompleksnog energetske sistema predstavlja kontinuiranu aktivnost koju je potrebno stalno razvijati i nadograđivati u skladu sa zahtjevima vezanim principe sigurnog i pouzdanog snabdijevanja energijom krajnjih korisnika. Kako se energetski sistem sastoji od velikog broja međusobno povezanih proizvodnih i distributivnih subjekata, neophodna je logistička informatička podrška i razvoj pratećih programa za analizu i optimizaciju primijenjenih modela za planiranje, zasnovanih na pratećim matematičkim algoritimima i bazama podataka, kao i rješenja baziranih na E^3 modelu: energija-ekonomija-ekologija (eng. EEE: Energy-Ecology-Economy), koji imaju mogućnost istovremenog sagledavanja pitanja vezanih za energetiku, ekologiju i ekonomiju.

Primijenjeni modeli za planiranje trebaju dodatno omogućiti i složene analize, kao što su to trgovina energijom i emisijama između više povezanih nacionalnih energetskih sistema. Proces planiranja obuhvata niz međusobno povezanih aktivnosti, počev od sakupljanja i obrade podataka, izrade scenarija i prognoza potrošnje energije i konačno primjene modela za planiranje. Svaki model baziran je na matematičkim i ekonomskim osnovama, što implicira da se energetsko planiranje definiše kao procjena i pronalaženje načina izjednačavanja ponude i potražnje za energijom, uz sagledavanje svih ekonomskih (socijalnih) i ekoloških ograničenja. Pri tome, prilikom postavljanja dugoročnih prognoza potrošnje energije najčešće se polazi od polaznih ekonomskih parametara, kao što su to promjena bruto domaćeg proizvoda, kretanje broja stanovnika, ekonomske politike i sl., gdje je svaka promjena parametara značila i potrebu ponavljanja analize potrošnje energije. Pojava naftne krize iz 70-tih godina prošlog vijeka predstavlja zaokret u razmišljanju vezanim za rizike smanjenja raspoloživosti energetskih izvora, kao i rasprave oko primjene nuklearne energije za pokrivanje potreba za energijom, čime se stvara podloga za razvoj modela sa mogućnosti prikazivanja tehničko-tehnoloških promjena unutar energetskog sistema.

Uvođenjem analize emisije stakleničkih gasova počinje primjena prvih dinamičkih optimizacijskih linearnih modela. Dodatni razvoj i primjena modela nametnuo je potrebu analize utjecaja energetskog sistema na privredu i ekonomiju zemlje, što je za rezultat imalo jedinstveni hibridni model, nastao kombinacijom inženjerskog i ekonomskog modela. Postoje različite mogućnosti korišćenja pojedinih modela za planiranje energetskog sistema i njegovih pojedinih radnih cjelina, počev od analiza uticaja između zemalja ili teritorijalnih segmenata (entiteta) unutar jedne zemlje (međusobna različitost u klimatskim obilježjima, propisima koji se odnose na emisije stakleničkih gasova, raspoloživosti energetskih izvora, mogućnostima uvoza/izvoza energije i karakteristikama potrošnje), pa preko analiza novih energetskih tržišta i tehnologija, uz sagledavanje posljedica primjene poreza, subvencija i regulacije na tržištima, zatim uticaja uklanjanja subvencije na određeni energent u energetskom sistemu, kao i proračunu emisija stakleničkih gasova i njihov uticaj na sistem (mjere za smanjenje emisija, ograničenja na količinu emisija, međunarodne obaveze poput Kyoto protokola, Pariskog sporazuma, trgovanje emisijama i sl.). Značajnu primjenu ovi modeli imaju i kod izrada studija i planova razvoja i strategije, analiza diverzifikacije energenata, sagledavanje ekonomskog i ekološkog uticaja, primjena novih tehnologija za proizvodnju i potrošnju energije, povezivanje i međudjelovanje energetskog sistema sa privredom, kao i posljedice uvođenja ili prestanka pogona nuklearne elektrane na sistem, uz analizu uticaja mjera na strani potrošnje energije na mjere na strani proizvodnje energije i obratno. Kako se modeli za planiranje koriste se za rješavanje složenih problema, uz potrebu osiguranja velike količine podataka, a najčešće zahtijevaju i razmatranje više različitih scenarija događaja unutar sistema, neophodno je osiguranje jednostavnosti njegovog korišćenja, uz istovremeno osiguranje sveobuhvatnosti radi detaljnog prikaza posmatranog problema, kakav je povećanje energetske efikasnosti u procesu transformacije primarnih u korisne oblike energije. Osnovno pravilo za dobro postavljeni model

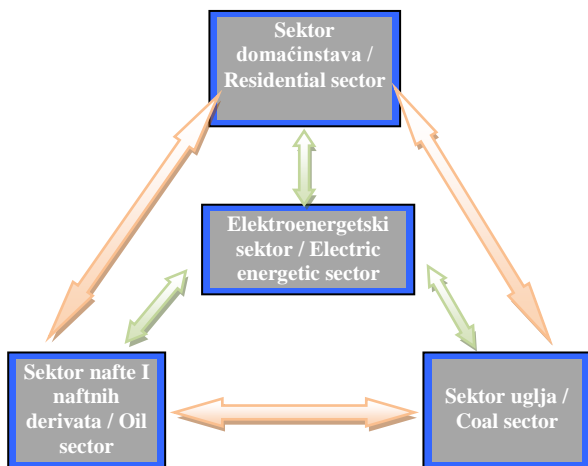
je njegova razumljivost, kvalitet dobijenih rezultata zavisi direktno od iskustva korisnika modela i kvalitete ulaznih podataka. Kriteriji prema kojima se modeli međusobno razlikuju prikazani su u okviru Tabele 1.

TABELA I. PRIKAZ KRITERIJUMA ZA RAZLIKOVANJE POJEDINIH MODELA I PROCESA MODELIRANJA

Kriterijum	Opis ili obuhvat kriterijuma
Nivo analize pristupa, vremenskog razdoblja i složenosti problema	<ul style="list-style-type: none"> - Teritorijalna podjela: globalna, međudržavna, nacionalna, teritorijalna podjela unutar jedne zemlje, lokalna; - Korisnici modela: međunarodne institucije i organizacije, nacionalne institucije, kompanije, pojedinci; - Vremensko razdoblje: jako dugoročni (>50 godina), dugoročni (20-30 godina), srednji (1-5 godina), kratki (dani i sedmice), vrlo kratki (nekoliko sati); - Složenost problema: prema vrstama energije, teritorijalnoj podjeli, funkciji cilja koja se u slučaju linearnih modela može sastojati od jedne ili više parametara
Analizirani dio energetskog sistema	<ul style="list-style-type: none"> - Strana potrošnje energije, sa modeliranjem u nekoliko pristupa: <ul style="list-style-type: none"> a) pristup odozgo prema dolje (eng. top-down approach), koji opisuje potrošnju energije na bazi nekoliko osnovnih parametara, uz korišćenje statističke analize za pronalaženje relacije između korišćenih indikatora (npr. potrošnja energije je funkcija broja stanovnika, BDP, cijene, itd.), pa je ovakav pristup pogodniji za kratkoročne analize, budući u kratkom vremenskom razdoblju nema većih promjena u parametrima; b) pristup odozdo prema gore (eng. bottom-up approach), koji koristi detaljniji pristup, zahtijeva više podataka, uzima u obzir političke odluke i modelira tehničke promjene, pa je ovakav pristup bolji za dugoročne analize; c) u stvarnosti se koriste kombinacije oba pristupa, na način da se pristup odozgo prema dolje koristi za postavljanje prognoza potrošnje energije, što se dodatno kombinuje sa modelom za analizu potrošnje energije - pristup odozdo prema gore, - Strana proizvodnje energije, - Kombinovani prikaz strane potrošnje i proizvodnje energije, tzv. ravnotežni pristup (eng. equilibrium modelling)
Proces modeliranja	Obuhvat procesa modeliranja
Postavljanje pretpostavki	<ul style="list-style-type: none"> - definisanje ulaznih podataka (formirana baza podataka), - odabir detaljnosti prikaza problema
Definisanje modela	<ul style="list-style-type: none"> - kalibracija bazne (početne) godine (postavljanje parametara u modelu tako da rezultat proračuna za baznu godinu odgovara stvarnim podacima iz energetskog bilansa ili vremenske serije podataka), - definisanje scenarija (najčešće 3, optimistički, pesimistički i srednji scenarij razvoja ili planiranja), - izrada prognoze potrošnje energije za svaki od scenarija, - analiza osjetljivosti dobijenih rezultata
Konsultacije sa korisnicima rezultata modela	<ul style="list-style-type: none"> a) pravilno tumačenje rezultata proračuna, b) prezentacija rezultata u javnosti, c) primjena rezultata u praksi, d) monitoring primjene i, eventualna, poboljšanja ili korekcije modela

Osnova svakog modela za planiranje predstavlja integrisani pristup modeliranju, kao bilansna kategorija međudjelovanja sektora potrošnje (potražnje) i proizvodnje (ponude) energije, odnosno povratne veza između cijene i

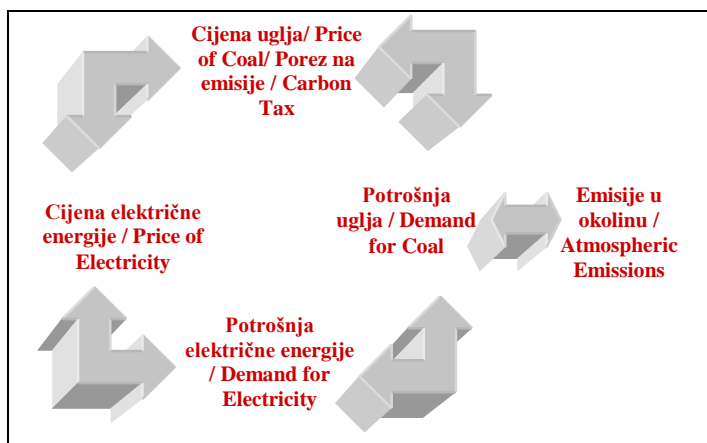
potrošnje energije. Međudjelovanje sektora potrošnje i proizvodnje energije omogućuje posmatranje uticaja koje određena promjena u potrošnji energije na "vrhu" mreže ima na sve podsektore prema njenom "dnu", slika 1. Isto tako vrijedi i princip suprotnog smjera tj. da promjene u proizvodnji energije (npr. zbog ograničenja energetske resursa) imaju za posljedicu promjene u potrošnji energije, [1]-[6]. Integrisani pristup modeliranju omogućuje i sagledavanje povratne veze između cijene i proizvodnje (potrošnje) energije i samim time emisija u okolinu, slika 2. Svaki model zasnovan je na matematičkim postavkama ekonomskih funkcija ponude i potražnje.



Sl. 1. Integrisani pristup modeliranju energetskeg sistema, [1], [17]

D. Optimizacija radnih parametara tehnološkog procesa proizvodnje električne energije termoelektrane

U principu se razlikuju dvije, tehnološki međusobno povezane principijelno različitim fizičko-hemijskim procesima proizvodnje, grupe opreme: elektrotehnička i termomehanička. U prvoj grupi se mehanički rad transformiše u električnu, a u drugoj grupi se hemijska energija goriva ili toplota dobijena pri dijeljenju atoma ili kinetičke energije pada vode transformiše u mehanički rad.



Sl. 2. Integrisani pristup povratne veze između cijene, potrošnje energije i emisija, [1], [17]

Postavljanje mogućeg zadatka za određivanje svojstava pouzdanosti nije jednoznačan proces. On najčešće ide u dva samostalna različita pravca. Osnovni postulat prvog pravca zasnovan je na činjenici da sastavna oprema i postrojenja složenog energetskeg sistema predstavljaju jednoznačno određenu cjelinu, čija pouzdanost se ocjenjuje na bazi rezultata ispunjenosti zadatih funkcija bez učešća fizičkih i hemijskih procesa. U tom slučaju ocjene ili prognoze svojstava pouzdanosti ocjenjuju se standardnom vjerovatnosnom lepezom pokazatelja. Sumarni kriterijumi za složene sisteme termoelektrana i termoelektrana-toplana u tabelarnom pregledu, Tabela 2. Pored pojmova u određenim kriterijalnim grupama postavljene su strelice sa značenjem: ↑- težiti povećanju; ↓- težiti smanjenju.

TABELA II. KRITERIJUMI ZA TERMOENERGETSKA POSTROJENJA TERMOELEKTRANA, [13]

1. Energetska efikasnost
↑ ⊕ Razmjena toplote
↑ ⊕ Prelaz i prenos toplote
↓ ∅ Sopstvena potrošnja energije
↓ ∅ Gubici u tehnološkom procesu
↓ ∅ Gubici toplote
2. Ekonomičnost
↓ ∅ Specifična potrošnja toplote
↓ ∅ Cijena goriva
↓ ∅ Investiciona ulaganja u postrojenja i objekte
↓ ∅ Cijena pogonskih materijala
↓ ∅ Zaposleni personal-normativ po instalisanom MW
↓ ∅ Cijena održavanja postrojenja i građevinskih objekata
3. Raspoloživost i pogonska spremnost
↑ ⊕ Obezbjedenje materijalnih potreba (po količini; na vrijeme)
↑ ⊕ Fleksibilnost u promjeni snage
↑ ⊕ Sigurnost i pouzdanost postrojenja (materijal, nadzor)
↓ ∅ Problemi koji zavise od goriva i od cijelog tehnološkog procesa
4. Uticaj na životnu sredinu (okolinu)
↓ ∅ Emisija štetnih materija
↓ ∅ Otpadne vode (zaprljanje, termičko opterećenje)
↓ ∅ Sporedni produkti: pepeo, šljaka, produkti odsumporavanja, mulj dekarbonizacije i drugo, tj. korišćenje, deponije

Najveći i osnovni varijabilni trošak u okviru složenog sistema termoelektrane predstavlja trošak goriva, pa njegova ekonomija ima izuzetan značaj na ukupne troškove i cijenu jedinice proizvoda. Ostali važniji troškovi odnose se na pripremu vode, rezervne dijelove i materijale za održavanje postrojenja (održavanje nivoa pouzdanosti), plate zaposlenih radnika, zakonske obaveze prema državi i dr. Poseban i karakterističan trošak termoelektrane predstavlja vlastita potrošnja električne energije koja se troši u elektrani za pogon pomoćnih postrojenja (mlinovi, ventilatori, pumpe, HPV, DPU i dr.) i rasvjetu.

U okviru druge grupe zadataka u obzir se uzimaju tokovi izmjene primarnog oblika energije. Pouzdanost se određuje po determinističkim pokazateljima promjene svojstava materijala iz kojih su objekti izgrađeni, uzajamnog dejstva radne sredine i drugih faktora koji utiču na promjene primarne energije. Ovaj prilaz u opštem slučaju ne isključuje svojstva pokazatelja pouzdanosti dobijenih na bazi rješavanja prve grupe zadataka. Ocjena nivoa pouzdanosti, kao i samo upravljanje na bazi pouzdanosti dovodi do analize i sinteze uzoraka promjene

vrijednosti pokazatelja pouzdanosti sa kojima se karakteriše bezotkaznost, pogodnost za remont, dugovječnost (osnovni eksploatacioni vijek), mogući revitalizovani period eksploatacije (dopunski eksploatacioni vijek).

Šema pouzdanosti složenog termoenergetskog sistema u opštem slučaju svodi se na vezu njegovih najvažnijih elemenata: parnog kotla, cjevovoda pare, izmjenjivača toplote, parne turbine, električnog generatora i napojnih pumpi. Da bi se detaljnije sagledao radni proces termoelektrane, neophodno je imati predstavu o tehnološkoj šemi i sastavu opreme termoelektrane. u kojoj se koristi čvrsto gorivo (ugalj). Tehnološka šema kondenzacione termoelektrane (KO-TE) ima principijelno definisana dva toka materija, koji učestvuju u tehnološkom procesu: gorivo (npr. ugalj) - vazduh - produkti sagorijevanja (dimni gasovi, šljaka, pepeo) i napojna voda (turbinski kondenzat, dodatna hemijski pripremljena voda (demineralizovana), unutrašnji povratni kondenzat, vanjski povratni kondenzat od toplotnih potrošača) - svježa para - kondenzat. Uslovno, može se reći da postoji i treći zaseban tok, odnosno cirkulacioni krug rashladne vode. Kao što se vidi, prvi tok materije je otvoren, dok je drugi zatvoreni cirkulacioni sistem. Bazna osnova na kojoj se zasniva optimalna i sigurna proizvodnja, korišćenje energije za vlastite potrebe, a time i energetska efikasnost su sljedeće: optimizacija radnih parametara tehnološkog procesa proizvodnje električne energije, energetska sigurnost, konkurentnost proizvoda i usluga, održivost korišćenja energije, organizovano upravljanje energijom, ekonomsko isplative mjere energetske efikasnosti, kao i minimalni zahtjevi energetske efikasnosti.

Optimizacija tehnološkog procesa proizvodnje električne energije u termoelektrani je polazna osnova energetske efikasnosti termoelektrane, a postiže se mjerenjem, ispitivanjem i podešavanjem tehnoloških parametara svake etape procesa proizvodnje pri svim režimima rada i svakom opterećenju. Nakon navedenih radnji slijede analize i kao rezultat analiza je postavka optimalnog režima rada, koji podrazumijeva najveću energetska efikasnost tehnološkog procesa i održavanje istog u što dužem vremenskom ciklusu. Kako bi optimalni režim rada bio održiv i mogao da se efikasno prati neophodna je izrada prateće režimske karte kao informatora optimalne eksploatacije. Bitan faktor kontrole energetske efikasnosti je kvalitetno praćenje parametara procesa u kontinuitetu i svakodnevne analize, kako bi se evidentirali, a potom i eliminisali svi uticaji koji uzrokuju ne stacionarne režime i dovode do poremećaja proizvodnog ciklusa. Da bi se optimizacija uspješno realizovala teoretski su razrađene i u praksi primijenjene razne metode i načini njihove realizacije. Osnova svih metoda je dobra organizacija i pravilno definisanje realizacije u procesu proizvodnje, primjena vlastitih iskustava i iskustava drugih, kontinuirano praćenje i detaljna analiza radnih parametara medija procesa i energenata koji se koriste za proces, kao i njihovo podešavanje optimalnim trenutnim uslovima koji su u funkciji same termoelektrane i hjerarhijski nadređenog elektroenergetskog sistema (EES). Za realizaciju optimizacije mjerljivih parametara termoelektrane i procesa, s ciljem dostizanja

maksimalne energetske efikasnosti uz minimalne troškove, neophodno je imati kvalitetan i stručan proizvodni kadar, opremljenu laboratoriju savremenom opremom za mjerenja i ispitivanja, kao i dobru opremljenost bloka termoelektrane sa kvalitetnom upravljačkom i regulacionom opremom (regulaciona i upravljačka oprema mora biti visoke tačnosti osjetljivosti). Takođe, kao prednosti u literaturi se navode egzistiranje što većeg stepen automatizacije tehnološkog procesa proizvodnje električne energije i stepena automatizacije pripreme energenata i utroška energije za vlastite potrebe. Dobra organizacija i pravilno definisanje realizacije u procesu proizvodnje podrazumijeva timski rad, pravilan odabir stručnog tima i harmoniju u radu. Tu ne treba zaboraviti ni stručnost i odgovornost učesnika realizacije programa optimizacije radnih parametara radnih fluida (medija) tehnološkog procesa proizvodnje električne energije. Članovi stručnog tima moraju biti stručni u svom domenu radnih zadataka, poznavati eksploatacionu problematiku tehnološkog procesa i imati afinitet i posjedovati etičnost.

Metodologija rada i funkcionisanja stručnog tima zasniva se na modelima pristupa strukturi parametara, načinu analize i sprovođenja u praksi postignutih rezultata (obuhvatajući ugalj kao osnovno i naftu i naftne derivate kao pomoćno gorivo), uz racionalan i ekonomičan tehnološki proces. Stručni timovi, koji bi isključivo radili na optimizaciji, moraju biti stalno ili privremeno organizovani u termoelektrani, zavisno od problematike koja prati proces proizvodnje električne energije. Takva organizacija posla u praksi je primjenljiva i daje rezultate pogotovu u termoelektranama, koje koriste nisko kalorične ugljeve promjenljivog kvaliteta kao osnovno gorivo. Model organizovanja stručnih timova za optimizaciju parametara tehnološkog procesa proizvodnje električne energije za TE Ugljevik I prikazan je na slici 3. Stručni timovi u svom sastavu treba da imaju specijaliste inženjere sa iskustvom za svaku oblast procesa, iskusne manipulante procesa proizvodnje i specijaliste tehničare za mjerenja. Brojno stanje zavisi od obima programa optimizacije, pri čemu kostur ekipe mora biti stalan. Stručni timovi treba da su opremljeni kvalitetnom mjernom, laboratorijskom i opremom za uzimanje uzorka. Priključci za opremu uzorkovanja i posebna mjerenja se ugrađuju po standardima BAS ISO za termotehniku i termoenergetiku. Glavni inženjer je inženjer specijalista iz oblasti energetske postrojenja za termo elektrane, koji posjeduje teoretska znanja iz oblasti termotehnike i termoenergetike, sa dobrim poznavanjem eksploatacione problematike tehnološkog procesa termo elektrane. Poželjno je da posjeduje sklonosti primjene naučnih dostignuća u praksi, da ima autoritet među saradnicima i sposobnost dobre organizacije.

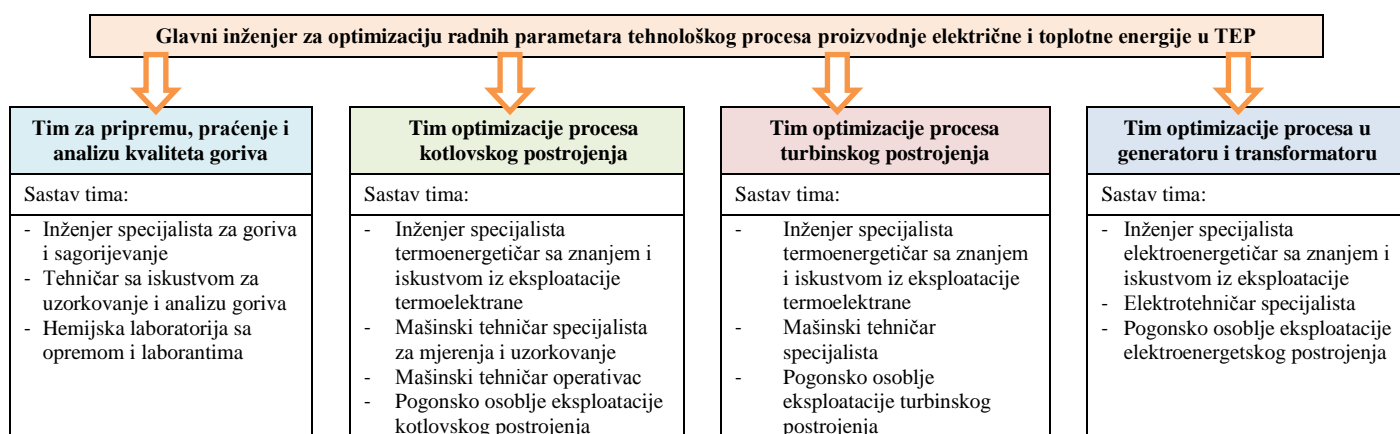
E. Način realizacije modela organizovanja optimizacije radnih parametara

Optimizacija radnih parametara tehnološkog procesa termoelektrane može se grupisati po postrojenjima ili dijelovima proizvodnog procesa i posmatrati kao jedinstven tehnološki proces termoelektrane od ulaza - ulazni medij (ugalj, voda, vazduh, mazut, hemikalije i sl.) do izlaza - izlazni rezultat (električna energija, tehnološka para, toplotna energija). Ukoliko posmatramo tehnološki proces kao

jedinstvenu cjelinu kao ulazni mediji su: ugalj kao osnovno gorivo i nosilac energije, vazduh potreban za sagorijevanje, izvor toplote za potpalu osnovnog goriva i voda kao radni fluid.

Energija ulaznih medija pod određenim i definisanim okolnostima i uslovima uz odvijanje više raznih procesa se transformiše u druge korisne oblike. Tako se medij voda pri razmjeni toplotne energije iz dimnih gasova i ostatka sagorijevanja transformiše u vodenu paru odnosno stanje pregrejane pare. Mjesto odvijanja ovih procesa je u postrojenjima kotla bloka. Procesi koji se odvijaju u parnom kotlu bloka su kompleksni i isprepleteni sa mnogo spoljašnjih uticaja i sa velikom mogućnosti optimizacije parametara tehnološkog procesa. Sledeća transformacija energetske stanja je podizanje istog na viši nivo kinetičke energije

pregrejane pare, uz odvijanje procesa transformacije ovih vidova energije u mehanički rad (parna turbina). Krajnji rezultat tehnološkog procesa termoelektrane predstavlja proces transformacije mehaničkog rada u električnu energiju (generator). Ugalj koji sagorijevaju u ložištu parnog kotla bloka termoelektrane Ugljjevik je nisko kaloričan čiji organski i mineralni sastav stvara nepovoljne uslove za sagorijevanje. Ovaj ugalj ima veliki sadržaj vlage i pepela, relativno nisku toplotnu moć, loše paljenje i nestabilno sagorijevanje, kao i nisku tačku topljenja pepela. Spada u grupu ugljeva koji su jako prljajući i šljakajući, što izaziva pri sagorijevanju stalno zašljakivanje ekrana ložišta i zaprljanje ogrevnih površina kotla zagrijača vazduha te veliko oslobađanje pepela i toksičnih gasova (oksidi: azota, sumpora, ugljika i sl.).



Sl. 3. Prikaz organizacione šeme modela organizovanja timova za optimizaciju radnih parametara tehnološkog procesa proizvodnje električne energije u TE Ugljjevik I, [1] i [4].

Posebna uticaj u tehnološkom procesu proizvodnje korisnog oblika energije u TE Ugljjevik I ima pripremljenost uglja za proces sagorijevanja od površinskog kopa rudnika, preko dopreme i pripreme uglja na deponijama termoelektrane i transporta do bunkera kotla bloka, zatim mljevenje uglja u mlinovima kotla bloka TE, priprema ugljene prašine, transport kroz kanale aerosmješe i gorionike do ložišnog prostora kotla, kao i obezbjeđenje povoljnih uslova za proces sagorijevanje u ložištu kotla bloka termoelektrane, gdje se hemijska energija goriva transformiše u toplotnu energiju produkata i ostatka sagorijevanja. Za stvaranje optimalnih uslova za pripremu uglja za proces sagorijevanja i način realizacije zadužen je tim za pripremu, praćenje i analizu kvaliteta goriva. Zadatak ovog tima je da: uspostavi kontinuitet u saradnji sa proizvodnjom uglja rudnika, odnosno timom za optimizaciju kotlovskog postrojenja, izradi tehnološku kartu prijema i odlaganja uglja na deponijama termoelektrane, saradjujući sa stručnim timom proizvodnje uglja rudnika, radi na ujednačavanju kvaliteta uglja kroz njegovo miješanje i pravilno odlaganje na deponijama termoelektrane, organizovano i usklađeno vrši punjenje bunkera i održavanje nivoa uglja u bunkerima, vrši automatsko uzorkovanje uglja iz bunkera kotla bloka, kao i da izradi tehničku i elementarnu analizu sa karakteristikama

pepela u uglju. Tehnološka karta prijema i odlaganja uglja na deponijama termoelektrane treba da sadrži: dinamiku prijema uglja sa rudnika i odlaganja na deponijama termoelektrane za svaki dan, određivanjem kvaliteta i količina, dinamiku uzimanja uglja sa deponija termoelektrane i punjenje bunkera kotla po kvalitetu i količinama, prema potrebama tehnološkog procesa u kotlu bloka, tehničku i elementarnu analizu uglja sa rudnika i odloženog na deponijama termoelektrane, kao i elementarni sastav pepela u uglju i njegove karakteristike na deponijama termoelektrane.

Dalji tok optimizacije se odnosi na pripremu i uslove rada mlinskog postrojenja. Mlinско postrojenje sa aspekta uravnotežene cjeline i optimalnog korišćenja toplotne energije predstavlja integralni dio kotlovskog postrojenja. U sastav mlinskog postrojenja na TE Ugljjevik I ulaze bunker parnog kotla bloka termoelektrane, dozatori za ugalj, dodavači za ugalj, ventilacioni mlinovi sa separatorima i Raugas kanali za sušenje uglja i kanali aerosmješe iza mlinova do gorionika kotla, kao i ostala prateća oprema za upravljanje i regulaciju. Savremena kotlogradnja i težnja ka maksimalno ekonomičnom sagorijevanju ugljeva različitih kvaliteta doveli su do konstruisanja energetske jedinice velikih kapaciteta, kod kojih su mlinска postrojenja jedinstveni tehnološki sistemi sa maksimalno izbalansiranim tehničkim i ekonomskim

efektima. Podešavanje, praćenje i analize stanja mlinskog postrojenja je u domenu Tima optimizacije kotlovskeg postrojenja s ciljem obezbeđenja optimalnih uslova za paljenje i sagorijevanje ugljenog praha u ložištu parnog kotla bloka. Specijalisti iz tima pri podešavanju, praćenju i analizi parametara mlinskog postrojenja u svoju svakodnevnu dokumentaciju unose:

- finoću uglja u dozatorima i dodavačima uglja mlinova, regulaciju sloja uglja na dozatorima i dodavačima;
- vrijeme rada radnih kola mlinova (h);
- količine električne energije za vlastite potrebe mlinskog postrojenja (kWh);
- usklađenost brzina dozatora i dodavača sa kapacitetom mlinova, količinu sprasenog uglja (t/h);
- količinu gasova iza mlina (m^3/h);
- pritisak i temperatura aerosmješe ($mbar, ^\circ C$);
- hemijske analize ugljene materije, hemijske analize pepela, finoća sprasenog uglja (ostatak na sitima: R0.09, R0.2, R1.0) u (%);
- istrošenost radnih elemenata mlinova (t/h);
- podešenost separatorskih lopatica mlinova;
- raspodjelu ugljenog praha po nivoima gorionika (%);
- brzine medija na ulazu i izlazu gorionika uglja u ložištu kotla bloka (m/s).

Za proračune i ocjenu funkcije postrojenja za mljevenje neophodno je poznavati sklonost usitnjavanja ugljene materije koja se melje. Zbog značaja procesa u ložištu parnog kotla bloka (proces sagorijevanja uglja, proces razmjene toplotne energije i transformacije), važan faktor je poznavanje i upravljanje procesom. Tada je tek moguća optimizacija procesa. Vrlo je aktuelno u ovim procesima stvaranje naslaga na grejnim površinama, lošije sagorijevanje ugljenog praha i nepotrebna potrošnja tečnog goriva za potporu plamena tokom sagorijevanja. Kako bi se spriječili ovi problemi, neophodno je utvrditi uslove koji vladaju u ložištu parnog kotla bloka. Praćenje, podešavanje i analizu parametara vrše specijalisti iz tima za podešavanja kotlovskeg postrojenja. Na bazi postignutih parametara u parnom kotlu omogućuje se postizanje optimuma za različite režime rada bloka termoelektrane. Pri tome, praćenje, podešavanje i analiza radnih parametara u parnom kotlu (generatoru pare) obuhvata: koeficijent viška vazduha u ložištu parnog kotla bloka, temperatura gasova i plamena u ložištu parnog kotla bloka, toplotne flukseve u ložištu parnog kotla bloka, primarni toplotni fluks na ekranskim i pregrijačkim grejnim površinama, rad sistema čišćenja grejnih površina parnog kotla bloka, kvalitet razmjene toplotne energije u kotlovskim grejnim površinama na radni medij (membransko ložište, pregrijački dio), regulaciju primarne i sekundarne pare, prisisavanja štetnog vazduha u parnom kotlu bloka (od ložišta do elektrostatskog filtera), rad zagrijača vazduha i razmjenu toplotne energije u istom, efikasnost elektrofilterskog

postrojenja, kvalitet i kvantitet svježeg vazduha za sagorijevanje goriva (primarni i sekundarni vazduh), stepen iskorišćenja parnog kotla, kao i uticaj rada na ekologiju.

Za proces proizvodnje električne energije u termoelektrani uticajni faktor su procesi u turbinskom postrojenju, što zahtijeva dodatnu optimizaciju tih procesa, na čemu treba da radi tim za podešavanje turbinskog postrojenja. Pod turbinskim postrojenjem podrazumijeva se parna turbina, zajedno sa pomoćnim pratećim sistemima i uređajima. Gledano preko zatvorenog kružnog termodinamičkog ciklusa, u turbini se odvija ciklus ekspanzije pregrejane pare i izvršenje mehaničkog rada, potom kondezacija pare u turbinskom kondezatoru pomoću rashladne vode i podizanje temperature turbinskom kondezatu na viši nivo kroz sistem regeneracije.

Gledano sa stanovišta stepena iskorišćenja bloka termoelektrane, u ovom dijelu procesa su ostvareni i najveći gubici. Podešavanjem i optimizacijom parametara može se ostvariti bolje iskorišćenje toplotne energije procesa. Zato je važno da specijalisti iz tima svakodnevno rade na podešavanju režima pri raznim opterećenjima, uz praćenje i analizu parametara i veličina, kao što su: vakuum u turbinskom kondezatoru, toplotne stepene korisnog dejstva rashladnog sistema turbinskog kondezatora, sistema regeneracije niskog i visokog pritiska, gubitke električne energije za vlastite potrebe turbinskih postrojenja, bruto i neto stepen iskorišćenja turbinskog ciklusa, bruto i neto stepen iskorišćenja termoelektrane i sl.

Kao završna faza procesa proizvodnje električne energije termoelektrane je etapa pretvaranje mehaničkog rada ostvarenog u turbinskom ciklusu u električnu energiju generatora bloka termoelektrane, zatim transformacija i prenos električne energije u hijerarhijski viši elektroenergetski sistem. Bitno je spomenuti da optimizaciju parametara ovog dijela proizvodnog ciklusa vrši tim za podešavanje generatora i transformatora uz potpunu sinhronizaciju sa ostalim timovima. Rezultat timskog rada optimizacije je izrada programa podešavanja i optimizacije tehnološkog procesa, sa jasno definisanim ciljevima, zadacima i sinhronizacijom rada. Prethodno se definišu pripremni radovi (koji prethode osnovnim radovima), načini realizacije i očekivani rezultati nakon sprovedene optimizacije. Program ispitivanja izrađuje vođa timova u saradnji sa specijalistima timova. Pri tome pripremno-organizacioni radovi obuhvataju: upoznavanje timova sa tehničkom dokumentacijom (projektna, fabrička i ispitivačka), proučavanje i analiza snimljenih eksploatacionih radnih karakteristika bloka (garantna ispitivanja, ispitivanja tokom eksploatacije, ispitivanja po nalogu inspeksijskih organa, remontna ispitivanja i sl.), kao i izradu programa rada timova za svaku cjelinu organizacione šeme podešavanja i optimizacije parametara tehnološkog procesa.

Program tačno definiše vrstu ispitivanja (režimsko podešavajuća ili bilansna ispitivanja), svrhu ispitivanja, prateće načine mjerenja, korišćenje dijagnostičke ili mjerne tehnike. Program ispitivanja i podešavanja treba da obuhvati sve režime rada koje usaglasi vođa timova sa specijalistima kotlovskeg i turbinskog postrojenja sa ciljem racionalizacije i

optimizacije, režimska opterećenja bloka termoelektrane, vremenski period sprovođenja radova iz programa, obezbjeđenje bezbjednosnih i sigurnosnih uslova sprovođenja, mjerna mjesta sa šemom i instrumentima za mjerenja, radnje i mjerenja koja je potrebno sprovesti, stroga evidencija svih sprovedenih operacija, zadatke i obaveze članova timova, sinhronizaciju radnji u vrijeme sprovođenja programa, kao i popisne liste svih parametara i veličina. Nakon realizacije programa treba da uslijede detaljne analize vrijednosti parametara i veličina režima tehnološkog procesa, kako bi se definisao što bolji i efikasniji konačan prijedlog konkretnih mjera po izvršenim analizama.

F. Klasifikacija i opšte karakteristike ispitivanja u cilju postizanja stacionarnih režima i optimizacije proizvodnje

Termičko tehnička ispitivanja bloka termoelektrane grupišu se u dvije osnovne grupe, u zavisnosti od postavljenih zadataka.

Prva grupa obuhvata ispitivanja koja imaju za cilj određivanja energetskih karakteristika rada bloka termoelektrane pri optimalnim režimima rada. Ova ispitivanja imaju za cilj određivanja energetskih (toplotno tehničkih) karakteristika, pojave u eksploataciji i nedostatke konstruktivnih rješenja.

Druga grupa ispitivanja se koriste za istraživačke radnje u cilju provjere projektovanih veličina konstrukcionih rješenja i njihovih elemenata. Ispitivanja iz prve grupe, zavisno od cilja i svrhe, grupišu se u tri kategorije složenosti.

Prva kategorija složenosti se odnosi na normativna (garantna) ispitivanja, koja se sprovode odmah po završetku probnog pogona termoelektrane i stabilizacije proizvodnje. Ovim ispitivanjima se provjeravaju garancijski parametri i veličine garantovane u projektu i utvrđuju stvarne vrijednosti. Određuju se karakteristike, kao što su: specifični utrošak toplote, vlastita potrošnja električne energije, vlastita potrošnja toplotne energije, stepen iskorišćenja parnog kotla (generatora pare), stepen iskorišćenja turbine i stepen iskorištenja bloka TE u cjelini. Ova ispitivanja se sprovode pri nominalnom opterećenju, radu na tehničkom minimumu i maksimalnom opterećenju, koje je projektom dato. Normativna (garantna) ispitivanja sprovode ovlašteni instituti sa licencom. Dobijeni rezultati se koriste za planiranje proizvodnje i u svrhu tehnokonomskih analiza eksploatacionih veličina i parametara bloka u tekućoj eksploataciji preostalog radnog vijeka termoelektrane.

Druga kategorija složenosti se odnosi na bilansna (eksploataciona) ispitivanja, a cilj im je utvrđivanje normativnih karakteristika. Ovaj vid ispitivanja se sprovodi i pri promjeni goriva u kotlu i nemogućnosti postizanja nominalnih parametara. Zadaci ovih ispitivanja obuhvataju: pokazivanja optimalnih uslova rada pri raznim opterećenjima u dijapazonu automatske regulacije, definisanje bez promjena maksimalne i minimalne snage uz promjenljiv rad pomoćne opreme, određivanje stvarne ekonomske efikasnosti uz utvrđivanje svih toplotnih gubitaka, pokazivanje uzroka značajno povišenih gubitaka toplote iznad proračunskih uz razradu mjera za njihovo smanjenje i dovođenje u računске okvire, provjera rada pojedinih elemenata i dijelova

postrojenja bloka termoelektrane, određivanje aerodinamičkih karakteristika gasno vazdušnog trakta kotlovskog agregata i njegovih pomoćnih mehanizama, kao i sastavljanje tipskih energetskih i računskih karakteristika pojedinih postrojenja bloka termoelektrane.

Treća kategorija složenosti se odnosi na režime podešavajućih ispitivanja i dovođenje istih u granice optimuma, najčešće po ekonomskom kriterijumu.

Osnovni cilj podešavanja režima rada je da obuhvati definisanje optimalnih pojedinačnih pokazatelja svih postrojenja bloka termoelektrane, kao što su: koeficijenta viška vazduha, finoće ugljene prašine, optimalna raspodjela vazduha po gorionicima u ložištu kotla, maksimalna snaga pri raznim sastavima opreme, minimalna vlastita potrošnja termoelektrane, temperature dimnih gasova u zoni sagorijevanja, izlazu iz ložišta i po zonama kotla, temperature radnog medija (voda, pregrejana para) po grejnim zonama kotla, vakum u kondezatoru turbine bloka, karakteristike rashladnog medija bloka termoelektrane, kao i karakteristike medija regeneracije turbine. Ispitivanja se provode za više režima rada sa ciljem optimizacije tehnološkog procesa i smanjenja troškova po proizvedenom kWh električne energije. Po trećoj kategoriji složenosti se sprovode i eksploataciona ispitivanja nakon tipskih kapitalnih remonata termoelektrane da bi se ocijenio kvalitet izvedenih remontnih radova.

Za razliku od ispitivanja prve i druge kategorije, gdje se određuje dovoljna tačnost po uslovima postavljenih zadataka apsolutnog značenja traženih veličina, treća kategorija se provodi uprošćenim metodama koje daju mogućnosti da se dobijeni rezultati mogu primijeniti za održavanje i nalaženje neophodnih optimalnih režima proizvodnje, što je sasvim dovoljno za eksploatacionu kontrolu rada opreme.

G. Metode realizacije skraćenog pregleda ispitivanja u toku eksploatacije termoelektrane

Stručni timovi optimizacije parametara procesa termoelektrane u osnovi svojih planova i programa rada do detalja razrađuju ispitivanja druge i treće kategorije složenosti. Podešavanjem režima rada, uz prateća ispitivanja, rad bloka termoelektrane tokom eksploatacije se dovodi u optimalne okvire. Skraćeni pregled primijenjenih ispitivanja u eksploataciji bloka termoelektrane, sa opisom aktivnosti, mjerenjima i pratećim proračunima dati su u okviru Tabele 3.

Osnovna razrada rezultata podešavanja i ispitivanja se odnosi na indirektno mjerene veličine, proračune električnih i drugih veličina i energetske karakteristike. Proračuni i rezultati ispitivanja kotla obuhvataju proračun toplotnog opterećenja kotla, proračun dovedene energije kotlu, proračun stepena iskorišćenja kotla, kao i uporedne analize stepena djelovanja kotla, sa i bez rada sistema čišćenja ogrijevnih površina kotla i sl. Proračun i rezultati ispitivanja turbinskog postrojenja i bloka u cjelini obuhvata proračun tokova pare kroz turbinu, bilanse unutrašnje snage turbine, bilanse količine kondezata, bilanse kondezatora, bilanse rashladnog tornja, specifičnu potrošnju toplote turbinskog ciklusa i specifičnu potrošnju toplote bloka u cjelini. Nakon toga se vrši korekcija specifičnih utrošaka i snage generatora sa aspekta korekcije na tok povratnih kondezata i korekcije na faktor snage.

TABELA III. PRIKAZ SKRAĆENOG PREGLEDA ISPITIVANJA TE U EKSPLOATACIJI I USPOSTAVA OPTIMALNOG REŽIMA RADA, [1]

Vrsta ispitivanja	Kategorija složenosti	Preliminarni obuhvat potrebnih aktivnosti i prateći proračuni	Preporučeni broj testova
Bilansna eksploataciona ispitivanja	II - kategorija složenosti	1. Preliminarna mjerenja i podešavajući testovi	12 ±20
		2. Određivanje optimalnog opterećenja parnog kotla (generatora pare) u tekućem ispitivanju bez zašljakivanja	2÷3
		3. Određivanje minimalne trajne snage parnog kotla (generatora pare) na ugljenu prašinu bez promjene sastava pomoćne opreme - najniži predio regulacionog dijapazona	2÷3
		4. Određivanje minimalne snage kotlovskog agregata na ugljenu prašinu sa izmijenjenim sastavom pomoćne opreme i promjene boje plamena u ložištu (tehnički minimum) i dopuštenim trajanjem držanja min. snage	2÷3
		5. Ispoljavanje ekonomičnosti pri nominalnoj, minimalnoj i dvije do tri snage između min. i nom. snage	5÷8
		6. Indirektno mjerene veličine (protočne količine vode, pare i kondenzata, protočne količine sistema čišćenja ogrijevnih površina parnog kotla, akumulacije, veličine stanja - entalpije i specifične zapremine protočnih medija i dr.)	kontinuirano
		7. Proračunate električne veličine	kontinuirano
		8. Bilanse zagrijača regenerativnog sistema (zagrijači visokog i niskog pritiska površinskog tipa i degazatora, kao zagrijača niskog pritiska miješajućeg tipa)	kontinuirano
		9. Bilansne veličine međupregrijane pare, snaga i utrošak pare pogonske turbo napojne pumpe	kontinuirano
		10. Proračuni i rezultati ispitivanja parnog kotla (proračun toplotnog opterećenja kotla, gorivom dovedena energija kotlu, stepen korisnog dejstva kotla, uporedna analiza stepena djelovanja kotla sa i bez rada sistema čišćenja ogrijevnih površina kotla i sl.)	kontinuirano
		11. Proračuni i rezultati ispitivanja turbinskog bloka (proračun tokova pare kroz turbinu, bilansi unutrašnje snage turbine, količine kondenzata, bilansi kondenzatora, bilansi rashladnog sistema, specifična potrošnja toplote turbinskog ciklusa, specifična potrošnja toplote bloka u cjelini i sl.)	kontinuirano
		12. Energetske karakteristike pojedinih postrojenja i opreme, kao i bloka termoelektrane u cjelini	kontinuirano
		13. Korekcije specifičnih utrošaka i snage generatora (korekcija na tok povratnih kondenzata, korekcija na faktor snage)	kontinuirano
		14. Karakteristika utroška toplote goriva bloka termoelektrane	kontinuirano
		15. Karakteristika vlastite potrošnje električne energije bloka termoelektrane	kontinuirano
		16. Karakteristika specifičnog utroška toplote goriva bloka, bruto i neto	kontinuirano
Režimno – podešavajuća ispitivanja	III - kategorija složenosti	1. Preliminarna mjerenja, koja obuhvataju određivanje broja obrtaja mlinskog postrojenja (mlinovi, dozatori, dodavači), kapacitet mazutnih dizni i karakter raspršavanja mazuta u ložištu, ugradnju mjernih priključaka po presjeku kanala dimnih gasova i kanala vazduha, mjerenje brzine tokova vazduha u gorionicima i vazдушnim kanalima, određivanje prisisa vazduha u kotlu, zagrijaču vazduha, elektrostatskim filterima i mlinskom postrojenju	15÷25
		2. Podešavajuća testna ispitivanja, koja obuhvataju određivanje optimalnog položaja plamena pri raznim brzinama vazduha u gorionicima (primarni, sekundarni), optimalne visine sloja uglja na mehaničkim rešetkama ložišta sa rešetkama i mjerenje koncentracije azotnih oksida i drugih gasova u dimnim gasovima	5÷10
		3. Određivanje optimalnog viška vazduha pri tri do četiri opterećenja sa mjerenjem koncentracije azotnih oksida i drugih gasova u dimnim gasovima	10÷20
		4. Određivanje optimalne finocne ugljenog praha pri dva do tri opterećenja u predjelu regulacionog dijapazona kotla	5÷10
		5. Određivanje optimalnog uvezanog rada gorionika na tehničkom minimumu kotla	3÷10
		6. Određivanje uticaja recirkulisanih dimnih gasova na temperaturu u ložištu, zatim temperaturu pregrijane pare, kao i uticaja na intezitet zašljakivanja	5÷10
		7. Osnovna testna ispitivanja, koja obuhvataju određivanje ekonomičnosti i pojedinačnih toplotnih gubitaka pri bilansiranju na nominalnoj snazi i tri druge snage	3÷5
		8. Određivanje maksimalne snage pri raznim sastavima pomoćne opreme i promjenljivim brojem obrtaja elektromotora te opreme	3÷5
		9. Određivanje minimalne snage sa dugotrajnim radom, uz stalni i nepromjenljivi rad pomoćne opreme i broj uključenih gorionika	2÷4
		Eksploataciona ubrzana ispitivanja nakon sprovedenih tipičkih kapitalnih remonata	Neophodnost provjere mogućnosti dugotrajnog rada bloka TE na nominalnoj snazi
2. Provjera prisisa vazduha u komori ložišta i pojedinim elementima parnog kotla, u gasovodu i mlinskom sistemu	kontinuirano		
3. Provjera aerodinamičkih otpora u gasnom i vazдушnom traktu parnog kotla (generatora pare)	kontinuirano		
4. Provjera temperature gasova i vazduha u konturnim presjecima gasovoda i vazдушnog trakta	kontinuirano		
5. Provjera temperature radnog medija po vodeno-parnom traktu	kontinuirano		
6. Određivanje dijapazona regulacije pregrijane pare	kontinuirano		
7. Određivanje udjela potrošnje električne energije elektro pogona pomoćne opreme, tj. sopstvene potrošnje TE (mlinovi, ventilatori, razni transporteri uglja i šljake i dr.)	kontinuirano		

IV. ZAKLJUČAK

Kao jedna od više mogućnosti i potencijala za poboljšanja energetske efikasnosti, kao i racionalnog upravljanja energijom u sektorima potrošnje u Republici Srpskoj, sagledana je trenutna situacija u sektoru energetike i industrije, te definisane moguće konkretne mjere za povećanje energetske efikasnosti u pojedinim dijelovima potrošnje energije, uz analizu uticaja i posljedica njihove implementacije. Jedan od prvih projekata realizovanih u oblasti proizvodnih energetske preduzeća u okviru MH Elektroprivreda Republike Srpske bila je Studija o energetske efikasnosti TE Ugljevik I, koju je, u saradnji sa Katedrom za hidro i termoenergetiku Mašinskog fakulteta u Banjoj Luci,

realizovao Institut za građevinarstvo IG - PC Trebinje tokom 2014. godine. Pokazalo se da je projekat za ostvarivanje energetske uštede veoma značajan za RiTE Ugljevik I, jer omogućuje, pored smanjenja troškova i čistije proizvodnje, dodatno poboljšanje konkurentnosti preduzeća na sve otvorenijem energetske tržištu u okviru Energetske zajednice jugoistočne evrope. Integracija projekta ovog tipa sa postojećim poslovnim planovima, predstavlja na neki način osnova za dalji razvoj ove kompanije, jer ulaganja u projekte energetske efikasnosti, u odnosu na izgradnju novih energetske kapaciteta, brže se realizuju i otplate. U ovladavanju projektima energetske efikasnosti ključni faktori za uspješno upravljanje tim projektima jesu potražnja na tržištu, kompetentnost ugovarača za pružanje energetske usluge i posjedovanje znanja i vještina iz oblasti upravljanja

projektima (metodologija realizacije). Pri tome, poseban naglasak je dat na potrebu izgradnje institucionalnog i zakonodavnog okruženja, kao jednog od osnovnih preduslova uspješne implementacije mjera energetske efikasnosti. Sva raspoloživa iskustva drugih zemalja su jednoglasna u zaključku da je bez podsticajnih mjera izuzetno teško (gotovo nemoguće) pokrenuti primjenu mjera energetske efikasnosti (EE) u energetskom sektoru na postojećim termoelektrskim postrojenjima, koje traže veće investicije.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju rukovodstvu RiTE Ugljevik, kao i stručnom osoblju na termoelektrani, na pomoći i podršci tokom realizacije predmetne studije [1], na bazi koje je i nastao ovaj rad.

LITERATURA

- [1] Z. Milovanovic, M. Samardžić i dr., Studija o energetske efikasnosti TE Ugljevik I, Institut za građevinarstvo IG, PC Trebinje, Trebinje, 2014
- [2] Zakon o energetske efikasnosti, Službeni glasnik Republike Srpske, broj 59/13,
- [3] Akcioni plan energetske efikasnosti Republike Srpske do 2018. Godine; Vlada Republike Srpske, Banja Luka, 2013.
- [4] Z. Milovanovic, M. Samardžić, Analiza energetske efikasnosti rada TE Ugljevik za period 2004-2014. godina, ENEF 2015, Banja Luka, 2015.
- [5] 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.
- [6] Tehnički otčet energobloka 300 MvT ТЭС Ugljevik, VO КОТЭС, Moskva, 2012.
- [7] Z. Milovanovic, Optimization of Power Plant Reliability, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, Banja Luka, 2003.
- [8] 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.
- [9] M. Samardžić, Z. Milovanović, D. Jeremić, Rekonstrukcija i modernizacija generatora pare P-64 na etapi eksploatacije u termoelektranama TE Ugljevik i TE Gacko, Međunarodna konferencija Energetika i održivi razvoj - TENOR 2011, Zbornik radova, Ugljevik, str. 241-251
- [10] Z. Milovanović, Monografije Energetska i procesna postrojenja, Tom 1: Termoelektriska postrojenja - Teoretske osnove, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2011
- [11] Z. Milovanović, Monografije Energetska i procesna postrojenja, Tom 2: Termoelektriska postrojenja - Tehnološki sistemi, projektovanje i izgradnja, eksploatacija i održavanje, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2011
- [12] З. Милованович, Алгоритм мероприятий по улучшению конкурентоспособности термоэнергетических установок (Часть 1), Проблемы машиностроения и автоматизации / *Engineering & Automation*, ИМАШ РАН, ГУ РосНИИ ИТ и АП, Москва, No. 4/2009, pp. 68-74
- [13] D. Miličić, Z. Milovanović, Monografija Energetske mašine - parne turbine, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2010., 923 str.
- [14] Z. Milovanović, V. Šijački-Žeravčić, G. Bakić, M. Đukić, Dijagnostika tehničkih pokazatelja održavanja termoelektrane, Dio III - Određivanje fizičkih uzroka pada pouzdanosti, Tehnička dijagnostika, Godina VIII, broj 4, 2009., str. 11-16

- [15] Z. Milovanović, V. Šijački-Žeravčić, D. Milanović, Produženje radnog veka opreme termoelektrana u funkciji razvoja elektroenergetike Republike Srpske, Elektroprivreda, Br. 1. Beograd, 2010. str. 29-40
- [16] Z. Milovanović, V. Šijački-Žeravčić, D. Milanović, G. Bakić, Dijagnostika tehničkih pokazatelja održavanja termoelektrane, Dio II - Određivanje pouzdanosti postrojenja u prvom približenju, Tehnička dijagnostika, Godina VIII, broj 3, 2009., str. 3-8
- [17] M. Vuković, Upravljanje projektima energetske efikasnosti, Tehnika – Menadžment, 64 / 5, Savez inženjera i tehničara, Beograd, 2014.

ABSTRACT

Energy efficiency is the ratio between realized results in the electricity production and the primary energy consumed for the production (from energy generating products and for own needs). Together with the term “efficiency”, in Serbian language are also being used some other terms, like “efektivnost” or “djelotvornost”, all for describing the process which gives the wanted result, no matter what its characteristics are and no matter the losses that comes with that process. Energy efficiency of thermal power plant block must be followed by activities and actions which in normal circumstances lead to verifiable and measurable increase of energy efficiency of the block, block’s technical systems, production processes and savings of the fuel’s primary energy. Those activities are based on application of energy efficient technology or, in other words, on measures for achieving energy savings and other following positive effects. Those activities can include adequate handling, maintenance and tuning of the thermal power plant block. Energy efficiency has three components: economy-financial, technical, human and organizational. Reasons for realizations of the projects from the field of energy efficiency can be: economical (energy expenses), energetic (local and global), legislative (Republic of Srpska and Bosnia and Herzegovina as a whole, Southeast Europe and EU), environment protection (local and global) and competitiveness (local, EU and global). Energy efficiency of the thermal power plant block must be followed with activities and measures which in normal circumstances lead to verifiable and measurable increase of energy efficiency of the block, technical systems of the block, production processes and savings of the primary energy. Within this paper, an overview of the activities of the realization of the study is given on the example of Mine and Thermal Power Plant Ugljevik with installed power of 300 MW.

Key words: thermal power plant, energy efficiency, study analysis, goals of energy efficiency, optimization

ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL POWER PLANTS - PHASES AND METHODOLOGY FOR REALIZATION OF THE STUDY ON EXAMPLE OF MINE AND THERMAL POWER PLANT UGLJEVIK WITH INSTALLED POWER OF 300 MW

Zdravko Milovanović, Momir Samardžić, Vinko Babić, Svetlana Dumonjić-Milovanović

Biomasa kao zamjena za fosilna goriva u sistemima daljinskog grijanja

Vinko Babić¹, Zdravko Milovanović¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
vinko.babic@mf.unibl.org, zdravko.milovanovic@mf.unibl.org

Sažetak — Industrijski razvoj i porast broja stanovnika doveli su do značajnog povećanja potražnje primarne energije. Energetske transformacije dovode do zagađivanja okoline i utiču na klimu. Ovo je posebno naglašeno kod upotrebe fosilnih goriva (ugalj, nafta i gas). U cilju rješavanja ovog problema neophodno je smanjiti potrošnju primarne energije što se može postići povećanjem efikasnosti i korišćenjem obnovljivih izvora energije (OIE). Značajna količina energije se koristi u proizvodnji toplotne i rashladne energije, a realizuje se jednim dijelom sistemima daljinskog grijanja koji se sve više koriste. Zbog toga se nameće neophodnost zamjene fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije. Biomasa čini 80 % ukupne proizvodnje energije iz OIE. U ovom radu su analizirane karakteristike drvene biomase kao najčešće korišćenog goriva za supstituciju fosilnih goriva, njeno sagorijevanje i uticaj na okolinu. Posebna pažnja se posvećuje kriterijumu održivosti biomase i njenoj eksploataciji. Zamjena (djelimična) tečnog goriva drvnom biomasom prikazana je i analizirana na izvedenom postrojenju daljinskog grijanja Banjaluke. Ovo postrojenje je u funkciji nekoliko godina. U zaključku se ukazuje na pozitivne i negativne strane upotrebe drvene biomase, kao i određene rizike po okolinu.

Ključne riječi — biomasa; održivost; sagorijevanje; zagađivanje okoline.

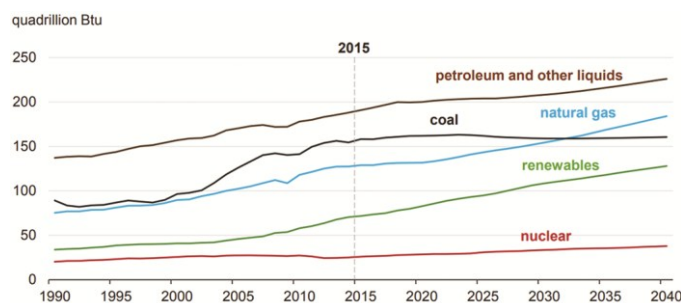
I. UVOD

Jedan od bitnih faktora opstanka i razvoja savremenog društva, u obliku u kojem ono danas postoji, je raspoloživost energije. Intenzivan globalni razvoj, kakav do sada nije zabilježen, neminovno prati porast potrošnje energije i problemi cijena i sigurnosti snabdijevanja energijom.

Broj stanovnika na Zemlji se značajno povećava, tako npr. u XX vijeku broj stanovnika se povećao 3,6 puta (sa 1,6 na 6,0 milijardi stanovnika) [1], a taj trend se i dalje nastavlja. U razvijenim zemljama u ovom periodu je potražnja za finalnom energijom porasla više od 30 puta [2]. Ako se uzme u obzir i činjenica da su najveće stope ekonomskog razvoja u zemljama sa najvećim porastom broja stanovnika, onda je realno da će potražnja za energijom nastaviti da raste i u budućnosti. Prognoza Međunarodne agencije za energetiku, Sl. 1. pokazuje da će potrebe za primarnom energijom značajno porasti do 2040. godine [3]. Pored povećanog učešća fosilnih goriva (ugalj, nafta, gas) u primarnoj energiji, značajan je i porast učešća OIE.

Sagorijevanjem fosilnih goriva oslobađa se niz štetnih materija koje negativno utiču na okolinu, a posebno su

značajne čvrste čestice, CO₂, SO_x i NO_x. Sa povećanjem potrošnje fosilnih goriva povećava se i njihova količina, odnosno negativan uticaj na okolinu. Posebno se ističe uticaj troatomskih gasova kao uzročnika efekta staklene bašte (*Greenhouse gas* - GHG), koji za posljedicu ima porast temperature na Zemlji, što dovodi do klimatskih promjena. Zbog toga se normativnim mjerama ograničava njihova emisija, što dovodi do povećanja cijene energije iz fosilnih izvora.



Sl. 1. Potrošnja energije u svijetu po izvorima energije [3]

Na međunarodnom planu ulažu se značajni naponi kako bi se koncentracija GHG stabilizovala na nivou od 450 ppm i na taj način zagrijavanje svelo na +2 °C u odnosu na početak XX vijeka. Osnovni principi smanjenja definisani su Okvirnom konvencijom UN o klimatskim promjenama od 1992. god. [4].

Direktiva EU 2009/28/EC o korišćenju obnovljivih izvora energije [5], definiše obavezu korišćenja OIE između ostalog i u proizvodnji električne i toplotne energije. Značajne količine toplotne energije se koriste za grijanje prostorija i zagrijavanje tople sanitarne vode. Dio ove toplotne energije se realizuje kroz sisteme daljinskog grijanja, koji se sve više koriste u urbanim sredinama.

Učešće OIE u proizvodnji toplotne i rashladne energije u EU u 2020. godini je planirano na nivou od 21,30 % od ukupne proizvodnje energije za ove svrhe, a ostatak iz fosilnih goriva. Učešće u proizvedenoj energiji iz OIE najvećim dijelom otpada na biomasu sa učešćem od 80,80 %, a slijede toplotne pumpe sa 7,50 %, geotermalni izvori sa 6,10 % i solarna energija sa 5,60 % [6]. Iz ovog pregleda se jasno vidi, kada se govori o korišćenju OIE za sisteme daljinskog grijanja da to najčešće podrazumijeva korišćenje biomase, mada ne treba zanemariti ni ostale obnovljive izvore.

Biomasa kao obnovljivi oblik energije karakteriše pristupačnost, pouzdanost i ekološka prihvatljivost pod određenim uslovima. Uslovi ekološke prihvatljivosti se odnose kako na pribavljanje tako i na sagorijevanje [7].

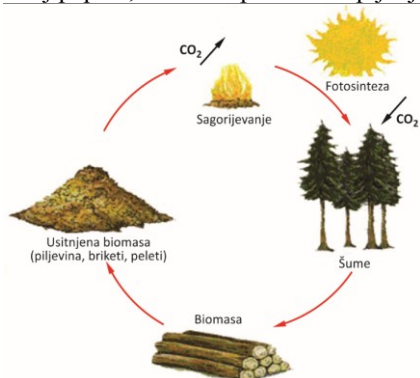
II. KARAKTERISTIKE BIOMASE KAO GORIVA ZA SISTEME DALJINSKOG GRIJANJA

Biomasa predstavlja po ugljen-dioksidu neutralno gorivo. Njenim sagorijevanjem oslobađa se ugljen-dioksid koji se apsorbira u periodu rasta biljke, Sl. 2. Kriterijum održivosti u ovom slučaju podrazumijeva da korišćenje biomase mora biti uvijek manje ili jednako prirastu biomase, kako bi se održao negativan ili neutralan bilans ugljen-dioksida tokom životnog ciklusa biomase kao goriva [7]. Strogo pridržavanje kriterijuma održivosti pri korišćenju biomase je neophodno, jer svako značajnije odstupanje može imati katastrofalne posljedice po eko sistem. Kada se procjenjuje smanjenje emisije GHG korišćenjem biomase, potrebno je razmatrati cjelokupan proces eksploatacije od proizvodnje, prikupljanja do sagorijevanja.

Prema porijeklu biomasa se može klasifikovati na: drvenu masu, ostatke i otpad poljoprivredne i životinjske proizvodnje, te organske ostatke i otpad iz komunalne i industrijske djelatnosti [8].

Za korišćenje ostataka poljoprivredne proizvodnje u sistemima daljinskog grijanja postoji više ograničenja u eksploataciji: sezonski karakter, način prikupljanja, transport, skladištenje, način pripremanja za sagorijevanje, ponašanje mineralnih materija pri sagorijevanju, zbog očuvanja plodnosti zemljišta potrebno je trećinu ovog ostatka zaorati. Zbog ovako složene eksploatacije, korišćenje ove vrste biomase u sistemima daljinskog grijanja je sporadičnog karaktera. Upotreba biomase kao goriva u sistemima daljinskog grijanja, uglavnom se ograničava na korišćenje drvene biomase.

Drvena biomasa se razlikuje od ostalih vrsta goriva, jer je kvalitet značajno promjenljiv, a zavisi od vrste drveta i godišnjeg doba. Kao bitne karakteristike drvene biomase treba izdvojiti: vlažnost, toplotnu moć, nasipnu gustinu, granulaciju, sastav i sadržaj pepela, kao i temperaturu topljenja pepela.



Sl. 2. Neutralan bilans ugljen-dioksida u životnom ciklusu biljke

Toplotna moć drveta je nešto veća kod četinara nego lišćara, zbog većeg sadržaja lignina i smole, koje karakteriše manji sadržaj kiseonika. Donja toplotna moć zavisi od sadržaja vlage. U drvenoj biomasi sadržaj vlage zavisi od transporta, skladištenja i vrste drvene biomase (sječka, piljevina, kora, bruševina, cjepanice, briket, pelet). U sirovom drvetu sadržaj vlage iznosi oko 50% i varira naviše ili naniže za oko 10% zavisno od doba godine i vrste drveta. Ako se radi o otpadnom drvetu iz procesa proizvodnje, onda se može uzeti da vlažnost varira od 2% kod praha od brušenja u drvoprerađivačkoj industriji do oko 40% kod piljevine u pilanama. Visok sadržaj vlage izaziva pogonske probleme pri paljenju, a ako se radi o drvenoj sječci i pri transportu.

Drvena biomasa se uglavnom sastoji od celuloze (45-55 mass.%), hemiceluloza (12-20 mass.%) i lignina (20-30 mass.%), a sadrži još i smole, tanin, masti, proteine i mineralne materije. Sadržaj hlora u drvenoj biomasi je oko 0,01 dry mass.%, što je znatno manje od kukuruznih ostataka (0,63) ili pšenične slame (0,477). Hlor koji se nalazi u biomasi u kotlu pravi hlornu koroziju, pa je neophodan oprez pri sagorijevanju drvene biomase [9].

Sastav lignina i njegova količina su različiti u lišćarskom i četinarskom drvetu. Lignin daje drvetu potrebnu čvrstinu, a celulozi odrvenjen karakter. Pri termičkoj razgradnji lignina dobija za 50 % više koksnog ostatka i dva puta više smole nego kod celuloze. Lignin ima veću toplotnu moć od celuloze i hemiceluloze.

Od sastava zemljišta na kome raste drvo zavisi sastav mineralnih materija koje drvo uzima iz zemljišta zajedno sa vodom. Zbog toga se u dosta širokim granicama mijenjaju količina i sastav pepela, a zavise od dijela drveta od kojeg je uzet uzorak, starosti i godišnjeg doba sječe drveta. Glavni sastojci mineralnih materija su kalcijum, kalijum, magnezijum, natrijum i aluminijum, a vezani su u obliku karbonata, fosfata, silikata i sulfata. Mogu se naći u tragovima i neki drugi metali.

Rezultati istraživanja sadržaja i sastava pepela kod najčešće korišćenih vrsta drveta na našim prostorima [10] ukazuju na moguće dvije dosta različite grupe vrsta drveta. U prvu grupu možemo svrstati hrast i bukvu sa sadržajem pepela od 0,51-0,55 %, a u drugu grupu sa sadržajem pepela od oko 0,26 % brezu, bor i ariš. Pepeo navedenih vrsta drveta je najbogatiji kalcijumom, koji preračunat na CaO čini oko polovine do tri četvrtine od ukupne količine pepela ili tačnije kod prve grupe 55-70 %, a kod druge grupe 30-50 % ukupne količine pepela. Sadržaj kalijuma se kreće oko 10 – 15 %, natrijuma oko 3-5 %, a magnezijuma oko 10 %. Ostatak od ukupno 1-2% čine željezo, aluminijum, silicijum i još neki elementi u tragovima. Natrijumovi i kalijumovi oksidi su karakteristični po tome što pepeo čine topivim na nižoj temperaturi, što može predstavljati smetnje u eksploataciji (zašljakivanje ložišta). Ovaj problem je posebno izražen kod sagorijevanja ostataka poljoprivrednih kultura.

Sagorijevanje značajnijih količina drvene biomase može imati negativan uticaj na životnu okolinu, pa o ovome treba voditi računa, posebno kada se sagorijevanje vrši u urbanim sredinama.

III. SAGORIJEVANJE DRVENE BIOMASE

U sistemima daljinskog grijanja drvena biomasa se skoro isključivo koristi u obliku drvene sječke, koja se kao gorivo dosta razlikuje od uglja. Sječka sadrži više isparljivih materija, manje ugljenika i više kiseonika u odnosu na ugalj. Proces izdvajanja volatila počinje na nižim temperaturama nego kod uglja, a njihov doprinos toplotnoj moći iznosi oko 70%, dok je kod uglja oko 36 % [11]. Ove karakteristike bitno utiču na sagorijevanje drvene sječke kao veoma reaktivnog goriva. Zbog navedenih razlika u odnosu na ugalj, kod izbora tehnologije sagorijevanja i konstrukcije uređaja za sagorijevanje drvene sječke, neophodan je studiozan pristup sa uzimanjem u obzir svih navedenih činjenica.

Sagorijevanje drvena biomasa za potrebe kombinovane proizvodnje toplotne i električne energije, odnosno daljinskog grijanja se vrši u većim ložištima, a često i zajedno sa fosilnim gorivima, tzv. kosagorijevanje. Tehnologije koje se koriste za sagorijevanje biomase su: sagorijevanje u sloju na rešetci, sagorijevanje u letu, sagorijevanje u fluidizovanom sloju i kao gas poslije gasifikacije. Principijelno, sagorijevanje drvene biomase sastoji se uslovno iz četiri faze: (1) zagrijavanje goriva i isparavanje vlage; (2) devolatizacija/gasifikacija, zagrijavanjem na temperaturu od 300 °C drvena materija se razlaže na volatile (oko 85 % drvene materije) i čvrsti ostatak; (3) sagorijevanje volatila, od ukupnog energetskog potencijala drvene biomase na ovaj vid otpada 50-60 %; (4) sagorijevanje preostale čvrste mase goriva.

Na temperaturu paljenja drveta utiču: granulacija, vrsta drveta, brzina sagorijevanja i oslobađanje volatila. Zbog toga se temperatura paljenja kreće u dosta širokom intervalu, od vrlo niske koja iznosi 120-250 °C, niske 270-280 °C do vrlo visoke 475-575 °C.

Na proces sagorijevanja, osim karakteristika biomase utiče: temperatura sagorijevanja, vrijeme zadržavanja goriva u ložištu i vazduh za sagorijevanje (količina, raspodjela, temperatura i brzina strujanja).

Kod sagorijevanja drvene sječke sa visokim sadržajem vlage, sušenjem se postiže potrebna temperatura sagorijevanja i obezbjeđuje potrebno vrijeme boravka goriva u ložištu, kao preuslovi za potpuno sagorijevanje. Visok sadržaj vlage u gorivu izaziva i pogonske probleme sa paljenjem goriva.

Potreban vazduh za sagorijevanje drvene biomase kod savremenih ložišta se dovodi kao primarni i sekundarni, tj. dvostepeno. Primarni vazduh služi za gasifikaciju drvene biomase, a sekundarni za sagorijevanje volatila. Na ovaj način se obezbjeđuju preuslovi za potpuno sagorijevanje i smanjenje rizika od emisija koje su povezane sa nepotpunosti sagorijevanja.

Celuloza na temperaturi 120 °C postaje termički nestabilna, a termička destrukcija nastupa iznad 240 °C kada dolazi do izmjene njenog elementarnog sastava. Na temperaturi iznad 275 °C termička degradacija dovodi do intenzivnog i potpunog raspada. Pri tome se oslobađa toplota uz nastajanje gasova i tečnih produkata sagorijevanja. Piroliza celuloze se potpuno završava na temperaturi iznad 450 °C, uz nastanak produkata kao što su: drveni ugalj, destilat vode, smole, krezol, fenoli i drugi sastojci.

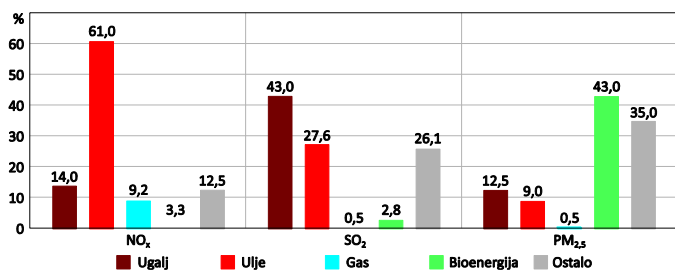
Potpunost sagorijevanja zavisi od toga koliko je proces sagorijevanja blizu stehiometrijskog. Na potpunost procesa sagorijevanja drvene biomase u ložištu direktan uticaj ima mehanizam prenosa toplote i gubici toplote koji neminovno nastaju. Treba istaći da toplotno opterećenje ložišta i ložišnih uređaja niže od nominalnog, utiče na potpunost sagorijevanja, odnosno na emisije zagađujućih materija u gasovitim produktima sagorijevanja.

Nepotpuno sagorijevanje drvene biomase može nastati iz više razloga, a glavni uzroci nepotpunog sagorijevanja su: slabo miješanje goriva i vazduha, lokalni nedostatak kiseonika na mjestu sagorijevanja, niska temperatura sagorijevanja u ložištu ili nedovoljno vrijeme boravka goriva u ložištu. Navedeni parametri imaju visok stepen međuzavisnosti, što ukazuje da se njihova optimizacija može izvršiti samo dobrom organizacijom procesa sagorijevanja i na taj način smanjiti emisije koje su rezultat nepotpunosti sagorijevanja. Glavni nosioci dobre organizacije sagorijevanja su projektanti ložišta i ložišnih uređaja, zatim montažeri i pogonsko osoblje u procesu eksploatacije. Od stručnosti i obučenosti osoblja koje rukuje i održava ove uređaje znatno zavisi potpunost sagorijevanja, odnosno emisije zagađujućih materija koje su rezultat nepotpunosti sagorijevanja.

IV. EMISIJE ZAGAĐUJUĆIH MATERIJIA

Pri sagorijevanju različitih goriva dolazi do zagađivanja vazduha emisijama različitih zagađujućih materija. Ove emisije zavise od vrste goriva, načina sagorijevanja i načina prečišćavanja gasovitih produkata sagorijevanja. Pri sagorijevanju pojedinih goriva (ugalj, tečna goriva, gas i biogoriva) intenzitet uticaja na okolinu: sumpornih oksida, azotnih oksida i čestica, je različit i prikazan je na Sl.3.

Može se zaključiti sa Sl. 3. da najveći uticaj na okolinu, pri sagorijevanju biomase u odnosu na druga goriva, imaju fine čestice manje od 2,5 µm (PM_{2,5}). Ove čestice sadrže: leteći pepo, čađ, soli i kondenzovane teške ugljovodonike. Utiču na formiranje aerosola i doprinose povećanju koncentracije teških metala u istaloženim aerosolama. Ove fine čestice utiču na rad respiratornih organa kod ljudi, a često imaju i kancerogeni efekt. Pri sagorijevanju drvene biomase emisije zagađujućih materija zavise od tehnologije sagorijevanja, konstrukcije uređaja za sagorijevanje i organizacije procesa sagorijevanja u ložištu. Način generisanja aerosola i letećeg pepela pri sagorijevanju biomase u sloju prikazan je na Sl. 4.



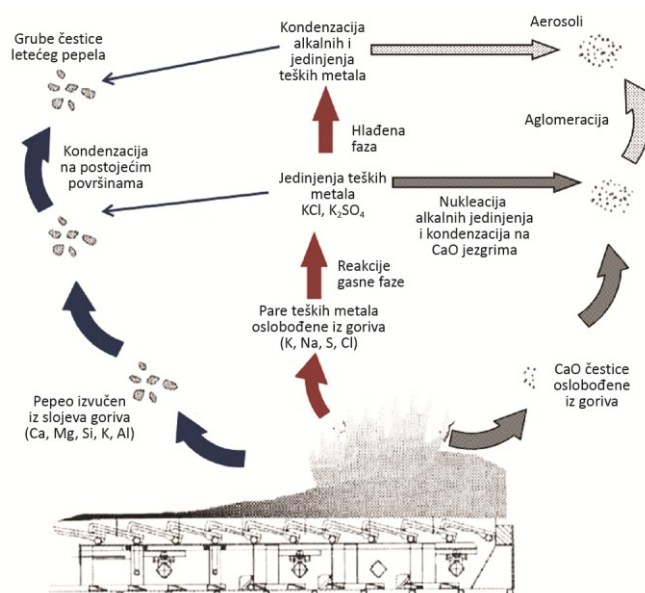
Sl. 3. Zavisnost emisije NO_x, SO₂ i PM_{2,5} od vrste goriva [12]

Emisije zagađujućih materija nastaju nepotpunim, ali i potpunim sagorijevanjem. Ako je sagorijevanje potpuno treba očekivati emisije: ugljen-dioksida, sumpornih oksida, azotnih oksida, azot suboksida, teških metala, dioksina, furana i čestica. Kod nepotpunog sagorijevanja nastaju još i emisije: ugljen monoksida, volatilskih organskih jedinjenja (VOCs), posebno opasnih policikličnih aromatskih ugljovodonika (PAHs) i čestica [9].

Do zaključka da pri sagorijevanju drvene biomase najveći problem predstavljaju emisije ugljen monoksida i finih čestica, se dolazi sagledavanjem svih navedenih emisija, načina njihovog nastanka i posljedica. Ugljen monoksid se uzima kao reprezentant nepotpunosti sagorijevanja i prisustva ostalih emisija zagađivača koji nastaju nepotpunim sagorijevanjem, a čije mjerenje u realnim pogonskim uslovima se može teško vršiti. Iz naprijed navedenog se može zaključiti da ove emisije nastaju zbog nedovoljno visoke temperature sagorijevanja u ložištu, lokalno niske koncentracije kiseonika na mjestu sagorijevanja ili kraćeg vremena boravka goriva u zoni sagorijevanja od potrebnog. Mjere za smanjenje ovih emisija mogu biti primarne i sekundarne.

Primarne mjere obuhvataju aktivnosti čiji je cilj da se izbjegn timer navedeni uzroci nepotpunog sagorijevanja. One podrazumijevaju: smanjenje vlažnosti goriva sušenjem, pripremu goriva odgovarajuće granulacije, pravilno organizovanje procesa sagorijevanja, mjere kontrole i nadzora.

Sekundarne mjere se odnose na odstranjivanje čestica iz dimnih gasova prije dimnjaka, koje nastaju pri potpunom i nepotpunom sagorijevanju. Ove mjere obuhvataju ugradnju multiciklona za odstranjivanje najgrubljih čestica, a iza njih elektrostatičkog i/ili vrećastog filtera. Vrećasti filteri su efikasniji za odstranjivanje manjih čestica, mada se mogu odstraniti i elektrostatičkim filterom, ali uz enormno visoka ulaganja. Ove mjere su finansijski opravdane kod kotlova velikih i srednjih snaga, kao i mjere za regulisanje, kontrolu i nadzor procesa sagorijevanja koje su isto tako bitne za emisije zagađujućih materija. Zato su kotlovi manjih snaga i peći za domaćinstva poseban problem, koji se može donekle ublažiti prelaskom na sisteme daljinskog grijanja, gdje god za to postoje realni uslovi.



Sl. 4. Generisanje aerosola i letećeg pepela pri sagorijevanju biomase [13]

U cilju boljeg razumijevanja ovog problema, navešće se primjer grada Banja Luka, gdje je izvršena djelimična supstitucija mazuta drvenom sječkom. Ovaj proces se i dalje nastavlja. Do sada je izvršena supstitucija oko 4500 tona mazuta godišnje, od oko 22 hiljade tona koliko je bilo potrebno za prosječnu grejnu sezonu. Izgrađena su tri tropromajna vrelovodna kotla ukupne snage 16 MW (1 × 4 MW и 2 × 6 MW). U ložištima ovih kotlova sagorijeva drvena sječka granulacije 50-80 mm u sloju na stepenastoj mehaničkoj rešetci sa oscilatornim kretanjem svakog drugog reda rešetnica. Predviđena je vlažnost drvene sječke 20-50 %, a ostvaruje se 35-50 %. Vazduh potreban za sagorijevanje se dovodi kao primarni zonski ispod rešetke i kao sekundarni u ložište. Ostvaren je visok stepen automatizacije i nadzora procesa sagorijevanja, čime su postavljene pretpostavke visokog stepena potpunosti sagorijevanja. Odstranjivanje čestica je ostvareno ugradnjom multiciklona i elektrostatičkog otprašivača (filtera). Ovom supstitucijom postignut je značajan finansijski efekt, koji zavisi od cijena energenata na tržištu.

Kako se i očekivalo, emisije zagađujućih materija ovom supstitucijom su višestruko smanjene i nalaze se u dozvoljenim granicama za ovakva postrojenja. Izmjerene emisije CO su u granicama 12,9-98 mg/Nm³ (dozvoljeno 150 mg/Nm³), što je pokazatelj visokog stepena potpunosti sagorijevanja. U Tabeli 1. su date izmjerene emisije ugljen monoksida, čestica, sumpornih i azotnih oksida. Posebno su interesantni podaci o izmjenjenim česticama, koji su iznosili za tri različita kotla na drvenu sječku: 6,80; 9,60 i 12,0 mg/Nm³ u odnosu na 20,0 mg/Nm³ koliko je dozvoljeno. Prema očekivanju, izmjerena emisije sumpornih oksida je 1,3-2,3 mg/Nm³ što je u odnosu na izmjerenu emisiju na kotlu snage 58 MW loženim mazutom od 1670 mg/Nm³, zanemarivo. Slična situacija je sa azotnim oksidima. Izmjerene su emisije na tri različita kotla na drvenu sječku od: 157; 167 i 176

mg/Nm³ NO_x kao NO₂, dok je na kotlu na mazut snage 58 MW loženom mazutom izmjereno 450 mg/Nm³ NO_x.

TABELA 1. IZMJERENE EMISIJE ZAGAĐUJUĆIH MATERIJA NA KOTLOVIMA SA LOŽENJEM DRVENE SJEČKE, mg/Nm³ [14].

	Starčevica		Kosmos
	4 MW	6 MW	6 MW
CO	12,9	98	20,5
čestice	6,8	12,0	9,6
SO ₂	1,3	2,3	2,1
NO _x	157,1	166,6	176,1

V. EKSPLOATACIJA DRVENE BIOMASE

Zbog kriterijuma održivosti neophodno je odrediti raspoložive količine drvene biomase za različite potrebe (daljinsko grijanje, industrija, ogrev u širokoj potrošnji, ...) na različitim lokacijama po prihvatljivim cijenama. Za to su potrebna opsežna istraživanja, koja bi obuhvatila i druge aktivnosti u šumarstvu RS, usko vezane sa ovim problemom.

Da bi se izvršila pravilna procjena smanjenja emisije GHG korišćenjem drvene biomase, neophodno je da razmatranje obuhvati cjelokupan proces eksploatacije uključujući i potrebnu logistiku. Logistika u ovom slučaju obuhvata operacije: sječe i prikupljanja u šumi, izvlačenja iz šume do određenog mjesta za proizvodnju sječke odgovarajućeg kvaliteta, transport do kotlovnice daljinskog grijanja, skladištenje, unutrašnji transport do ložišta kotlova uključujući i eventualno proces sušenja sječke prije uvođenja u ložište. Za izvršenje nabrojanih operacija potrebna je određena količina energije. Ako se ova energija ili jedan njen dio dobija iz fosilnih goriva, onda je potrebno pri obračunu bilansa ugljen-dioksida to uzeti u obzir. Ovo je posebno važno kod većih sistema za daljinsko grijanje ili sistema za druge namjene.

Iz naprijed navedenog proizilazi neophodnost optimizacije utroška energije pri funcionisanju cjelokupne logistike. Cilj ove optimizacije je minimalan utrošak energije ukupne logistike i pri tome svodenje utroška energije iz fosilnih goriva na najmanje moguću mjeru, korišćenjem OIE. Ova optimizacija je dosta složena i zahtijeva postavljanje i analiziranje više mogućih varijantnih rješenja logistike. Pri ekonomskoj optimizaciji troškove logistike treba posmatrati zajedno sa ostalim pogonskim troškovima, zbog procesa sušenja goriva. Na ovaj način se može dobiti najniža cijena energije iz drvene biomase u konkretnom slučaju. Pri navedenim analizama i konkretnim rješenjima potrebno je posebnu pažnju posvetiti sigurnosti snabdijevanja. Pri tome sva rješenja moraju obezbjediti visoku sigurnost snabdijevanja pri ekstremnim vremenskim uslovima, vodeći računa o riziku od požara i opasnostima od alergijskih poremećaja disanja koje uzrokuju prašina i mikroorganizmi (gljivice, bakterije, ...) pri skladištenju sječke.

Kod ocjene trenutno raspoloživih i perspektivnih količina drvene biomase na području RS ne treba zanemariti činjenicu

da više od polovine površine RS zauzimaju šume i šumsko zemljište. Oko jedne petine šuma je u privatnom vlasništvu, a ostalo je državno vlasništvo. Godišnji obim sječe iznosi oko 3,0 miliona m³. Dio koji bi se primjenom savremenih tehnologija rada mogao iskoristiti na ekonomskim principima kao energetska sirovina je značajan [15].

Drvena biomasa koja se može ekonomski potencijalno koristiti kao energetska sirovina je: ogrijevno drvo, šumski ostatak, panjevina i ostatak pri preradi drveta. Procjena količine drvene biomase koja se može dobiti eksploatacijom na nekom području je veoma kompleksna, zbog niz tehničkih, ekonomskih i drugih ograničenja u eksploataciji.

Da bi se izbjegao rizik od osiromašenja šumskog zemljišta mineralnim materijama, odnosno da bi se očuvala plodnost zemljišta, neophodno je u šumi ostaviti dio šumskog ostatka. Prama dosadašnjim istraživanjima, najveća količina mineralnih materija se nalazi u listu, plodovima i žbunastoj vegetaciji. Ove činjenice su važne kod planiranja korišćenja šumske biomase za energetske potrebe [15].

Kod planiranja proizvodnje toplotne/električne energije iz drvene biomase bitno je što tačnije utvrditi: optimalnu snagu i lokaciju svakog postrojenja, količinu i način obezbjeđenja potrebne biomase, lokaciju za prikupljanje i proizvodnju drvene biomase. Na ovaj način se mogu dobiti realni podaci o količinama drvene biomase po kategorijama, što je od značaja za planiranje energetskih kapaciteta i proizvodnog procesa u šumarstvu.

Za plansku eksploataciju šumske biomase pored praćenja prirasta, neophodno je vršiti i plansko pošumljavanje u cilju održivosti. Pravilna planska eksploatacija i pošumljavanje, pored ekonomskih i ekoloških efekata, značajne su za smanjenje bolesti šuma i smanjenje rizika od šumskih požara. Nije teško zaključiti da održivo korišćenje drvene biomase za proizvodnju toplotne/električne energije može imati značajne društvene koristi [7], [15].

Jedan dio drvene biomase se koristi za proizvodnju toplotne i električne energije, najčešće za sisteme daljinskog grijanja i za potrebe industrije. Drugi dio se koristi za potrebe lokalnog stanovništva u ruralnim i dijelom u urbanim sredinama. Treba uzeti u obzir i činjenicu da je 22 % šuma u RS u privatnom vlasništvu i da su ove šume slabijeg kvaliteta i zato pogodnije za korišćenje u energetske svrhe [15]. Uzimajući u obzir ove činjenice može se zaključiti da bi razvoj upotrebe drvene biomase u energetske svrhe povećao zapošljavanje lokalne radne snage i doveo do dodatnog razvoja ruralnih sredina.

Za planiranje na makro nivou, dovoljna je gruba procjena koja se svodi na: definisanje raspoložive količine biomase u cijeloj RS, definisanje vrsta i lokacija postrojenja za proizvodnju toplotne/električne energije, ocjenu ekonomskih efekata i koristi od smanjenja emisije GHG [7], [15].

VI. ZAKLJUČAK

Za supstituciju fosilnih goriva OIE zbog emisije GHG kod postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije, odnosno kod sistema za daljinsko grijanje najčešće se koristi drvena biomasa. Na ovaj način se postiže smanjenje energetske zavisnosti i povećava zapošljavanje lokalne radne snage, odnosno doprinosi povećanju razvoja lokalnih zajednica.

Istraživanja pokazuju da nepotpunost sagorijevanja biomase može dovesti do vrlo opasnog zagađivanja okoline (gasovima i česticama), pa je neophodno ovom problemu posvetiti posebnu pažnju pri projektovanju, eksploataciji i nadzoru ovakvih postrojenja. Kako se radi o širem društvenom interesu, ozbiljan državni nadzor je neophodan.

Kod malih ložišta za sagorijevanje drvene biomase, zbog slabe regulacije procesa sagorijevanja često je prisutna velika nepotpunost sagorijevanja. Kako najčešće nisu ni opremljeni uređajima za kvalitetno odstranjivanje čestica, to se stanje sa njihovim korišćenjem u većem broju na jednoj lokaciji, znatno usložnjava. Jedno od rješenja je širenje sistema daljinskog grijanja na ekonomskim osnovama ili uz subvencije države.

Prikazani primjer supstitucije mazuta drvenom sječkom na konkretnom primjeru najbolje pokazuje njene efekte, kako ekološke tako i ekonomske.

Kriterij održivosti upotrebe biomase i rizici da dođe do njegovog narušavanja, ukazuju na širok društveni interes za ove aktivnosti. Neophodna su dosta složena i sveobuhvatna istraživanja eksploatacije šumske biomase za energetske potrebe. Koristi za društvo od korišćenja drvene biomase za potrebe daljinskog grijanja su: ekonomske, ekološke i razvojne prirode, pa treba očekivati adekvatne aktivnosti državnih organa i lokalne zajednice.

LITERATURA

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects: The 2015 Revision*, Data Booklet. ST/ESA/SER.A/377; <http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications>
- [2] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics 2015*, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statisticss_2015.pdf
- [3] U.S. Energy Information Administration „International Energy Outlook 2017“, September 2017.
- [4] United Nations, *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1992, http://unfccc.int/essential_background/convention/items/6036.php
- [5] European Union, Directive 2009/258/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable energy sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European Union, 2009
- [6] European Renewable Energy Council (EREC): „Mapping Renewable Energy Pathways towards 2020“, Renewable Energy Policy Action Paving the Way Toward 2020 (REPAP), 2011.

- [7] V. Babić, Z. Milovanović, J. Škundrić, V. Tintor, *Preserving Clean Air in the Urban Areas by Combusting Wooden Biomass Using Banja Luka as an Example*, VI Regional Conference „Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern European Countries“, 2017.
- [8] European Committee for Standardization, www.cen.eu
- [9] Hardy T. et al.: „Negative effects of biomass combustion and co-combustion in boilers“, *Environment Protection Engineering*, 2012, Volume 38; No.1; 25-33.
- [10] Antić M., Karamarković V.: „Korišćenje energije iz drvenih otpadaka“, *Termotehnika*, No. 1-2, Beograd 1984., Srbija
- [11] Yin C., Rosendahl L., Ker S. K.: „Grate-firing of biomass for heat and power production“, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, Volume 34; No 6; 725-754
- [12] International Energy Agency: „World Energy Outlook“, 2016.
- [13] Thermal Net Workshop, *Ash related issues in Biomass Combustion*, 2006.
- [14] Garancijska ispitivanja vrelodnih kotlova na drvenu biomasu u Toplani Banja Luka, Izvještaj br.Z-IE-056-B2/15, 2015
- [15] „Program korišćenja šumske biomase iz šuma Republike Srpske“, JPŠ „Šume RS“ a. d. Sokolac, Banja Luka, 2013.

ABSTRACT

Industrial development and human population growth caused a substantial increase in primary energy demand. Energy transformation processes affect the environment and climate. This is particularly noticeable in the use of fossil fuel (coal, oil and gas). In order to deal with this issue, it is necessary to decrease the consumption of primary energy which can be achieved through the increase in efficiency and use of renewable energy sources. Substantial amount of energy is used in generating useful heating and cooling that is partly realized through district heating. That is the reason why we need to replace fossil fuel with renewable energy sources. Biomass accounts for 80 % of total consumption of renewable energy sources. This paper analysed the characteristics of the wooden biomass, most commonly used fuel as a replacement for fossil fuel, its combustion and its environmental impact. Particular attention is devoted to the sustainability and exploitation of wooden biomass. Partial replacement of a liquid fuel with wooden biomass is presented and analysed through the district heating plant installed in Banja Luka. The district heating plant has been in function for several years. In the conclusion, positive and negative effects of the use of wooden biomass are suggested, as well as environmental risks. Key words – biomass; sustainability; combustion; environmental pollution.

BIOMASS AS A REPLACEMENT OF FOSSIL FUEL IN DISTRICT HEATING SYSTEMS

Vinko Babić, Zdravko Milovanović
vinko.babic@mf.unibl.org
zdravko.milovanovic@mf.unibl.org

Energetska efikasnost termoenergetskih postrojenja

Rezultati optimizacije na primjeru RiTE UgljEVik instalisane snage 300 MW

Zdravko Milovanović¹, Momir Samardžić², Darko Knežević¹,
Aleksandar Milašinović¹, Svetlana Dumonjić-Milovanović³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²JMDP Elektroprivreda Republike Srpske, ZP RiTE UgljEVik, UgljEVik, Republika Srpska

³Partner Inženjering d.o.o., Banja Luka, Republika Srpska

zdravko.milovanovic@mf.unibl.org, samarmo@gmail.com, darko.knezevic@mf.unibl.org,
aleksandar.milasinovic@mf.unibl.org, svetlanadm@ymail.com

Sažetak—Polazeći od definicije energetske efikasnosti kao odnosa između ostvarenog rezultata u proizvodnji električne energije i za to utrošene energije iz energenata i gubitaka vezanih za vlastitu potrošnju na elektrani, potrebno je koristeći postojeću metodologiju za ocjenu rada termoenergetskih postrojenja (TEP) u okviru elektroenergetskog sistema (EES) izračunati određene pokazatelje efektivnosti, kao što su to: koeficijenti iskorišćenja vremena i snage, koeficijent energetske korisnosti sastavnih postrojenja i bloka u cjelini, način i količine proizvedene električne energije i utrošene toplotne energije iz goriva, količine upotrebene toplotne i električne energije za vlastite potrebe i sl. Pravilno izračunavanje ostvarenih karakteristika bloka omogućuje ocjenu energetske efikasnosti. Energetsku efikasnost bloka termoelektrane treba da slijede aktivnosti i radnje koje u normalnim okolnostima dovode do provjerenog i mjerljivog povećanja energetske efikasnosti postrojenja bloka, tehničkih sistema bloka, proizvodnih procesa i uštede primarne energije. 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, poboljšanje efikasnosti postojeće opreme i sistema, bez izmjena u bilo kom proizvodnom procesu datog postrojenja, ili u sistemu snabdijevanja energijom.

Ključne riječi—*termoenergetska postrojenja; energetska efikasnost; studijske analize; rezultati optimizacija;*

I. UVOD

Prema Strategiji razvoja energetike Republike Srpske do 2030. godine potrošnja energije u industriji Republici Srpskoj je u proteklom periodu činila 12% do 25% ukupne potrošnje energije u Republici Srpskoj odnosno od 18% do 35% udjela u potrošnji energije u industriji BiH. Početkom ove decenije je taj udio imao pad sa 34% na 18%, da bi se kasnije povećao na 35%. U apsolutnom iznosu, potrošnja energije u industriji Republike Srpske bilježi porast od 2002. godine. S obzirom na udio u potrošnji energije u industriji, najvažnije industrijske grane su: proizvodnja metala, hemijska industrija, industrija nemetalnih minerala, rudarstvo i kamenolomi, proizvodnja hrane, pića i cigareta, proizvodnja tekstila i kože, proizvodnja papira i grafike, mašinska proizvodnja i ostala industrija. Potrošnja finalne energije u najvećem dijelu, preko 50%, otpada na sektor proizvodnje metala. U tom sektoru daleko najviše učešće ima zvojnička fabrika glinice. Iz istog razloga

prirodni gas najviše učestvuje u potrošnji među gorivima. Dalji sektor velike potrošnje je proizvodnja hrane, pića i cigareta, dok su ostali pojedinačni sektori bitno manje zastupljeni. U potrošnji električne energije najveći procenat otpada na sektor proizvodnje hrane, pića i cigareta. Poređenjem oblika finalne potrošnje energije, daleko najzastupljeniji energent je prirodni gas, čija je potrošnja varirala u prethodnom periodu. Zatim su najviše trošena tečna goriva, u prvom redu mazut. Slijedi električna energija, dok su drveni otpad, ugalj te druga čvrsta goriva manje zastupljeni. Scenario razvoja potrošnje energije u industriji predviđa udvostručenje potrošnje finalne energije do 2030. prema scenariju S1, za oko 3% manji rast prema scenariju S2, i za oko 12% manji rast prema scenariju S3. Pritom se pretpostavlja da prerađivačka industrija ima 4 do 5 puta veće učešće od poljoprivrede, građevinarstva i rudarstva. Električna energija u ukupnoj dosadašnjoj potrošnji učestvuje sa manje od petine. Pretpostavlja se da će taj procent rasti, ali za mjere povećanja energetske efikasnosti je stoga preporučljivo da se skoncentrišu na racionalnost korišćenja toplotne energije. Prirodni gas će zadržati vodeći udio među energentima, tako da se područje primjene mjera treba fokusirati na efikasnost toplotnih agregata, smanjenje distributivnih gubitaka i efikasnost toplotnih procesa. Kod električne energije najveći potencijal za primjenu mjera je u efikasnosti elektromotornih pogona. Odgovarajuće organizacione mjere – energetski audit, sektorske analize i studije izvodljivosti povećanja energetske efikasnosti – su nezaobilazne u pravilnoj energetskoj politici za industriju. Prema kompleksnosti i investicijskoj intenzivnosti, primjenjive mjere povećanja energetske efikasnosti mogu se podijeliti na mjere: temeljne racionalizacije potrošnje energije (promjena ponašanja, upravljanje opterećenjem itd.), revitalizacije električne i toplotne infrastrukture, kompenzacije reaktivne energije, zahvata na potrošačima (zamjena, popravak i dr.), zahvata na energetskim agregatima (popravak, dogradnja, i dr.), izgradnje novog energetskog sistema (nova energana i energetska infrastruktura), kao i uvođenja i poboljšanja cjelovite regulacije i automatizacije. Poboljšanja bi trebalo planirati tako da se preduzimaju mjere prema navedenom rasporedu, s obzirom na to da prve podrazumijevaju manje investicije, jednostavnije projekte i bržu isplativost. Preduzimanje složenijih i skupljih mjera ima puni smisao tek kada su sprovedene jednostavnije i jeftinije mjere.

II. PRIKAZ POLAZNE BAZE PODATAKA

A. Vlastita potrošnja termoelektrane

Skup potrošnje svih uređaja koji osiguravaju normalni pogon termoelektrane naziva se sopstvena ili vlastita potrošnja. Opštu potrošnju čine svi ostali uređaji koji nemaju direktan uticaj na tehnološki proces u elektrani. Očuvanje kontinuiteta u snabdijevanju vlastite potrošnje električnom energijom neophodno je za siguran rad prilikom normalnih pogonskih uslova, u slučaju kratkotrajnih prelaznih stanja, kao i prilikom pokretanja i normalnog zaustavljanja, posebno je važno u slučaju zaustavljanja prilikom poremećaja i kvarova odnosno otkaza sistema. Sa rastućim jediničnim snagama blokova prisutan je i rast jediničnih snaga elektromotornih pogona vlastite potrošnje, a time i zahtjevi vezani za način napajanja. Osnovni problem je postizanje sigurnog napajanja u raznim pogonskim situacijama, uz što manje iznose struja kratkog spoja i pad napona prilikom pokretanja velikih asinhronih motora. Rješenje se postiže pravilnim izborom transformatora vlastite potrošnje i nivoa napona. Termoelektrane ložene ugljom imaju daleko najsloženiji sistem vlastite potrošnje (izuzev postrojenja vlastite potrošnje za nuklearne elektrane), a čine ga sljedeća postrojenja, uređaji i mehanizmi vlastite potrošnje sa elektro pogonima u sastavu:

- Sistema za dopremu i skladištenje osnovnog goriva - uglja (odlagači, istovarne dizalice, transporteri, itd.);
- Sistema za potpalu i podršku vatre u kotlu (pretovarne mazutne pumpe, mazutne pumpe, itd.);
- Sistema za mljevenje uglja i pripremu ugljene prašine (mlinovi za ugalj, dozatori, dodavači, itd.);
- Kotlovskog postrojenja (elektrostatski filteri, ventilatori svježeg vazduha, ventilatori dimnih gasova, ventilatori recirkulisanog vrućeg vazduha, ventilatori hladnog gasa, itd.);
- Sistema odvoza šljake iz kotla (odšljakivač, drobilice šljake, transporteri, itd.);
- Sistema za odvod pepela iz kotla (ventilatori vazduha za fluidizaciju, kompresori vazduha za transport pepela itd.);
- Napojnog sistema kotla (elektronapojne pumpe, buster pumpe, itd.);
- Turbogeneratorsko postrojenja (kondenz pumpe I i II stepena, ejektorske pumpe, cirkulacione pumpe, mrežne pumpe, pumpe za hlađenje vodonika, pumpe za ulje, itd.);
- Postrojenje za termičku pripremu vode (pumpe za postrojenja za zagrijavanje, pumpe za povratni kondenzat, itd.);
- Pomoćni uređaji i postrojenja glavnog pogonskog objekta (drenažne i požarne pumpe, liftovi, mosne dizalice, ventili na parnim i vodenim linijama, uređaji za punjenje akumulatorskih baterija, rezervne budilice, itd.);
- Postrojenje pomoćnih objekata termoelektrane (hemijska priprema vode, radionica, mazutna stanica, kompresorska postrojenja, itd.).

U električnu opremu vlastite potrošnje termoelektrane spadaju i transformatori vlastite i opšte potrošnje svih naponskih nivoa, sklopna postrojenja srednjeg i niskog napona, električni motori, metalom oklopljeni vodovi i kablovi za povezivanje pojedinih dijelova vlastite potrošnje, ventili za upravljanje, postrojenje istosmjernog napajanja, agregati za sigurnosno napajanje, kao i električna rasvjeta. U zavisnosti od njihove funkcije, pojedini potrošači vlastite potrošnje mogu biti od posebnog interesa (bitni) ili pomoćni. Prva grupa potrošača su oni čije i kratkotrajno zaustavljanje izaziva sniženje proizvodnje električne energije ili dovodi do zaustavljanja osnovnih agregata termoelektrane, a u posebnim slučajevima može izazvati i oštećenje osnovne i pomoćne opreme. Ovu grupu čine elektronapojne, kondenz pumpe I i II stepena, cirkulacione (rashladne) pumpe, ventilatori svježeg vazduha, ventilatori recirkulisanog vrućeg vazduha, ventilatori hladnog gasa, ventilatori dimnih gasova, dodavači i dozatori uglja, mazutne pumpe, električni pogoni ventila, itd. Pomoćni mehanizmi (potrošači) su oni čije kratkotrajno zaustavljanje izaziva smanjenje proizvodnje električne energije, a čine je mehanizmi za dopremu uglja, otprema šljake i pepela, itd. Uvažavajući mogućnost potpunog nestanka napona u termoelektrani pri havarijama, neki od bitnih mehanizama vlastite potrošnje ponekad se opremaju parnim pogonom pomoću oduzimanja pare iz turbine. To su najčešće elektronapojne pumpe parnog kotla bloka.

Za pogon potrošača vlastite potrošnje prvenstveno se primjenjuju asinhroni motori s kratkospojenim rotorom, koji su u poređenju sa drugim motorima pouzdaniji, ekonomičniji, jeftiniji i jednostavniji. Za njih nisu potrebni posebni uređaji za puštanje u pogon. Nabrojane prednosti potpuno kompenzuju neke njihove nedostatke, poput visokih vrijednosti poteznih struja, otežani uslovi regulacije brzine i sl.). Osim asinhronih motora, u termoelektranama se koriste i istosmjerni motori za rezervne uljne pumpe i neke takođe važne potrošače napajane istosmjernim naponom. Ako se pođe od činjenice o ukupnom broju motora za blokove snage 200 MW i 300 MW, koji iznosi preko 300 motora različitih nazivnih snaga i naponskih nivoa, onda nije teško zaključiti da je veoma bitno obezbijediti njihov pouzdan rad i pogonsku spremnost u svakom trenutku. Kako se u termoelektranama primjenjuju motori nazivnih snaga ispod 1 kW pa do nekoliko MW, to se za napajanje velikih motora (nazivne snage iznad 180 kW) koristi srednji napon (najčešće 6 ili 10 kV). Za napajanje niskonaponskih motora najčešće se koristi 0,4 kV, kako zbog korišćenja standardnih izvedbi motora tako i zbog olakšanog zadovoljenja zahtjeva zaštite od indirektnog dodira.

U okviru Tabele I dat je prikaz potrebnih jediničnih snaga pogonskih elektromotora za blokove TEP različitih nominalnih snaga. Uočava se da snage elektromotora ne rastu linearno sa snagama blokova, što se može protumačiti konstrukcijskim rješenjima i posebnostima, što osobito vrijedi za generatore pare.

TABELA I. PRIKAZ POTREBNIH JEDINIČNIH SNAGA POGONSKIH ELEKTROMOTORA ZA BLOKOVE TEP RAZLIČITIH NOMINALNIH SNAGA

Naziv pogonskog mehanizma	Snaga bloka, MW			
	413	520	666	827
	Jedinična snaga pogon. elektromotora, kW			
Napojne pumpe	7000	turbo	5000	10000
Pumpe rashladne vode, cirkulacione pumpe	1250	2500	2000	1500
Kondenzatne pumpe	600	1000	1500	1280
Pomoćne niskopritisne pumpe	300	600	1000	1500
Usisni ventilatori	-	7000	6000	5000
Ventilatori pod pritiskom	5500	8000	3500	6000
Kompresori za opšte potrebe	100	400	600	600

B. Analiza dosadašnje eksploatacije TE Ugljevik 1

U periodu od 1975 do 1978. godine trajali su istražni i pripremni radovi kao i izrada projektne dokumentacije za izgradnju termoelektrane. Tehnički projekat je urađen za dva bloka 2x300 MW a projekat je uradila firma iz tadašnjeg SSSR-a "Teplenergoprojekt" (MOTEP). Izgradnja termoelektrane je zbog finansijskih problema trajala punih osam godina. Pripreme za probni pogon počele su tokom 1984 godine paralelno sa završetkom montažnih radova. Po završetku priprema i ispitivanja postrojenja pokrenute su operacije za puštanje termoelektrane u pogon. Prva sinhronizacija generatora na mrežu elektro energetskog sistema je bila 29.03.1985. godine u 23 časa 45 minuta, da bi u novembru mjesecu iste godine krenula sa redovnom proizvodnjom. Instalirana snaga termoelektrane Ugljevik I je 300 MW sa projektovanim godišnjom proizvodnjom od 1.601 GWh. TE Ugljevik I je projektovana da radi 200.000 h, a zaključno sa 2015. godinom blok je radio na mreži elektroenergetskog sistema 165.600,66 h što je 82,47 % projektovanog radnog vijeka, pri čemu je proizvedeno, na generatoru 40.249,22 GWh odnosno predato na mrežu 36.927,27 GWh električne energije, Tabela II. Ostvarena je srednja snaga na pragu termoelektrane 222,99 MW što je 74,62 % od instalirane snage. Termoelektrana je u tom periodu imala 553 zastoja. Termoelektrana Ugljevik I ima vrlo kvalitetnu vezu sa prenosnom mrežom, tako što je preko blok-generatorskog transformatora 20/400 kV i razvodnog postrojenja, smještenog neposredno uz objekat spojena na elektroenergetski sistem preko tri 400 kV dalekovoda i to: DV Tuzla (BiH), DV Ernestinovo (Hrvatska) i DV Sremska Mitrovica (Srbija), koji pojedinačno imaju propusnu moć od 1260 MVA. Pored tri 400 kV dalekovoda, preko transformatora 400/115 kV termoelektrana je spojena, takođe, sa tri dalekovoda 110 kV na mrežu Republike Srpske i to: DV Zvornik, DV Bijeljina i DV Lopare. Funkcionalnu organizaciju termoelektrane čine sledeće radne cjeline i službe: Uprava termoelektrane, Proizvodnja električne energije, Održavanje TE, Centralna hemijska laboratorija, Investicije i razvoj, Remontna radionica i Služba zaštite na radu i zaštite od požara. Istovremeno sa izgradnjom termoelektrane izgrađen je i površinski kop Bogutovo Selo na udaljenosti od oko 2 km od termoelektrane. Ugalj se od rudnika do termoelektrane transportuje transporterom sa trakom. Eksploatacija mrkog uglja u Ugljevičkom basenu vrši

se od 1899. godine, i do danas otkopano je oko 43 miliona tona uglja. Do 1985. godine proizvodnja uglja bila je namjenjena širokoj potrošnji, a od 1985. godine najvećim dijelom, oko 97%, za potrebe TE Ugljevik 1 i oko 3% za široku potrošnju. Na površinskom kopu Bogutovo Selo eksploatacija se izvodi od 1978. godine i zaključno sa 2014. godinom otkopano je oko 42 miliona tona uglja i oko 228 miliona čm³ otkrivke. Količina uglja do kraja eksploatacije sa ovog površinskog kopa iznosi oko 11 miliona tona. Projektovani godišnji kapacitet površinskog kopa iznosi 8,3 miliona čm³ otkrivke i 1,75 miliona t uglja. Prosječni eksploatacioni koeficijent otkrivke iznosi 5,79 čm³/toni. Transport uglja od otkopnih polja do objekta drobilane vrši se kamionima različite nosivosti. U drobilani se izvodi dvostepeno drobljenje uglja na granulaciju od 30 mm. Nakon toga, ugalj se transportuje transporterom sa gumenom trakom do deponije termoelektrane. Funkcionalnu organizaciju radne jedinice Rudnik čine sledeće radne cjeline i službe: Uprava Rudnika, RC Otkrivka, RC Proizvodnja uglja, RC Priprema i otprema uglja, RC Elektromašinsko održavanje, Razvoj i plan rudnika i Služba zaštite na radu i zaštite od požara. Iz „Rudnika i termoelektrane Ugljevik“ je u prvih šest mjeseca ove godine (I-VI 2017.) u elektroenergetski sistem Republike Srpske isporučeno 1.010,89 GWh električne energije što u odnosu na plan za taj period (639 GWh) predstavlja ostvarenje od 100,63 %. Rad termoelektrane je pratio i adekvatan rad rudnika PK „Bogutovo Selo“ gdje je sa ostvarenih 904.284 tona uglja plan proizvodnje za prvih šest mjeseci 2017. godine ostvaren sa 100%, a i ostvarenje otkrivke je takođe na nivou planirane. U ovom periodu su obavljene i pripreme za kapitalni remont termoelektrane u toku koga su, pored ostalog, planirani da se urade kapitalni remont turbine i generatora, kao i velika sanacija cjevnog sistema kotla i zamjena elektrofiltera kotla novim u cilju postizanja evropskih normi kvaliteta dimnih gasova na izlazu iz dimnjaka. U fazi je i realizacija projekta ugradnje sistema odsumporavanja dimnih gasova iz kotla bloka. Kapitalni remont termoelektrane je planiran da se radi tokom ljeta od jula do polovine oktobra radi zamjene elektrofilterskog postrojenja kotla, što je dogovoreno sa Elektroprivredom Republike Srpske. Paralelno sa remontom termoelektrane uradiće se i remont postrojenja za pripremu i otpremu uglja na rudniku.

Ostvarene karakteristike u eksploataciji bloka termoelektrane grupisane su prema pripadnosti za ocjene i analizu efekata eksploatacije bloka termoelektrane u tri grupe, [3], [7], [8]: vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji, energetske karakteristike ostvarene u eksploataciji i tehničko-ekonomske karakteristike ostvarene u eksploataciji.

C. Vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji

Vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji 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.

TABELA II. PRIKAZ PROIZVODNIH REZULTATA U EKSPLOATACIJI BLOKA TE UGLJEVIK I

Godina eksploatacije	Bruto izlaz – proizvodnja električne energije na generatoru (E_G), kWh	Neto izlaz – električna energija na pragu elektrane (E_P), kWh	Srednja raspoloživa bruto snaga – kapacitet $R_B = E_G / (T_e \cdot 1000)$, MW	Srednja raspoloživa neto snaga – kapacitet $R_N = E_P / (T_e \cdot 1000)$, MW	Vlastita potrošnja (E_{VP}), kWh	Koeficijent vlastite potrošnje $K_{VP} = E_{VP} / E_G$	Vrijeme rada (T_e), h
1985	977.807.920	906.308.216	239,86	222,32	71.499.704	0,073	4722,6
1986	1.534.742.880	1.403.085.182	243,17	222,31	131.657.698	0,086	6311,4
1987	1.355.066.880	1.241.765.896	246,57	225,86	113.300.984	0,084	5495,6
1988	1.888.284.000	1.744.802.320	266,92	246,62	143.481.680	0,076	7074,4
1989	1.684.325.120	1.550.848.120	264,03	243,11	133.477.000	0,079	6379,2
1990	1.797.250.000	1.664.838.000	256,79	237,87	132.412.000	0,074	6998,8
1991	1.490.117.000	1.383.320.000	246,79	229,10	106.797.000	0,072	6038,1
1992	605.184.000	560.929.000	234,46	222,32	44.255.000	0,073	2581,2
1993	0	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0
1995	112.533.000	101.668.000	197,41	178,27	10.865.000	0,0965	570,03
1996	953.064.000	850.298.586	209,61	187,01	102.765.414	0,108	4546,8
1997	1.047.381.400	940.326.970	215,36	193,35	107.054.430	0,102	4863,3
1998	1.310.179.200	1.176.657.261	213,4	191,65	133.521.939	0,102	6139,5
1999	1.399.555.200	1.271.027.809	213,91	194,27	128.527.391	0,092	6542,6
2000	1.165.401.600	1.062.154.898	227,86	207,67	103.246.702	0,089	5114,6
2001	1.009.428.000	917.293.017	213,74	194,23	92.134.983	0,091	4722,6
2002	1.341.202.560	1.235.290.673	235,35	216,77	105.911.887	0,079	5698,7
2003	1.338.798.240	1.229.237.428	228,07	209,40	109.560.812	0,082	5870,2
2004	1.129.579.200	1.024.719.476	223,67	202,91	104.859.724	0,093	5050,2
2005	1.042.860.000	944.411.397	237,06	214,68	98.448.603	0,094	4399,1
2006	1.392.469.920	1.259.995.635	229,92	208,05	132.474.285	0,095	6056,4
2007	1.582.463.520	1.441.501.094	245,40	223,25	142.165.719	0,090	6456,8
2008	1.660.921.440	1.512.545.954	246,80	224,73	148.375.486	0,089	6730,6
2009	1.687.237.920	1.554.699.541	249,50	229,91	132.538.379	0,079	6762,3
2010	1.423.314.840	1.315.720.000	250,74	231,79	107.594.840	0,076	5676,43
2011	1.977.944.160	1.836.224.000	274,36	254,70	141.720.160	0,072	7209,40
2012	1.982.602.560	1.837.054.000	266,70	247,12	145.548.560	0,073	7433,90
2013	1.749.621.480	1.616.802.000	264,46	244,36	132.819.480	0,076	6617,2
2014	1.718.047.200	1.591.398.000	265,40	245,83	126.649.200	0,074	6473,5
2015	1.891.836.960	1.752.352.000	267,77	248,03	139.484.960	0,074	7065,2
2016	1.888.335.840	1.749.968.000	263,35	244,05	139.378.960	0,074	7170,5
2017	1.010.888.640*	936.244.000	255,46	236,6	74.644.640	0,074	3957,1
UKUPNO	42.137.556.040	39.613.486.473	238,43	224,15	3.537.172.620	0,084	176728,26

*- do početka kapitalnog remonta 01.07.2017. godini

Normativi za vremenske karakteristike blokova od 300 MW i većih snaga su, [1]:

- 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 III. 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 I za razmatrani period, treba istaći sljedeće:

- ostvarene su izuzetno loše vremenske karakteristike;
- izvršen je kapitalni remont i ostvareni 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 šahti letećim pepelom, uz začepjenja 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.

TABELA III. VREMENSKE KARAKTERISTIKE OTKAZA-ZASTOJA U TOKU EKSPLOATACIJE NA BLOKU TE UGLJEVIK I

Godina eksploatacije	Kalendarsko vrijeme u eksploataciji - $T_{k,h}$	Trajanje remonta u eksploataciji - $T_{r,h}$	Trajanje neplanskih zastoja - $T_{nz,h}$	Trajanje planskih zastoja - $T_{pz,h}$	Trajanje zastoja zbog potiskivanja sa mreže - $T_{p,h}$	Ostvareni koeficijenti otkaza - zastoja				Broj zastoja
						Koeficijent remonta - K_r	Koeficijent neplanskih otkaza - K_{nz}	Koeficijent planskih otkaza - K_{po}	Koeficijent potiskivanj a-Kp	
1985	6652	580,1	1.294,2	701	0,0	0,0862	0,1950	0,1160	0,0000	22
1986	8760	1.086,4	826,4	535,76	0,0	0,1240	0,0943	0,0612	0,0000	34
1987	8760	2.056,3	540,5	667,6	0,0	0,2347	0,0617	0,0762	0,0000	19
1988	8784	967,1	627,3	115,3	0,0	0,1101	0,0714	0,0131	0,0000	13
1989	8760	1.603,3	612,3	165,2	0,0	0,1830	0,0699	0,0189	0,0000	19
1990	8760	988,4	546,3	226,9	0,0	0,1128	0,0624	0,0259	0,0000	11
1991	8760	1.471,8	897,1	0	353,0	0,1680	0,1024	0,0000	0,0403	17
1992	8784	0,0	142,6	1092,7	0,0	0,0000	0,0162	0,6899	0,0000	3
1993	8760	0	0	8760	0	0	0	1	0	-
1994	8760	0	0	8760	0	0	0	1	0	-
1995	8760	1.824,0	326,7	6060,2	0,0	0,2082	0,0373	0,6894	0,0000	7
1996	8784	2.208,0	614,3	6039,3	0,0	0,2514	0,0699	0,1244	0,0367	18
1997	8760	2.779,0	1.117,7	0	322,2	0,3172	0,1276	0,0000	0,0000	16
1998	8760	1.683,1	937,4	0	0,0	0,1921	0,1070	0,0000	0,0000	18
1999	8760	1.375,2	662,5	179,72	0,0	0,1570	0,0756	0,0205	0,0000	24
2000	8784	1.441,1	1.683,5	544,9	0,0	0,1641	0,1917	0,0620	0,0000	28
2001	8760	1.749,2	1.602,7	685,3	0,0	0,1997	0,1830	0,0782	0,0000	17
2002	8760	1.492,0	1.387,0	182,3	0,0	0,1703	0,1583	0,0208	0,0000	26
2003	8760	1.358,7	1.531,2	0	0,0	0,1551	0,1748	0,0000	0,0000	22
2004	8784	768,0	1.568,0	128,4	0,0	0,0874	0,1785	0,0146	0,1445	23
2005	8760	1.970,9	1.072,1	981,8	1269,4	0,2250	0,1224	0,1121	0,0384	24
2006	8760	931,0	1.454,7	114,9	336,2	0,1063	0,1661	0,0131	0,0232	27
2007	8760	1.112,6	484,1	694,9	203,0	0,1270	0,0553	0,0793	0,0013	22
2008	8784	1.083,9	354,4	556,7	11,6	0,1234	0,0403	0,0630	0,0070	16
2009	8760	985,0	471,2	370,27	58,4	0,1124	0,0538	0,0423	0,0195	24
2010	8760	2.431,2	539,4	0	171,2	0,2775	0,0616	0,0000	0,0129	16
2011	8760	678,0	556,2	316,48	113,0	0,0774	0,0635	0,0361	0,0000	21
2012	8784	887,1	369,7	93,32	0,0	0,1010	0,0421	0,0106	0,0000	13
2013	8760	1.484,4	463,6	194,85	0,0	0,1695	0,0529	0,0222	0,0000	17
2014	8760	1.705,6	516,8	63,95	0,0	0,1947	0,0590	0,0073	0,0000	16
2015	8760	885,0	666,4	146,5	0,0	0,1010	0,00682	0,02425	0,0000	21
2016	8784	1009,72	408,20	195,62	0,0	0,1149	0,0465	0,0223	0	16
2017	8760	Remont u toku	321,50	64,40	0,0	-	0,08536	0,0223	0	13

*- do početka kapitalnog remonta 01.07.2017. godini

Najpovoljnije vremenske karakteristike su ostvarene 2012. godine, sa sljedećim karakteristikama, [1]:

- 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 otkaza je utrošeno oko 93 časa);

- potiskivanja sa mreže nije bilo, što pokazuje da viška energije na tržištu takođe 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 takođe 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 2015. 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 2015. godine).

III. PREGLED VREMENSKIH KARAKTERISTIKA BLOKA TE UGLJEVIK – SREDNJE VRIJEDNOSTI NA GODIŠNJEM NIVOU

Godina eksploatacije	Koeficijent eksploatacije K_e	Koeficijent neplanskih otkaza K_{no}	Koeficijent planskih otkaza K_{po}	Koeficijent remonta K_r	Koeficijent potiskivanja K_p	Koeficijent otkaza - zastoja K_o	Broj zastoja otkaza, 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	0,7720	0,0926	0,0078	0,1124	0,0152	0,2280	24
2010	0,6479	0,0447	0,0169	0,2776	0,0129	0,3521	15
2011	0,8230	0,0635	0,0361	0,0774	0	0,1770	21
2012	0,8463	0,0399	0,0128	0,1010	0	0,1537	13
2013	0,7554	0,0593	0,0159	0,1694	0	0,2446	17
2014	0,7390	0,0590	0,0073	0,1947	0	0,2610	16
2015	0,8065	0,0682	0,02425	0,1010	0	0,1935	21
2016	0,8185	0,0465	0,0223	0,1149	0	0,1837	16
2017	0,9109	0,0853	0,0223	Remont u toku	0	0,1076	13

*- do početka kapitalnog remonta 01.07.2017. godini

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:

- ostvareno vrijeme eksploatacije za analizirani period u odnosu na ukupno vrijeme eksploatacije od prve sinhronizacije iznosi 46,03 %, dok je u odnosu na ukupno kalendarsko vrijeme samo 28,16 %;
- ostvareni koeficijent eksploatacije u analiziranom periodu je veći za 0,11 ili za 18 % u odnosu na cjelokupni efektivni rad termoelektrane;
- blok termoelektrane je od prve sinhronizacije i zaključno sa 2015. godinom odradio 164.954 efektivnih časova rada, što predstavlja 82,5 % 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 efektivnih časova rada. Radni vijek se može produžiti do 250.000 efektivnih časova rada ako se na vrijeme planiraju i izvrši revitalizacija uređaja, postrojenja i dijelova bloka, uz ekonomsku opravdanost i zadovoljenje ekoloških normi. Pod dobrim izvršenjem navedenih 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 istorijata 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 skraćena 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 240, što je 43,3 % 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.

D. Energetske karakteristike ostvarene u eksploataciji

Srednje vrijednosti energetske karakteristike za posmatrani period su date u Tabeli IV. 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 karakteristika može se grupisati u četiri grupe i to: prva grupa (godine 2004., 2005. i 2006.), druga grupa (godine 2007., 2008., 2009. i 2010.), treća grupa (godine 2011., 2012. 2013., 2014. i 2015.) i četvrta grupa (obuhvata period nakon izrade studije o energetskej efikasnosti, tj. godine 2016. i 2017.).

TABELA IV. PREGLED ENERGETSKIH KARAKTERISTIKA BLOKA TE UGLJEVIK– SREDNJE VRIJEDNOSTI NA GODIŠNJEM NIVOU

Godina eksploatacije	Koeficijent iskorišćenja snage K_N	Koeficijent vlastite potrošnje K_{vp}	Koeficijent iskorišćenja kapaciteta K_{ik}	Koeficijent korisnog dejstva TE - bruto η_{te-bru}	Koeficijent korisnog dejstva TE - neto $\eta_{te-neto}$
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
2014	0,885	0,0737	0,654	0,3381	0,3166
2015	0,893	0,0737	0,720	0,3421	0,3169
2016	0,893	0,0737	0,720	0,3421	0,3169
2017	0,893	0,0737	0,720	0,3421	0,3169
Normativ:	1.000	0,0700	0,75/0,80/0,825	0,3400	0,3200

U prvoj grupi nivo srednje ostvarenih koeficijenata iskorišćenja 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 iskorišćenja kapaciteta do 0,565 (manji od 60 %). U drugoj grupi posmatranog vremenskog proizvodnog perioda se nivo ostvarenih karakteristika iskorišćenja snage povećao do 0,835 (2010. godina), a koeficijent vlastite potrošnje smanjio na vrijednosti do 7,52 % (2010. godina). Ostvarene vrijednosti koeficijenta iskorišćenja snage su povećane za oko 5,5 %, a koeficijent vlastite potrošnje je smanjen drastično čak i do 16 %.

Koeficijent iskorišćenja 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 iskorišćenja kapaciteta 0,542. U trećoj grupi posmatranog vremenskog proizvodnog perioda ostvarene su srednje vrijednosti energetske karakteristika iskorišćenja 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 iskorišćenja 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 iskorišćenja bloka termoelektrane je niži od normativne vrijednosti za oko 3 % u prosjeku, Tabela IV.

E. Tehničko-ekonomske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka TE Ugljevik 1

Ostvarene tehničko ekonomske karakteristike u eksploataciji bloka TE su predstavljene u Tabelama IV, V, VI i VII. 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 V. Za analizirani vremenski period proizvodnje električne energije od dvanaest godina ostvarena je srednja specifična potrošnja uglja – bruto od 1,0378 (kg/kW_eh) i neto 1,1289 (kg/kW_eh) i specifična potrošnja potpalinog goriva (mazuta) – bruto od 0,001561(kg/kW_eh) i neto – 0,001698 (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 VI.

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 dvanaestogodišnji 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

(10.167 kJ/kg) je u projektnim granicama, a odstupanje od garancijske vrijednosti (10.495 kJ/kg) je 3,1 prema nižoj projektnoj vrijednosti.

TABELA V. PREGLED OSTVARENIH SPECIFIČNIH UTROŠAKA GORIVA BLOKA – SREDNJE VRIJEDNOSTI NA GODIŠNJEM NIVOU

Godina eksploatacije	Specifična potrošnja uglja – bruto, g_{og} , kg/kWeh	Specifična potrošnja uglja – neto, g_{og}^n , kg/kWeh	Specifična potrošnja mazuta - bruto, g_{pg} , kg/kWeh	Specifična potrošnja mazuta - neto, g_{pg}^n , kg/kWeh	Donja toplotna moć trošenog uglja, 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
2014	1,0324	1,1146	0,001595	0,001722	10.138
2015	1,0232	1,1046	0,001333	0,001439	10.230
2016	1,0152	1,0955	0,001272	0,001373	10.311
2017	1,0423	1,1254	0,001431	0,001546	10.057
Proračunski:	1,009	1,0719	0,0015	0,0017	10.495

Za ocjenu ekonomičnosti proizvodnje električne energije značajni su i faktori specifične potrošnje sirove, dekarbonizovane i demineralizovane vode, Tabela VII. 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 dvanaestogodišnje potrošnje uspostaviti novi normativ u svrhu preciznijeg planiranja i kvalitetnijih analiza troškova. Uz optimizaciju procesa proizvodnje i potrošnje dekarbonizovane vode i na bazi dvanaestogodišnjeg praćenja ostvarene specifične potrošnje za normativ bi se mogla dati preciznija vrijednost od 0,0028 m³/kW_eh i odnosio bi se na neto specifičnu potrošnju, a za

bruto je vrijednost 0,0026 m³/kW_eh. Analize pokazuju da su potrošnje demineralizovane vode niže od normativnih vrijednosti, pa za analizirano vrijeme proizvodnje električne energije od dvanaest 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 dvanaestogodišnjeg praćenja ostvarene specifične potrošnje za normativ bi se mogla dati preciznija vrijednost od 0,00029 m³/kW_eh i odnosio bi se na neto specifičnu potrošnju, a za bruto je vrednost 0,00027 m³/kW_eh. 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 VI. PREGLED KOLIČINA PROIZVEDENE ELEKTRIČNE ENERGIJE I SPECIFIČNE POTROŠNJE TOPLOTNE ENERGIJE IZ GORIVA

Godina eksploatacije	Proizvodnja električne energije, E_G , kWh	Predata proizvedena električna energija na mrežu EES, E_p , kWh	Specifična potrošnja toplotne energije iz uglja - bruto, q_{og}^b , kJ/kWeh	Specifična potrošnja toplotne energije iz uglja – neto, q_{og}^n , kJ/kWeh	Specifična potrošnja toplotne energije iz mazuta – bruto, q_{pg}^b , kJ/kWeh	Specifična potrošnja toplotne energije iz mazuta – neto, q_{pg}^n , kJ/kWeh
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
2014	1.718.047.200	1.591.398.000	10.467	11.300	65,395	70,60
2015	1.891.836.960	1.752.352.000	10.488	11.301	54,66	59,01
2016	1.888.335.840	1.749.968.000	10.469	11.296	52,15	56,28
2017	1.010.888.640	936.244.000	10.284	11.318	58,69	63,37

IV. REZULTATI OPTIMIZACIJE PROCESA NA TERMoeLEKTRANI

A. Optimizacija u strukturi organizacije procesa rada TE

Optimizacija u strukturi organizacije procesa u okviru termoelektrane predstavlja vrlo važan faktor sa efektima na: sigurnost, pouzdanost, energetska efikasnost i ekonomičnost eksploatacije. Dobijeni optimizirani režimi rada za konkretne

uslove i za razmatranu termoelektranu omogućuju eksploatacionom osoblju koje vodi i prati rad bloka termoelektrane preventivno djelovanje uz svođenje rizika na minimum. Tako se na vrijeme registruje bilo kakva promjena kvaliteta uglja i propisuju uslovi za preventivno djelovanje, uz prateće preporuke za intervencije eksploatacionom personalu.

TABELA VII. PREGLED KOLIČINA PROIZVEDENE ELEKTRIČNE ENERGIJE I SPECIFIČNE POTROŠNJE TOPLOTNE ENERGIJE IZ GORIVA

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
2014	0,0020164	0,0021769	0,002226	0,002403	0,0001558	0,0001444
2015	0,00426195	0,0046012	0,002194	0,002368	0,0001563	0,0001687
2016	0,00387637	0,00418286	0,002000	0,002158	0,0001575	0,0001699
2017	0,00396934	0,00428581	0,002215	0,002392	0,0001787	0,0001929
Normativ:	-	-	0,00284	0,00306	0,00030	0,00032

Od posebne važnosti je i saradnja stručnih timova sa eksploatacionim personalom, s ciljem postizanja što boljih uslova za vođenje uspostavljenih režima i sprovođenje pratećih eksperimenata (testova). Ova sinhronizacija u radu je od izuzetnog značaja za postizanje dobrih krajnjih rezultata, izradu tehničke dokumentacije i režimske karte rada bloka u eksploataciji, koja predstavlja završni stručni tehničko tehnološki dokument (režimsku kartu), nastao kao rezultat optimizacije parametara od strane stručnih timova na termoelektrani (TE). Režimske karte se izrađuje za vođenje i praćenje tehnološkog procesa termoelektrane, za pojedina postrojenja i dijelove procesa koji su od značaja za optimalan, pouzdan i siguran rad. Preporuke i podatke koje treba da sadrži režimska karta prikazane su u Tabeli VIII.

B. Racionalizacija potrošnje energije i prepreke za njihovo sprovođenje

Tendencija za racionalnim korišćenjem energije u razvijenim zemljama podrazumijeva da se za istu količinu proizvoda utroši što manje energije, [2]. Energetska i procesna industrija je uvijek iz ekonomskih razloga koristiti energiju što racionalnije. Kod razmatranja ukupno potrebne energije, za određeni proces proizvodnje, potrebno je uzeti u obzir ne samo potrošače energije, već cijeli proizvodni sistem kao cjelinu. Jednoj takvoj analizi koriste se različiti slijedeći kriteriji, od kojih posebno treba istaknuti sljedeće: procjenu korišćenja energije i sirovina, smanjenje zagađenja okoline, poboljšanje radnih uslova, poboljšanje kvalitete proizvoda, kao i procesa proizvodnje. Pri tome, sprovođenje racionalizacija potrošnje energije u okviru energetske i procesne kompanije imaće

dvostruki efekat (kako mikroekonomski efekat za onu radnu organizaciju koja ju sprovodi, tako i makroekonomski efekat za cijelu državu). Sa jedne strane, kompanija će smanjiti svoje troškove za energiju, pri čemu obim i veličina potencijalnih ušteda raste sa starošću postrojenja, kao i kvaliteta sprovedenog održavanja, a sa druge strane korist koju ostvaruje država leži u činjenici da će potrošnja energije ostati na istom stalnom nivou ili će se smanjiti i uz povećanu industrijsku proizvodnju i izgradnju novih fabrika. Smanjuju se i potrebe za investicijama u nove izvore energije. Zbog toga država treba svojom politikom (u prvom redu poreznom i kreditnom politikom) stimulirati ulaganja u projekte energetske efikasnosti i racionalizacije potrošnje energije. Poseban efekat kod racionalnije potrošnje energije je i sa aspekta zaštite životne sredine. Kako povećana potrošnja energije narušava održavanje postojeće ekološke ravnoteže, bilo kakvo smanjenje potrošnje energije ima uticaja i na mikro klimu (od poboljšanja radnih uslova do smanjenja zagađenja bliže okoline, ali i znatno šire za čitavo čovječanstvo, jer zagađenje prirode ne priznaje državne granice). Racionalizaciju potrošnje energije čini skup mjera kojima se, uz promjene organizacije rada, načina korištenja postrojenja i uređaja sa pratećom opremom, uređenja okoline i materijala, a uzimajući u obzir i sigurnost rada, zaštitu zdravlja i okoline, ostvaruje optimalna proizvodnost, potreban nivo kvaliteta proizvoda, kao i rentabilnost i ekonomičnost, uz prateće smanjenje utroška energije po jedinici proizvoda. Racionalizaciju korišćenja energije i prepreke za njihovo sprovođenje možemo svrstati u četiri grupe, Tabela IX.

TABELA VIII. PRIKAZ REZULTATA OPTIMIZACIJE PARAMETARA OD STRANE STRUČNIH TIMOVA NA TE

Stručni tim	Projektni zadatak	Preporuke i podaci sadržani u režimskoj karti	Napomena
Tim za pripremu, praćenje i analizu kvaliteta goriva	Režimska karta optimalnog vođenja dopreme uglja	<ol style="list-style-type: none"> 1. Način prijema uglja – praćenje kvaliteta i količina sa Rudnika 2. Način odlaganja i miješanja na deponijama uglja termoelektreane 3. Odloženi ugalj po deponijama pokvalitetu i količinama 4. Plansko uzimanje uglja sa deponija i punjenja kotlovskih bunkera 5. Način uzorkovanja uglja sa deponija i vrsti analiza koje se sprovede 6. Saradnja sa ostalim timovima i razmjena rezultata 7. Saradnja sa operativnim personalom 	<ol style="list-style-type: none"> A. Izradom i primjenom režimske karte se onemogućuje da ugalj nepoznatog kvaliteta dospije do ložišta kotla B. Režimska karta se detaljno razrađuje sa eksploatacionim personalom dopreme i pripreme uglja, uz strogo pridržavanje propisanih preporuka C. Primjena režimske karte olakšava rade ksploatacionom personalu kotlovskog postrojenja bloka i ima pozitivan efekat u radu kotla u okviru termoelektreane u cjelini
Tim optimizacije parametara tehnološkog procesa kotlovskog postrojenja	Parametri i veličine koje sadrži režimska karta optimalnog vođenja kotlovskog postrojenja bloka termoelektreane	<ol style="list-style-type: none"> 1. Protok i temperatura napojne vode, 2. Temperatura medija u bubnju (za kotlove sa bubnjem), 3. Temperatura medija na izlazu iz ložišnog dijela (ako seradi o protočnim kotlovima sa nadkrićnim parametrima), 4. Temperatura medija na izlazu iz pojedinih pregrejača pare, 5. Temperatura i pritisak primarne pare na izlazu iz kotlai pred turbinom, 6. Temperatura međupregrijane pare na ulazu i izlazu iz kotla (ukoliko kotao ima međupregrejače), 7. Broj ventilatora : dimnih gasova, svježeg vazduha i recirkulacije hladnih dimnih gasova i vrućeg vazduha (ako ih kotao ima ugrađene) u radu 8. Brzina obrtanja ventilatora 9. Broj mlinova u radu 10. Visina sloja uglja u dozatorima, uz napomenu visineza svaki dozator, uz mogućnost regulacije doziranjauglja (propisane vrednosti), propisane vrijednosti položaja uređaja za raspored ugljenog praha po gorionikima i uređaja za finoću meljave (separacione klapne mlinova), 11. Podpritisci ispred mlinova i temperatura aerosmješe iza mlinova 12. Sadržaj kiseonika u dimnim gasovima iza pojedinih ogrevnih površina kotla, sa protokom vazduha ka kotlu 13. Procenat otvorenost klapni na sekundarnom vazduhu za gorionike uglja i klapni na dodavanju primarnog i tercijalnog vazduha 14. Procenat otvorenost klapni na dodavanju recirkulisanih hladnih gasova (ukoliko se koristi u procesu) i otvorenost klapni na dodavanju vazduha zasušenje 	<ol style="list-style-type: none"> A. Koristi rezultate tima za pripremu, praćenje i analizu kvaliteta goriva u razradi i analizi rezultata podešavanja iispitivanja kotlovskog postrojenja, izradi tehničkog izvještaja i režimske karte tehnološkog procesa kotlovskog postrojenja, B. Režimska karta se izrađuje po završenoj optimizaciji režima zamaksimalnu, nominalnu, minimalnu snagu i tri snage između nominalne i minimalne, C. Režimska karta treba da sadrži naziv parametara, oznaku i snagu sa vrijednostima i uputstvima, D. Propisuje se i režim čišćenja ogrijevnih površina za postojeće sisteme (ukoliko ih kotao posjeduje) E. Daju se i preporuke za pojedina postrojenja i pojave do kojih se došlo u fazi podešavanja i ispitivanja, F. Režimsku kartu vođa tima sa specijalistima reprezentuje radnom personalu i objašnjava njenu primjenu, G. Režimska karta se postavlja na vidno mjesto u termo komandi bloka, kako bi rukovaoici mogli da je koriste pri upravljanju, vođenju, poređenju veličina i analiziranih parametara, H. Eksploatacioni personal primjedbe na primjenu režimske karte (ako se pojave nelogičnosti) dostavlja vodi tima optimizacije, koje sa saradnicima razmatra i ponovo ispituje i dokazuje
Tim optimizacije parametara tehnološkog procesa kotlovskog postrojenja	Režimska karta za maksimalnu, nominalnu, minimalnu snagu i tri snage između nominalne i minimalne	<ol style="list-style-type: none"> 1. Maksimalne temperature u ložištu za bezšljakajući režim kotla 2. Temperature dimnih gasova po dimnom traktu kotla (iza ogrevnih površina pregrejača pare) i dimnih gasova iza zagrijača vazduha 3. Potpritisk u vrhu ložišta kotla 4. Podpritisk iza zagrijača vode 5. Otpori u zagrejaču vazduha 6. Podpritisk ispred dimnih ventilatora 7. Temperatura vazduha iza kalorifera prije ulaza uzagrijač vazduha 8. Minimalna temperatura zidova cijevi zagrijačavazduha na ulazu (ako je zagrijač cjevasti i ukoliko ugalj ima veliki sadržaj sumpora) 9. Sadržaj sagorljivog u šljaci i u pepelu u % 	
Tip optimizacije parametara turbinskog postrojenja	Režimska karta i prateći tehnički izvještaj uz prezentaciju eksploatacionom osoblju	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pritisak i temperatura pregrijane pare pred turbinom 2. Pritisak i temperatura ulja za podmazivanje i ulja za regulaciju 3. Osni pomak rotora turbine 4. Pritisak u komori regulacionog stepena turbine (sa uključenom i isključenom regeneracijom) 5. Maksimalna snaga (sa uključenom i isključenom regeneracijom) 6. Vakuum u turbinskom kondenzatoru 7. Protok demi vode u kondenzator 8. Nivo medija u kondenzatoru 9. Pritiske i temperature pare na oduzimmim mjestima iz turbine ka potrošačima pare 10. Nivo u zagrijačima visokog i niskog pritiska 11. Pritisak u spremniku napojne vode 12. Pritiske i temperature medija u regenerativnim uređajima (ZNP, ZVP i dr.) 	<ol style="list-style-type: none"> A. Parametri i veličine dobijene podešavanjima i ispitivanjima, obrađene i optimizirane se unosi u režimsku kartu B. Režimska karta sadrži ispitivane režime
Tim optimizacije parametara generatorskog i transformatorskog postrojenja	Režimska karta i prateći tehnički izvještaj uz prezentaciju eksploatacionom personalu	<ol style="list-style-type: none"> 1. Parametre i veličine dobijene podešavanjima iispitivanja obrađene i optimizovane za generatorsko postrojenje i prateću opremu, 2. Parametre i veličine dobijene podešavanjima i ispitivanja obrađene i optimizovane za transformatorsko postrojenje i prateću opremu, 3. Parametre i veličine dobijene podešavanjima i ispitivanja obrađene i optimizovane za prenosnu mrežu 	<ol style="list-style-type: none"> A. Rezultate optimiziranja generatorskog procesa i transformatorskih postrojenja daje u obliku tehničkog izvještaja i prezentuje eksploatacionom personalu ovog dijela vođenja i upravljanja postrojenja, B. Parametre i veličine dobiene podešavanjima i ispitivanja obrađene i optimizovane unosi u režimsku kartu, C. Režimska karta sadrži veličine za ispitivane režime

Kako racionalizacija potrošnje energije u industrijskom postrojenju predstavlja kompleksan problem koji dodiruje različita naučna područja znanosti, odnosno ima interdisciplinarni karakter koji zahtjeva saradnju između

stručnjaka različitih profila (energetičari, elektrotehničari, elektroničari, mašinci, stručnjaci za mehaniku, hemiju, ekonomiju i dr.), dok sprovođenje određenih mjera ponekad zahtijeva i učešće posebno specijalizovanih stručnjaka za to

područje. Važno je istaći da primjena mjera za povećanje efikasnosti i racionalizacije energije pokriva čitav životni ciklus tehničkog sistema, počev od razrade ideje i izrade investicionog projekta (osnovni radni vijek), kao i rekonstrukcije, revitalizacije i modernizacije postojeće opreme na tehničkom sistemu (produženi radni vijek), kao i pri eventualnoj dogradnji i održavanju postojećih sistema. Pri tome, ocjenjivanje svih potencijalnih mjera za upravljenje

energijom (sem tehničke opravdanosti) zahtijeva i ekonomsku analizu, koja treba da obuhvati uz čiste ekonomske pokazatelje opravdanosti investicije u neku mjeru ili mjere vezane za energetske efikasnost i način finansiranja, sa preciznim identifikovanjem izvora sredstava, što danas može predstavljati veliki problem za zemlje u tranziciji kakva je BiH.

TABELA IX. GRUPE MJERA RACIONALIZACIJE KORIŠĆENJA ENERGIJE I PREPREKE ZA NJIHOVO SPROVOĐENJE

Redni broj	Naziv grupe	Opis mjera za djelovanje	Prepreke za njihovo sprovođenje
1.	Poboljšanje stepena djelovanja (tehničko-organizacione mjere)	- povećavaju stepen djelovanja kod proizvodnje, transformacije, akumulisanja i transporta energije - za određenu količinu potrošene energije treba smanjiti potrošnju primarne energije (podešavanje sagorijevanja ili izmjena gorionika i sl.)	➤ tehničke prirode (nedostatak informacija o odgovarajućim tehničkim rješenjima i pomanjkanje iskustva u upravljanju energijom, nemogućnost analiziranja potrošnje energije zbog nedostataka specijalne opreme i mjernih instrumenata)
2.	Poboljšanje efikasnosti korišćenja (mjere rekonstrukcije, revitalizacije i modernizacije)	- postojeću korisnu energiju što efikasnije koristiti (npr. bolja izolacija, povećanje opterećenosti, rekonstrukcija zastarjelih postrojenja i sl.)	
3.	Upravljanje i usmjeravanje potrošnje (prinudne mjere)	- direktan uticaj na potrebe korisne energije (npr. niža temperatura prostorija, isključenje suvišne rasvjete, veća tehnološka disciplina) - njihovo provođenje zavisi uglavnom od ljudskog faktora, ali oni tokom vremena mogu biti prihvaćeni kao sasvim normalno stanje	➤ finansijske prirode (nedostatak novca, visoke kamate i nedostatak jednostavne i prihvatljive metode finansiranja kupovine opreme) ➤ ekonomske prirode (cijene energije, koje nisu realne u poređenju s cijenom proizvoda, nepoznavanje tačnog udjela troškova za energiju u cijeni proizvoda)
4.	Dugoročno strukturno smanjenje potreba (planske mjere)	- potrošnja energije se smanjuje izmjenom u strukturi proizvodnje - napuštaju se visokoenergetski proizvodi u korist visokoproduktivnih proizvoda uz malu potrošnju energije po jedinici proizvoda (primjena novih tehnologija) - zavisi od poslovne politike kompanije i zahtjeva dugoročno planiranje	

U zavisnosti od potrebnih finansijskih sredstava za finansiranje, potencijalne mjere mogu se svrstati u mjere koje ne zahtijevaju ulaganje finansijskih sredstava već uglavnom određeni napor i mijenjanje navika ljudi, zatim u mjere za čiju realizaciju su potrebna neznatna (mala) ulaganja, koje se

sprovode jednom i za koje troškovi nisu veliki (ali nisu ni zanemarljivi), kao i mjere koje zahtijevaju značajna (velika) finansijska sredstva, a koje se provode jednom u toku radnog vijeka tehničkog sistema, Tabela X.

TABELA X. PODJELA POTENCIJALNIH MJERA UPRAVLJANJA ENERGIJOM U ZAVISNOSTI OD POTREBNIH FINANSIJSKIH SREDSTAVA ZA FINANSIRANJE

Red. broj	Grpa mjera	Alternativan naziv	Kratki opis	Vremensko sprovođenje
1.	Mjere bez finansijskih ulaganja	Dobro upravljanje ili Domaćinsko ponašanje	- ne zahtijevaju ulaganje finansijskih sredstava već uglavnom određeni napor i mijenjanje navika ljudi - ne zahtijevaju ni korišćenje novih tehnologija	Sprovode se redovno, minimalno jednom mjesečno
2.	Mjere za čiju realizaciju su potrebna neznatna (mala) ulaganja	Bilansno upravljanje	- za koje troškovi nisu veliki, ali nisu ni zanemarljivi - u troškove sprovođenja ulaze troškovi nabavke pojedinih uređaja, troškovi montaže i uhodavanja uređaja i ljudi - uglavnom se koristi postojeća tehnologija, pa su zahtjevi za novom tehnologijom mali	Sprovode se bar jednom godišnje (redovan remont)
3.	Mjere koje zahtijevaju značajna (velika) finansijska sredstva	Plansko upravljanje ili Strategijsko upravljanje	- koje se provode jednom u toku radnog vijeka tehničkog sistema - zahtijevaju detaljnu tehničku i ekonomsku analizu opravdanosti ulaganja i izvora sredstava	Sprovođenje ovih mjera mora biti usko vezano sa planiranjem poslovne politike kompanije kako se ne bi sprovela neka mjera u proizvodnom procesu koji se relativno brzo napustiti (prije nego se vrate uložena sredstva)

V. EFEKTI OPTIMIZACIJE PROCESA NA TERMOELEKTRANI

U okviru Studije dat je pregled rezultata sprovedene analize mogućnosti praćenja i unapređenja energetske efikasnosti u proizvodnji električne i toplotne energije na nivou termoelektrane u okviru ZP RiTE Ugljevik u okviru MH

Elektroprivreda Republike Srpske Trebinje. Predložene mjere i njihov prioritet su dati u skladu sa navedenim rezultatima, što ne znači da bi se u praksi, u zavisnosti od trenutnih potreba i prioriteta ZP RiTE Ugljevik u okviru MH Elektroprivreda Republike Srpske Trebinje, izvršilo i nešto drugačije rangiranje pojedinih mjera. Prilikom predlaganja mjera

energetske efikasnosti vodilo se računa o trenutnom stanju opreme i finansijskim mogućnostima ZP RiTE Ugljevik, tako da su sva predložena poboljšanja u smislu smanjenja gubitaka i povećanja opšte energetske efikasnosti u realnim ostvarljivim granicama. Nova vrijednost sopstvene potrošnje termo elektrane koja se može postići primjenom predloženih mjera, još uvijek je iznad referentnih vrijednosti u odnosu na slične sisteme u svijetu, što znači da i dalje predstoji ozbiljan rad na analizi mogućih ušteda i smanjenju gubitaka u cjelini. Treba istaći da se očekuje da u prvom periodu implementacije sistema energetskog menadžmenta bude prepoznato više kratkoročnih mjera, koje ne zahtijevaju finansijska ulaganja i više su organizacione prirode. Nakon uvođenja standarda BAS ISO 50001 i primjene odgovarajućih standardizovanih procedura u praksi, broj kratkoročnih mjera će se smanjivati, što takođe ukazuje na organizovano praćenje sprovođenja mjera energetske efikasnosti.

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, ali 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. Znajući 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. Iz analize otkaza se da zaključiti da je u poslednjim godinama posmatranog perioda eksploatacije (2013., 2014. i 2015. god.) uzrok cijevni sistem kotla gdje prednjači KMPP I i II, što navodi na činjenicu da treba razmišljati o zamjeni istih novim. Time bi se smanjio broj neplanskih otkaza a povećali bi se proizvodni efekti, energetska efikasnost, bezbjednost i sigurnost rada kotla i 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 ugajl 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 ugajl 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 smanjenog 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 %. Najvjerojatnije 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/kW_eh, odnosno za specifičnu potrošnju dekarbonizovane vode – neto 0,0026 m³/kW_eh. Slično, vrijednosti za specifičnu potrošnju demineralizovane vode su – bruto 0,00029 m³/kW_eh i specifična potrošnja demineralizovane vode – neto 0,00027 m³/kW_eh. 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. Kako bi se uticalo na poboljšanje rada kotla i povećanje koeficijenta korisnog dejstva treba povećati kontrolu kvaliteta prijema uglja sa rudnika sa uvođem

softverskog sistema praćenja analiza i automatizacije rada dopremanja uglja do deponija termoelektrane, pravilnog miješanja po kvalitetu na deponijama i praćenja kvaliteta uglja do kotlovskih bunkera. Samim tim bi se obezbijila veće sigurnos i bezbjednost postrojenja i eksploatacionog osoblja. 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 relativno dobro 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.

U nastavku se daje pregled zaključaka vezanih za realizaciju III faze modernizacije i rekonstrukcije na TE Ugljevik I, čijom realizacijom se postiže značajan porast nivoa pokazatelja rada TE Ugljevik I. Preliminarne procjene su urađene na bazi detaljnih analiza tehničkih izvještaja ispitivanja i podešavanja, preporuka stručnih timova od strane projektanta kotlovskog agregata i tehno-ekonomskih pokazatelja eksploatacije u dosadašnjem radnom vijeku termoelektrane, [6]-[16]. Urađena preliminarna procjena energetske - ekonomske efikasnosti pokazuje da je završna - treća faza rekonstrukcije i modernizacije sklopova i sistema usmerena na povećanje efikasnosti razmjene toplotne energije u zonama prostora ložišta kotla bloka, ravnomernu raspodjelu razmjene toplote po svim stranama ekranskog ložišta kotlovskog agregata, manje zašljakivanje ogrevnih površina prostora ekranskog ložišta, niže temperature na ulazu u konvektivne dijelove kotla i mogućnost podizanja snage bloka na nominalne vrijednosti. Na osnovu dobijenih rezultata analiza preliminarne procjene povećanja energetske i ekonomske efikasnosti kotlovskog agregata i bloka termoelektrane da se zaključiti sledeće:

- Očekivani pozitivni efekti III faze rekonstrukcije i modernizacije kotlovskog agregata su: povećanje srednje snage bloka u prosjeku za 5,6 % u odnosu na tekuću a samim tim i povećanje proizvedene količine električne energije, na godišnjem nivou bi se planirao rad bloka od 7000 časova, troškovi održavanja bi se smanjili zbog obnavljanja dijela postrojenja, povećala bi se sigurnost rada kotlovskog postrojenja kao i bloka, smanjio bi se broj neplanskih otkaza (zastoja) bloka, bezbjednost osoblja na opsluživanju bloka bi se poboljšao, smanjila bi se i potrošnja mazuta sa smanjenim brojem zastoja, povećao bi se koeficijent iskorišćenja kotlovskog agregata pri uključenim ZVP za 2% minimalno;
- Povećana proizvodnja električne energije zahtijeva: povećanu potrošnju uglja u prosjeku za 2,4 % u odnosu na tekuću srednju potrošnju, povećanu potrošnju dekarbonizovane vode za 6,12 % u odnosu na tekuću srednju potrošnju, povećanu potrošnju

demineralizovane vode za 6,12 % u odnosu na tekuću srednju potrošnju;

- Očekivani ekonomski efekti treće faze rekonstrukcije i modernizacije kotlovskog agregata su: jednokratni troškovi za treću fazu rekonstrukcije i modernizacije su cca 6.393.490 EUR-a, zbirna godišnja dobit od povećanja srednje snage bloka bi se uvećala za 3.702.520 EUR-a, godišnji porast bilansne dobiti bi bio uvećan za 3.542.683 EUR-a, godišnji porast čiste dobiti bi bio uvećan za 2.657.012,25 EUR-a, investicija bi se otplatila za period od 2,3 godine.

VI. ZAKLJUČAK

Na osnovu svih postignutih rezultata i sagledavanja kompleksne problematike sa sigurnošću se konstatuje da se treba ići u realizaciju III faze rekonstrukcije i modernizacije kotlovskog agregata. Dobijeni ekonomski pokazatelji potvrđuju isplativost investicije za nepune tri godine eksploatacije i njenu opravdanost.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju rukovodstvu RiTE Ugljevik, kao i stručnom osoblju na termoelektrani, na pomoći i podršci tokom realizacije predmetne studije [1], na bazi koje je i nastao ovaj rad.

LITERATURA

- [1] Z. Milovanovic, M. Samardžić i dr., Studija o energetske efikasnosti TE Ugljevik I, Institut za građevinarstvo IG, PC Trebinje, Trebinje, 2014.
- [2] Zakon o energetske efikasnosti, Službeni glasnik Republike Srpske, broj 59/13,
- [3] Akcioni plan energetske efikasnosti Republike Srpske do 2018. Godine; Vlada Republike Srpske, Banja Luka, 2013.
- [4] Z. Milovanovic, M. Samardžić, Analiza energetske efikasnosti rada TE Ugljevik za period 2004-2014. godina, ENEF 2015, Banja Luka, 2015.
- [5] 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
- [6] Tehnički otkaz energobloka 300 MVt TЭС Uglevik, VO KOTЭС, Moskva, 2012.
- [7] Z. Milovanovic, Optimization of Power Plant Reliability, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, Banja Luka, 2003
- [8] Mjesečni izvještaji proizvodnje električne energije TE Ugljevik za 2004., 2005., 2006., 2007., 2008., 2009., 2010., 2011., 2012., 2013., 2014. i 2015. godinu
- [9] Godišnji izvještaji o kretanjima i zastojima TE Ugljevik 2004., 2005., 2006., 2007., 2008., 2009., 2010., 2011., 2012., 2013., 2014. i 2015. godinu
- [10] Grupa autora, Tehnički izvještaj podešavanja i ispitivanja kotla P-64 TE Ugljevik, Ugljevik, 1988.
- [11] Normativna ispitivanja bloka TE Ugljevik, Institut za elektroprivredu Zagreb, Zagreb, 1989.
- [12] Z. Milovanović, Optimizacija pouzdanosti termoelektrana, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2003.,
- [13] Tehnički izvještaj o rezultatima toplotnih ispitivanja kotla P-64-1 energetskog bloka 300 MW Termoelektrana "Ugljevik". Izveštaj ZAO "KOTES" inv. № 121188, Novosibirsk, 2012.
- [14] Tehnički izvještaj o rezultatima toplotnih (funkcionalnih) ispitivanja turboagregata K-300-240-1 LMZ energetskog bloka № 1

Termoelektrana "Ugljevik". Izveštaj ZAO "KOTES" inv. № 121189, Novosibirsk, 2012.

- [15] Tehnički izveštaj o rezultatima režimsko-podešavajućih radova i ispitivanja po optimizaciji režima rada osnovne i pomoćne opreme kotla P-64-1 (Pp-1000-255) energetskeg bloka 300 MW Termoelektrane "Ugljevik" posle prve etape rekonstrukcije. ZAO KOTES, Novosibirsk, 2010.
- [16] Tehnički izveštaj o provođenju ispitivanja kotla P-64 energetskeg bloka 300 MW termoelektrana «Gacko» za razrade normativnih energetskeg karakteristika opreme. ZAO KOTES, Novosibirsk, 2010.

ABSTRACT

Starting from the definition of energy efficiency as a ratio between realized result in the electricity production and consumed energy from the energy generating products, together with losses related to own consumption in the plant, it is necessary to calculate certain indicators of the efficiency based on existing methodology for evaluation of thermal energetic plants (TEP) inside the electric energy system (EES), and those indicators are: efficiency coefficients of time and the power, coefficients of energy efficiency of including facilities and of the block as a whole, way of production and quantities of produced electricity and consumed heat from the fuel, quantities of consumed heat and electricity for own needs, etc. Correct calculation of realized characteristics of the block enables evaluation of energy efficiency. Energy

efficiency of the thermal power plant block must be followed with activities and measures which in normal circumstances lead to verifiable and measurable increase of energy efficiency of the block, technical systems of the block, production processes and savings of the primary energy. Those activities are based on application of energy efficient technology, respectively on measures for achieving energy savings and other positive effects and can include adequate handling, maintenance and tuning of the thermal power plant block, increasing efficiency of existing equipment and systems without making any change in any production process of the facility, nor in the system for the energy supply.

Key words: thermal power plant, energy efficiency, study analysis, results of optimization

ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL POWER PLANTS - RESULTS OF OPTIMIZATION ON EXAMPLE OF MINE AND THERMAL POWER PLANT UGLJEVIK WITH INSTALLED POWER OF 300 MW

Zdravko Milovanović, Momir Samardžić, Darko Knežević, Aleksandar Milašinović, Svetlana Dumonjić-Milovanović

Neka razmišljanja o planiranju optimalnog korišćenja obnovljivih izvora energije sa socijalnog i aspekta održivog razvoja

Objektivno vrednovanje i socijalni aspekt

Zdravko Milovanović¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

zdravko.milovanovic@mf.unibl.org

Sažetak—Planiranje razvoja elektroenergetskog sistema obuhvata sve aktivnosti od prvih pretpostavki o mogućnosti izgradnje nekog objekta pa sve do njegovog ulaska u pogon. Pri planiranju razvoja energetike treba početi od sljedećih kriterija: sigurnost snabdijevanja potrošača uz minimalne troškove, racionalno korišćenje domaćih izvora, uz pravilno vrednovanje uvoznih oblika energije, maksimalno sprečavanje monopolističkog i jedinih oblika energije i postizanje zadovoljavajućih uslova u zaštiti životne sredine i održivog razvoja. Polazeći od korelacije između bruto nacionalnog dohotka i potrošnje energije po glavi stanovnika, sa ekonomskog aspekta blagostanje neke nacije može se poistovjetiti sa velikom potrošnjom energije po glavi stanovnika. S druge strane, sa termodinamičkog aspekta blagostanje bi se moglo karakterizovati velikom efikasnošću u energijskim transformacijama, dok bi sa socijalnog aspekta blagostanje rezultovalo u slučaju najmanje mogućeg korišćenja mehaničke energije najbogatijeg dijela društva. Nove metode za energetski objektivno vrednovanje svih vidova energije, posebno onih koji se tretiraju kao "obnovljive energije", zasnivaju se na analizi i upoređivanju svih prihoda i rashoda primarne energije – od utroška energije za izradu uređaja za konverziju energije, pa do vrednovanja svih energetske potrošnje u procesu njihove eksploatacije. Korišćenje energije do određenog praga omogućuje socijalni napredak. Iznad tog praga potrošnja energije raste na račun jednakosti (ukupnog blagostanja), jer sve manji broj ljudi može da sebi priuštiti pogodnosti korišćenja. U tom slučaju, rast bruto nacionalnog proizvoda može biti samo privid povećanog blagostanja, koje uživa samo manji broj ljudi. Ovaj rad tretira pitanja vezana za objektivnije vrednovanje obnovljivih izvora energije, kao i socijalni aspekt rasta potrošnje korisnih oblika energije.

Ključne riječi—energetsko planiranje; energetski razvoj; obnovljivi izvori energije; energetsko objektivno vrednovanje; socijalni aspekt

I. UVOD

Analizom danas aktualnih oblika konvencionalnih (termoelektrane, termoelektrane - toplane, industrijske energane, gasne elektrane, nuklearne elektrane i velike hidroelektrane) i nekonvencionalnih izvora energije (kao što su male hidroelektrane, aktivno toplotno i fotonaponsko korišćenje sunčevog zračenja, vjetar, toplota okoline, biomasa i

otpad, geotermalna energija, energija plime i talasa i sl.), može se kod svakog utvrditi da postoje određena odstupanja od opštih svojstava (u vidu određenih poboljšanja ili pogoršanja), [1]-[9]. Povezanost korišćenja pojedinih izvora energije sa štednjom i efikasnijom upotrebom ima dvostruki značaj. Sa jedne strane, racionalno korišćenje energije predstavlja direktno sredstvo za smanjenje ukupne potrošnje energije i time i uticaja na životnu sredinu, a sa druge strane, posebne izvedbe uređaja i postrojenja za korišćenje energije sve više omogućavaju učešće nekonvencionalnih, odnosno novih obnovljivih izvora energije.

Polazeći od glavnih komponenti održivog razvoja u oblasti energetike, kao što su raspoloživost, dostupnost, prihvatljiva cijena, energetska sigurnost, energetska efikasnost, ekološka prihvatljivost i mogući rizici, neophodno je dodatno stimulisati proizvodnju korisne energije proizvedene i korišćene na način da istovremeno pomaže razvoj čovječanstva kroz duži vremenski period. Energija mora biti dostupna i prihvatljiva kao usluga snabdijevanja, ali i dostupna i pouzdana kao energetska usluga. S druge strane, nema tehnologije koja nije rizična, koja nema otpada i koja ne utiče na okolinu, pa nema smisla ni govoriti izolovano o pojedinoj boljoj ili lošijoj tehnologiji za transformaciju primarne u korisne oblike energije. Bolje je porediti karakteristike jedne tehnologije ili energetske usluge sa mogućim alternativnim rješenjima ili predvidjeti objektivniji pristup u njihovom vrednovanju, s ciljem izbora najoptimalnijih rješenja po unaprijed utvrđenom kriterijumu.

Energetska efikasnost predstavlja odnos između ostvarenog rezultata u proizvodnji električne energije i utrošene primarne energije za njenu proizvodnju (iz energenata i za vlastite potrebe), [10]-[15]. Uz pojam "efikasnost", u srpskom jeziku se često koriste i pojmovi "efektivnost" ili "djelotvornost", za opisivanje radnje koja donosi željeni rezultat, bez obzira na njene karakteristike kao i uz nju vezane gubitke. Energetska efikasnost i energetska efektivnost uvijek znače isto – upotrijebiti minimum energije za istu aktivnost ili za isti željeni rezultat, uz zadržavanje postignutog komfora (udobnosti) na strani korisnika energije. Dakle, energetska efikasnost predstavlja sumu isplaniranih i provedenih mjera, čiji je cilj korišćenje minimalno moguće količine energije, kako bi nivo udobnosti i

nivo proizvodnje ostao konstantno sačuvan, odnosno energetska efikasnost ima za rezultat manje korišćenje količine energije (energenata) za obavljanje istog efekta. Pri tome, energetska efikasnost ne podrazumijeva štednju energije. Naime, štednja podrazumijeva određena odricanja, dok efikasno korišćenje energije nikada ne narušava postojeće uslove rada i življenja.

II. ODRŽIVI RAZVOJ U ENERGETICI

A. Aktivnosti evropske komisije i energetska efikasnost

Kako bi se postigao ambiciozan nivo energetske efikasnosti do 2030. godine, EU komisija je počela uspostavljati sredstva i instrumente kojima se energetska efikasnost tretira kao zaseban izvor energije. Komisija je tokom 2015. godine kao prvi korak predložila reviziju Direktive o označavanju energetske efikasnosti, čime bi se povećala efikasnost postojeće pravne legislative o označavanju energetske efikasnosti i obezbijedilo jačanje polazne baze i stvaranje pretpostavki za njenu realizaciju. Takođe, u toku 2015. godine na snagu je stupio i niz mjera za ekološki dizajn i označavanje energetske efikasnosti, primjenom kojih bi trebalo dodatno smanjiti potrošnju energije u domaćinstvima, a time i račune za isporučenu električnu i toplotnu energiju kategoriji domaćinstava u potrošnji energije.

Energetska efikasnost igra važnu ulogu u EU fondu za strateška ulaganja, iz kojeg se već sufinansiraju strateški projekti u području energetske efikasnosti u Francuskoj, Italiji i nekim drugim članicama EU. Takođe, u pripremi je i mnogo drugih projekata za koje se čeka odobrenje. Time će se nadopuniti ulaganja iz EU strukturnih i investicijskih fondova. Izvještaj o napretku u postizanju cilja povećanja energetske efikasnosti za 20 % do 2020. godine, ukazuje na to da, unatoč značajnom napretku, zajedničkim naporima država članica postignuto je samo 17,6 % uštede primarne energije u odnosu na projekcije za 2020. godinu. Ipak, EU komisija vjeruje da se cilj od 20 % može postići ako se postojeće zakonodavstvo EU-a provede pravilno i u cjelini u svakoj od zemalja članica EU, pri čemu države članice bi trebale postati ambicioznije i značajnije poboljšati uslove za ulaganja, kako bi energetska efikasnost na nivou EU mogla i dalje rasti. Jedan od ciljeva strategije energetske unije jest i dalji napredak od privrede koje je zasnovana na fosilnim gorivima.

Tokom 2015. godine postignut je napredak u tri područja koja su ključna za taj prelaz - trgovanju emisijama, obnovljivim izvorima energije i daljim ulaganjima u niskougljenične tehnologije i energetska efikasnost. Sporazumom o uvođenju rezervi za stabilnost tržišta, koji će biti na raspolaganju od 2019. godine, pojačat će se sistem EU-a za trgovanje emisijama (ETS). Sredinom 2015. godine EU komisija je predstavila prijedlog za reviziju sistema EU-a za trgovanje emisijama, što je bio zadnji korak u prilagođavanju sistema EU-a, kako bi mogao djelovati punom snagom kao glavni evropski instrument za postizanje ciljeva u pogledu emisija stakleničkih gasova u periodu do 2030. godine. Podržavajući ambiciju da EU preuzme vodeći položaj u svijetu u području obnovljivih izvora energije, EU komisija je takođe 2015. godine objavila savjetodavnu komunikaciju o novom modelu tržišta električne energije, čiji je glavni cilj priprema

tržišta na sve veći udio obnovljivih izvora energije, pri čemu obnovljivi izvori energije trebaju biti tretirani kao uobičajen izvor energije. Iz njih se već danas zadovoljavaju potrebe za energijom više od 70 miliona Evropljana, dok je EU na dobrom putu da postigne cilj od 20 % konačne potrošnje energije iz obnovljivih izvora do 2020. godine. Pri tome, za prelaz na niskougljeničnu privredu potrebna su znatnija ulaganja (posebno u elektroenergetske mreže, proizvodnju energije, energetska efikasnost i inovacije).

S druge strane, proračunom EU-a pridonosi se ostvarivanju tog pomaka uključivanjem ciljeva u području klime u sve relevantne političke inicijative i osiguravanjem da najmanje 20 % proračuna EU-a za period od 2014. do 2020. godine bude povezano s klimom. Za ovo će u tom periodu od 2014. do 2020. godine biti izdvojeno oko 180 milijardi EUR. Više od 110 milijardi EUR stavljeno je na raspolaganje u okviru evropskih strukturnih i investicijskih fondova (ESIF). Nadalje, projekti u području održivih izvora energije bili su jedni od prvih projekata odobrenih za garanciju Evropskog fonda za strateška ulaganja (EFSU), posebno u Danskoj, Finskoj, Francuskoj, Španjolskoj i Ujedinjenoj Kraljevini. Na osnovu energetske i klimatske okvira Komisije do 2030. godine, EU je kao obavezujući cilj smanjenja domaćih emisija stakleničkih gasova definisala na nivou cijele privrede za barem 40 % do 2030. godine u odnosu na nivo iz bazne 1990. godine, što je i bilo njihov polazni stav na nedavno održanoj konferenciji o klimi u Parizu, čime je još jednom potvrđena spremnost da se pregovara o ambicioznom, obavezujućem i transparentnom globalnom klimatskom dogovoru, koji bi jasno odredio put ka ograničavanju rasta prosječne globalne temperature na manje od 2 °C. Za postizanje tih ciljeva potrebne su dalje odlučne mjere na lokalnom nivou. Imajući na umu taj cilj, EU komisija je sredinom oktobra 2015. godine okupila predstavnike iz gradova u okviru EU, kako bi pokrenula novi sporazum gradonačelnika kojim bi se obuhvatili ublažavanje klimatskih promjena i inicijative za prilagođavanje, čime bi se obezbijedilo dalje djelovanje lokalnih vlasti širom svijeta, uključujući u regijama izvan EU koje dosad nisu bile uključene. Takođe, značajan broj poslovnih subjekata je uključen na ispunjenju mjera i obaveza na terenu, čime su otvorene široke poslovne prilike za inovativna poduzeća iz EU-a, uz prateće otvaranje novih radnih mjesta i rast EU u cjelini.

Kako je energetska efikasnost sastavni dio razvojnih smjernica svih sektora energetske sistema, posebnu pažnju treba posvetiti energetske efikasnosti u sektorima neposredne potrošnje, zgradarstva, industrije i saobraćaja, jer su tu najveći mogući efekti. Mjerama energetske efikasnosti smanjuje se porast potrošnje energije, što smanjuje potrebu za izgradnjom novih kapaciteta, uvozom energije i povećava sigurnost snabdijevanja. Povećanje energetske efikasnosti, uz ostvarene energetske uštede, doprinosi smanjenom korišćenju fosilnih goriva i smanjenju emisija štetnih gasova u okolinu, boljem razvoju privrede, povećanju broja radnih mjesta, te većoj konkurentnosti.

U razmatranju mogućnosti i potencijala poboljšanja energetske efikasnosti, te racionalnog upravljanja energijom u svim sektorima potrošnje u Republici Srpskoj, sprovedena je trenutna situacija u sektoru zgrada – zgrade stambene i

nestambene namjene, saobraćaja i industrije, te su na osnovu prikupljenih podataka i saznanja identifikovane moguće konkretne mjere za povećanje energetske efikasnosti u pojedinim sektorima potrošnje, uz analizu uticaja i posljedica njihove implementacije. Pri tome je dat naglasak na potrebu izgradnje institucionalnog i zakonodavnog okruženja kao jednog od osnovnih preduslova uspješne implementacije mjera energetske efikasnosti. Sva raspoloživa iskustva drugih zemalja su jednoglasna u zaključku da je bez podsticajnih mjera izuzetno teško, gotovo nemoguće, pokrenuti primjenu mjera energetske efikasnosti (EE), koje traže veće investicije.

B. Ciljevi i glavne komponente održivog razvoja u energetici

Cilj istraživanja o održivom razvoju je da se integrišu ekološke, ekonomske i društvene dimenzije u socio-ekološki sistem, uz održavanje potrebnog stanja ravnoteže (održivosti). Polazeći od glavnih komponenti održivog razvoja u oblasti energetike, kao što su: raspoloživost, dostupnost, prihvatljiva cijena, energetska sigurnost, energetska efikasnost, ekološka prihvatljivost i mogući rizici, neophodno je dodatno stimulisati proizvodnju energije proizvedene i korišćene na način da istovremeno pomaže razvoj društva kroz duži vremenski period. Ona mora biti dostupna i prihvatljiva kao usluga snabdijevanja, ali i dostupna i pouzdana kao energetska usluga. Nove tehnologije za proizvodnju energije prati i problem određivanja načina transporta dobijene energije, njenog skladištenja i same njene distribucije do krajnjeg korisnika (smanjenje distributivnih gubitaka). Korišćenje supervodljivih prenosnika za transport energije u budućnosti na temperaturi bliskoj temperaturi okoline zasnovano je na pronalasku materijala, koji ili nemaju otpor ispod neke određene temperature (nema gubitaka u prenosu) ili je ta vrijednost takva da se može zanemariti. Isto je i sa skladištenjem energije u superprovodljivim magnetima. Drugi mogući način prenosa energije na velike udaljenosti predstavlja korišćenje energije za proizvodnju vodonika (elektroliza), koji se dalje može lako transportovati, skladištiti ili direktno koristiti u sistemima za proizvodnju električne energije.

III. O ENERGETSKOJ SIGURNOSTI, DIVERSIFIKACIJI ENERGENATA I KVALITETU ENERGIJE

A. O energetske sigurnosti

Iako se o energetske sigurnosti dosta govori i piše, još uvijek ne postoji jedinstvena i opšte prihvaćena definicija sigurnosti snabdijevanja energijom. Praćenjem kroz istoriju može se zaključiti da je energetska sigurnost dobijala različite definicije, pri čemu je u kontinuitetu dolazilo do njegovog proširivanja, koje je podrazumijevalo i dodatno uvođenje sve više elemenata i kriterijuma za ispunjenje, kako bi se dostigao zadovoljavajući nivo energetske sigurnosti. Međunarodna energetska agencija (eng. International Energy Agency) daje definiciju za energetske sigurnost kao *“adekvatnuo, cijenovno prihvatljivo i pouzdano snabdijevanje energijom”* (International Energy Agency, 2010), odnosno determiniše pouzdanost i neprekidnost snabdijevanja, njenu cijenu i prihvatljivost te cijene za priovrednu, te adekvatan oblik i količinu potrebne energije. Nešto širi koncept energetske

sigurnosti razvijen je i korišćen od strane Azijskog energetskog istraživačkog centra (Asia Pacific Energy Research Centre, 2007), a obuhvata *dostupnost* (eng. availability) koja označava geološki aspekt, pristupačnost ili dohvatljivost (eng. accessibility), koja podrazumijeva geopolitičke odnose, cjenovnu i ekonomsku prihvatljivost (eng. affordability), te prihvatljivost po životnu sredinu i društvenu prihvatljivost (eng. acceptability). Sigurnost i stabilnost snabdijevanja energentima predstavlja objektivni zahtjev za kontinuirano funkcionisanje privrede u cjelini na globalnom i regionalnim nivoima, pri čemu kontrola nad energetskim izvorima (odnosno izgradnja strateških partnerstava) postaje u sve većoj mjeri strateški faktor pri planiranju i usvajanju energetskih strategija razvoja. Tokom devedestih godina prošlog vijeka, kada je većina nacionalnih tržišta električne energije i prirodnog gasa još uvijek bila monopolizovana, EU započinje proces njihovog postepenog otvaranja tržišnom natjecanju (tzv. liberalizacija tržišta). Prve direktive o liberalizaciji (prvi energetske paket) donesene su 1996. (električna energija) i 1998. (gas) godine, a u pravne sisteme država članica trebale su biti prenešene do 1998. (električna energija) i 2000. (gas) godine. Drugi energetske paket usvojen je 2003. godine, a direktive iz tog paketa trebale su u nacionalno pravo država članica biti prenešene do 2004., dok su pojedine odredbe stupile na snagu tek 2007. godine. Osnovna karakteristika donešenih pravila je ostavarenje slobodnog izbora dobavljača gasa i električne energije među većim brojem konkurenata od strane industrijskih i privatnih potrošača. Aprila 2009. godine usvojen je treći energetske paket, čiji je cilj bila daljnja liberalizacija unutrašnjeg tržišta električne energije i gasa, a koja u principu predstavlja izmjenu drugog paketa i bazu za sprovođenje unutrašnjeg energetskog tržišta. U februaru 2015. godine EU komisija je objavila komunikaciju o *Paketu mjera za energetske uniju* naslovljenu kao *„Okvirna strategija za otpornu energetske uniju sa naprednom klimatskom politikom”*, gdje se eksplicitno navodi da je cilj energetske unije *„pružiti potrošačima u EU-u (domaćinstvima i preduzećima) sigurnu, održivu, konkurentnu i povoljnu energiju”*. Radi ostvarenja tih ciljeva u paketu je opisano pet usko povezanih i uzajamno osnažujućih dimenzija: energetske sigurnost, solidarnost i povjerenje, potpuno integrisano evropsko energetske tržište, energetske efikasnost (koja pridonosi smanjenju potražnje), „dekarbonizacija privrede“ (koja bi do 2050. godine trebala, prema planu i direktivama Evropske unije, dovesti do smanjenja emisije stakleničkih gasova u BiH za 80% u odnosu na emisije iz 1990. godine), te istraživanje, inovacije i konkurentnost.

Kao rezultat ovog procesa je niz zakonodavnih prijedloga o novom modelu energetskog tržišta EU-a, predstavljenih od strane EU komisije krajem 2016. godine. Cilj paketa *„Čista energija za sve Evropljane”* predstavlja sprovođenje politike i zacrtanih ciljeva EU, a obuhvata energetske efikasnost, obnovljivu energiju, model tržišta električne energije, sigurnost snabdijevanja električnom energijom i pravila upravljanja za energetske uniju. Kako bi unutrašnje tržište EU-a u potpunosti zaživjelo u sektoru energetike, potrebno je bilo ukloniti brojne prepreke i trgovinske prepreke, uskladiti porezne i cjenovne politike i mjere u pogledu poštovanja normi i standarda, te osnaženje ekoloških i sigurnosnih

propisa. Cilj je stvaranje tržište koje dobro funkcioniše, koje garantuje svima pošten pristup tržištu i visok nivo zaštite potrošača, uz prateći zadovoljavajući nivo povezanosti i kapaciteta za proizvodnju energije. Iako je EU vijeće postavilo krajnji rok za potpunu uspostavu unutrašnjeg energetskog tržišta do 2014. godine, taj cilj nije u potpunosti ispunjen, pri čemu je učinjen određeni napredak i u pogledu diversifikacije dobavljača energije i u pogledu prekogranične trgovine energijom.

B. O diversifikaciji energenata i izvora i kvalitetu električne energije

Diversifikacija (lat. diversification - mijenjanje, različitost, promjena, unošenje promjena) energenata i izvora uključuje izbor i snabdijevanje (dobavu) energenata, uz prateće osiguranje sigurnosti u snabdijevanju potrošača, te osiguranja adekvatnog prostornog rasporeda izvora s ciljem osiguranja stabilnosti snabdijevanja svakog područja. Pri tome, korišćenje energije znači sticanje, pretvaranje, prenos, distribuciju i korišćenje svih oblika energije. Analiza parametara kvalitete električne energije po važećem standardu BAS EN 50160 (BiH) predstavlja osnovu za optimizaciju potrošnje električne energije, koja omogućava povećanje pouzdanosti snabdijevanja, održavanje kvaliteta proizvodnje, te pomaže održavanje stabilnog elektro energetskog sistema. Pod pojmom kvalitet električne energije, podrazumijeva se kvalitet frekvencije ili učestanosti (vezan za njeno održavanje na propisanoj vrijednosti, kao mjere performansi elektroenergetskog sistema u odnosu na potrošače), kvalitet

napona (mjera odstupanje veličine napona i oblika naponskog talasa od idealnih referenci, i slično kvaliteti frekvencije predstavlja mjeru performansi elektroenergetskog sistema u odnosu na potrošače), kvalitet električne energije ili struje (komplementaran pojmu kvaliteta napona i odnosi se na odstupanje talasa struje od idealne reference, koja je, kao i naponska referenca sinusoidna, konstantne amplitude i frekvencije i u fazi sa talasom napona), kvalitet struje (karakterise performanse potrošača u odnosu na sistem), kvalitet snage ili energije (kombinacija kvaliteta napona i struje i karakterise interakciju između sistema i potrošača, pri čemu treba razlikovati tehničke pojmove "sistem", ili "proizvođač" – "potrošač", od komercijalnih "isporučilac", odnosno "prodavac" – "kupac"), kvalitet isporučioca (obuhvata sve tehničke i komercijalne aspekte kvaliteta frekvencije i napona, koji su od uticaja na kupca), kao i kvalitet potrošača (obuhvata sve tehničke i komercijalne aspekte kvaliteta napona, struje i energije, od uticaja na isporučioca), Tabela 1.

Pokazatelji kvaliteta isporuke električne energije potrošačima, koji su predmet normiranja i standardizacije, obično su vezani za dvije najvažnije promjenljive, koje karakterišu rad svakog elektroenergetskog sistema, a to su *frekvencija (učestanost)* i *napon*. Iako ove veličine nemaju direktnu komercijalnu vrijednost, njihov posredni uticaj na kvalitet isporučene električne energije potrošačima je očigledan, jer se svi poremećaji ili abnormalnosti u sistemu, preko ova dva parametra preslikavaju kao efekti, čiji je materijalni uticaj na krajnje potrošače očigledan, [17].

TABELA I. PARAMETRI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE PREMA EVROPSKOM STANDARDU EN 50160

Karakteristike naponskih pojava	Prihvatljive granice	Interval mjerenja	Period praćenja	Procenat prihvatanja
Mrežna frekvencija	49.5 ÷ 50.5 Hz/47 ÷ 52 Hz	10 s	1 nedelja	95%/ 100%
Spore promjene napona	230V ± 10%	10 min	1 nedelja	95%
Propadi napona (≤ 1min)	10 do 1000 puta na godinu dana (ispod 85% od nominalne vrijednosti)	10 ms	1 godina	100%
Kratki prekidi (≤ 3min)	10 do 100 puta na godinu dana (ispod 1% nominalne vrijednosti)	10 ms	1 godina	100%
Slučajni, dugi prekidi (> 3min)	10 do 50 puta na godinu dana (ispod 1% nominalne vrijednosti)	10 ms	1 godina	100%
Privremeni naponski skok	Uglavnom < 1.5 kV	10 ms	N/A	100%
Tranzijentni previsoki napon	Uglavnom < 6kV	N/A	N/A	100%
Nesimetričnost napona	Uglavnom 2% ali povremeno 3%	10 min	1 nedelja	95%
Harmonijski napon	8% ukupna harmonijska distorzija (UHD)	10 min	1 nedelja	95%

Sa napretkom ekonomije, pored kontinuiteta snabdijevanja, napona i frekvencije kao i dalje važnih parametara, sve se više potencira i grupa dodatnih karakteristika električne energije isporučene potrošaču. Pri tome, tehnički parametri električne energije, tj. napona, koji se u mreži posmatraju su: mrežna frekvencija, veličina i promjene napona (oscilovanje ili treperenje napona (eng. *flicker*), propadi, kratkotrajni i dugotrajni prekidi napona), privremeni mrežni prenaponi između faznih vodiča iz zemlje, impulsni prenaponi između faznih vodiča iz zemlje, nesimetrija napona, naponi viših harmonika, naponi međuharmonika, kao i signalni naponi. Suština kvaliteta električne energije je napon na 0,4 kV. Kvalitet je idealan ako je napon 230 V, frekvencija 50 Hz, i ima sinusni talasni oblik. Kvalitet je zadovoljavajući ako je napon u mreži u granicama

opsega datih u Tabeli 1, odnosno u okviru EU norme EN 50160. Izvan ovih opsega, kvalitet napona je nezadovoljavajući, [17]. Kod kvaliteta električne energije na 0,4 kV, prati se vrijednost napona, frekvencija, amplituda, i talasni oblik.

Evropski standard EN 50160 daje najvažnije karakteristike napona na potrošačkim priključcima u javnoj nisko i sredjenaponskoj mreži, pod normalnim radnim uslovima. Svrha ovog standarda je davanje opisa i utvrđivanje obilježja distributivnog napona, pri čemu se definišu najveća odstupanja pojedinih parametara bez dodatnih opisivanja prosječne vrijednosti posmatranih parametara, koja se mogu očekivati u distributivnoj elektroenergetskoj mreži za dati period mjerenja određen preporukom EN 50160 (sedam dana, bez prestanka).

IV. PLANIRANJE I OBJEKTIVNO VREDNOVANJE U ENERGETICI

A. Planiranje u energetici

Svaki privredni razvoj države zahtijeva potrošnju odgovarajućih energetskih resursa. Bilo kakvo odstupanje od vremenskog terminiranja za rezultat može imati pojavu ograničenja u razvoju ostalih privrednih djelatnosti. Primjera radi, nedostatak električne energije vodi ka velikim poremećajima u industrijskoj proizvodnji, što za sobom povlači znatne gubitke u konačnom ekonomskom bilansu date države. Zbog tih razloga potrebno je pratiti razvoj potrošnje energije, koja je vezana za određene uticajne faktore (porast stanovništva, razvoj nauke i tehnologije, privredni razvoj, standard, itd.), čiji intenzitet djelovanja se mijenja u vremenu. Izbor optimalne strukture za pokrivanje potrošnje predstavlja, dakle, vrlo važan i složen problem za razvoj energetike, čije rješenje ne zavisi samo od energetskih izvora zemlje, nego i od zavisnosti između primarnih i transformisanih oblika energije, zatim od oblika energije koji se ne mogu zamijeniti drugim vrstama energije, kao i od mogućnosti i potreba uvoza pojedinih oblika energije, lokacije potrošača, karakteristika potrošnje, itd.

Zato je i razumljivo da se danas stalno proučava stanje i razvoj u oblasti energetike, pri čemu planiranje razvoja u oblasti energetike postaje bitno, kako zbog zavisnosti razvoja društva o sigurnim, dovoljnim i odgovarajućim količinama potrebnih oblika energije, tako i zbog angažovanja velikih finansijskih sredstava u ovoj oblasti, [3], [4] i [12]. Pri planiranju razvoja energetike treba poći od sljedećih kriterija: sigurnost snabdijevanja potrošača uz minimalne troškove, racionalno korišćenje domaćih izvora, uz pravilno vrednovanje uvoznih oblika energije, maksimalno sprečavanje monopolističkog i jedinih oblika energije i postizanje zadovoljavajućih uslova u zaštiti životne sredine i održivog razvoja. Planiranje razvoja elektroenergetskog sistema obuhvata sve aktivnosti, počev od prvih pretpostavki o mogućnosti izgradnje nekog objekta pa sve do njegovog ulaska u probni pogon. No, u terminologiji se pod pojmom planiranje prvenstveno misli na planiranje postrojenja za proizvodnju električne energije (hidro, nuklearna i termo elektrana). Kod planiranja razvoja elektroenergetskog sistema cilj i kriteriji su jednoznačno određeni - podmirenje predviđene potrošnje električne energije uz minimum troškova i uz pretpostavku da su zadovoljena određena ograničenja, kao npr. finansijska, tehnička, ekološka, ograničenja raspoloživosti primarnih oblika energije, itd. Zadovoljenje ograničenja se nameće kao primarni zadatak, nezavisno od metode planiranja, što je i razlog da je određeno ograničenje često odlučujući faktor u odlučivanju o konačnoj strategiji razvoja. Iako dugoročni planovi nose veliku dozu nesigurnosti, takvo planiranje je nužno i to prvenstveno iz dva razloga:

- prvi je osnovni i produženi životni vijek proizvodnih postrojenja (25 do 30 osnovni plus 15 do 20 godina produženi radni vijek nakon revitalizacije, rekonstrukcije i modernizacije postrojenja),
- drugi je vrijeme potrebno za pripremu izgradnje i samu izgradnju (3 do 6 godina, ne računajući mogućnost kašnjenja projekta).

Iz toga proizlazi da analizu razvojnih planova elektroenergetskog sistema treba provesti za razdoblje od 15

do 50 godina unaprijed. Pri planiranju izgradnje proizvodnih postrojenja treba odrediti potrebnu izgradnju za zadovoljenje buduće potrošnje (obim i kapacitet), vrijeme ulaska pojedinog proizvodnog postrojenja u pogon, kao i mogućnosti unapređenja tehnologija za proizvodnju električne energije (poboljšane i čistije tehnologije, kogenerativni i trigenerativni sistemi, hibridni sistemi i sl.). Sama izrada razvojnih studija se može podijeliti na nekoliko dijelova, koja obuhvataju simulaciju zakonitosti rada u sistemu (pogon sistema), kao i ekonomsko i finansijsko vrednovanje (uz analizu osjetljivosti) proizvodnih postrojenja odnosno cijelih razvojnih planova. Prvi dio traži izradu modela sistema (potreba da se sistem opiše matematičkim jednačinama), dok drugi dio podrazumijeva njegovu aproksimaciju, uz prateća neizbježna zanemarivanja i pojednostavljenja. U trećem dijelu treba ocijeniti energetski doprinos svakog postrojenja i ekonomskim metodama izvršiti njegovo valorizovanje.

Metode koje se koriste u planiranju razvoja elektroenergetskog sistema razlikuju se s obzirom na: optimizacijsku tehniku (linearno programiranje, nelinearno programiranje, itd.), vrstu aproksimacija (linearne, nelinearne) i ekonomsku valorizaciju (s inflacijom, bez inflacije). Niti jedna metoda se dosada nije pokazala apsolutno prihvatljivom za sve probleme, pa se zato i razvija veliki broj metoda koje su namijenjene parcijalnim problemima, tj. ili služe za optimizaciju samo proizvodnih postrojenja, ili optimizaciju samo prenosne mreže, ili pak optimizaciju cjelokupne energetike, ali sa vrlo pojednostavljenim odnosima u energetskom sistemu. Osnovna pretpostavka primjene optimizacionih modela jeste velika pouzdanost parametara na kojima se zasniva proračun. Naime, ako parametri nisu dovoljno pouzdani, postavlja se pitanje o potrebi sprovođenja postupka optimizacije. Ponekad ni analize osjetljivosti, koje se obično koriste u završnoj fazi svakog optimizacionog modela, ne mogu otkloniti efekt nepouzdanosti ulaznih podataka. Nadalje, unutar modela nikad nije moguće obuhvatiti sva ograničenja, pa se dobija samo približno objektivna slika stanja u sistemu. Ipak, u današnje je vrijeme nemoguće oslanjati se samo na intuiciju planera pri odabiru najpovoljnije razvojne opcije, pa je primjena optimizacionih modela neizbježna (više-kriterijumske metode vrednovanja).

B. Objektivno vrednovanje izvora energije

Nova metoda za energetski objektivno vrednovanje svih vidova energije data u okviru [16], posebno onih koji se tretiraju kao "obnovljive energije", zasniva se na analizi i upoređivanju svih prihoda i rashoda primarne energije – od utroška energije za izradu uređaja za konverziju energije, pa do svih energetskih potrošnji u procesu njihove eksploatacije. Za vrednovanje služe sljedeći objektivni pokazatelji: vremena vraćanja uložene energije za izgradnju i održavanje energetskih izvora, indeks strateškog prioriteta izvora energije ili investicionih mjera energetske racionalizacije (na bazi kojih se može konstatovati da brojne tzv. obnovljive energije u suštini nisu obnovljive, jer se za izradu takvih postrojenja utroši više primarne energije nego što se može da dobije tokom njihove eksploatacije), [15] i [16].

Pokazalo se da su jedini stvarno obnovljiv izvor energije na bazi ove metodologije hidroelektrane (posebno velike i

srednje). Drugi važan zaključak dat u okviru [16] je da se već sada praktično cjelokupni tehnički iskoristljiv potencijal vodnih snaga našao u kategoriji ekonomski iskoristljivog potencijala. Imajući u vidu ulogu hidroelektrana u pokrivanju vršne snage i energije u EES, postoji potreba povećavanja njihove instalirane snage, što nameće potrebu projektovanja fazne izgradnje HE, posebno u slučaju akumulacionih hidroelektrana. Na kraju, ništa manje bitan je i zaključak da je neophodno da se za sve potencijalne hidroelektrane što pre uradi planska dokumentacija na nivou studija sistema i generalnih projekata, sa prethodnim studijama opravdanosti i prostornim planovima prostora posebnih namjena, čime će HE kao cjelovito planski tretirani objekti, sa odgovarajućim odlukama o građenju, biće prihvaćeni od strane EU u procesu pridruživanja određene zemlje toj evropskoj integraciji, [16]. Korišćenje drugih razmatranih obnovljivih izvora otežano je zbog njihove velike rasutosti i stohastičnog karaktera, pa se preporučuje njihova primjena u okviru tzv. male energetike, prije svega za zadovoljenje toplinskih potreba nižih temperatura (grijanje, priprema potrošne tople vode, klimatizacija, itd.). Njihovo neposredno korišćenje, uz što manji broj konverzija, korisno je kao oblik substitucije energije preuzete iz velikih sistema, te kao takvo treba da bude podržavano mjerama državne politike, [16].

Postepeno povećavanje korišćenja obnovljivih energija u skladu sa ranije datim preporukama iz Strategije EU (20-20-20), ima najveći značaj upravo u domenu zamjene ili supstitucije energije koja se preuzima iz velikih elektroenergetskih sistema (EES). Kako su ograničenije mogućnosti korišćenja rasutih obnovljivih izvora u tzv. velikoj energetici, za visokotemperaturne potrebe (proizvodnja električne energije, procesna toplota), neophodna je njihova studiozna ekonomsko-finansijska analiza sa aspekta energetske dohodovnosti (parametara statičke i dinamičke ekonomsko-finansijske analize, poređenjem ukupnih energetske rashoda neophodnih za izgradnju postrojenja, njihov pogon i održavanje, uključivo i izgubljene energiju na zaposjednutom prostoru i energetske prihoda, tj. energije koja se dobija tokom korišćenja postrojenja), [16]. Po određivanju vremena vraćanja primarne energije utrošene za građenje i održavanje izvora energije, kvantifikuje se *indeks strateškog prioriteta izvora energije*, na bazi kojeg je moguće egzaktno utvrditi da li se zaista radi o obnovljivim energijama, ili se radi o previdu, zbog toga što nisu uzete u obzir ukupna energija utrošena za izradu i održavanje postrojenja. Zbog toga je vrlo bitan zaključak dat u [16], po kome je očigledno da neki od navodno obnovljivih izvora energije u suštini to nisu (više primarne energije utroši se za njihovu izradu i održavanje nego što ti uređaji proizvedu energije u čitavim svom periodu eksploatacije).

Polazeći od energetske logike, po kojoj energetske prihodi trebaju biti dovoljno veći od ukupnih energetske rashoda, neophodno je prilagoditi i zakonske okvire vezane za podsticaje i stimulaciju korišćenja obnovljivih izvora energije i efikasne kogeneracije. Djelovanje fiskalnom politikom na bazi formiranja fonda kojeg finansiraju krajnji potrošači, uz prateće organizacione mjere, ima smisla samo ukoliko

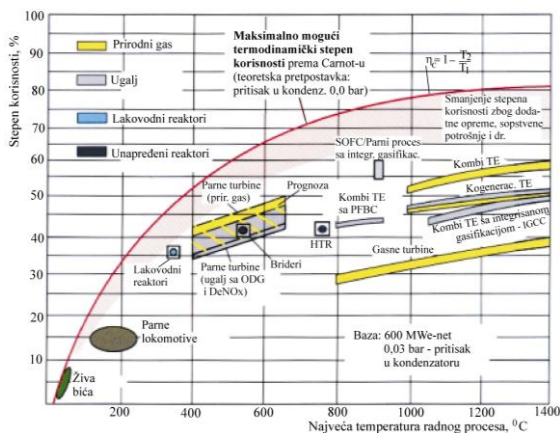
objektivna analiza prihoda i rashoda energije u diskontovanom toku novca za osnovni i produženi radni vijek postrojenja i opreme pokaže da se zaista radi o mjerama koje imaju ekonomsku zasnovanost. Alternativno, neargumentovano forsiranje bilo kojih obnovljivih izvora, čija postrojenja i oprema zbog velike rasutosti energije nisu dovoljno energetske dohodovna u čitavom njihovom radnom vijeku, predstavljalo bi veliku grešku. Takođe, postavlja se pitanje etičnosti podsticanja proizvodnje tečnih goriva od biomasa, u suštini od hrane, u trenutku kada jedan veći dio čovječanstva vodi bitku za obezbjeđenje hrane i svoj životni opstanak na ovoj planeti. Energetske analize date u [16], nedvosmisleno pokazuju da takva mjera nema ni energetske, ni ekonomsku i ekološku logiku (proizvede se oko dva puta manje energije od primarne energije koja se utroši u procesu proizvodnje), pri čemu proizvodnja goriva iz hrane je i ekološki veoma opasna mjera, jer dovodi do krčenja tropskih šuma i do uništavanja dragocjenih biodiverziteta. Kako najveći efekat imaju mjere energetske efikasnosti, posebno u dijelu planske racionalizacije potrošnje i štednje energije (striktno poštovanje propisa za toplotnu izolaciju zgrada i energetske certificiranje, promet proizvoda isključivo sa adekvatnim atestima sa aspekta energetske racionalnosti, reciklaže i zbrinjavanja otpada, sistemi grijanja sa toplotnim pumpama, koje će svoj pravi značaj iskazati u uslovima adekvatnog vrednovanja energije), neophodno je mjere fiskalne politike usmjeriti ka projektima iz ove oblasti. 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_b , η_{TP}). Maksimalna vrijednost stepena korisnosti energetske postrojenja ograničena je stepenom korisnosti Carnot-ovog ciklusa, $\eta_c = 1 - T_2/T_1$, što je prikazano na slici 1, [7]. Kod parnih postrojenja uzima se u obzir Renkinov ciklus, $\eta_{RC} = \eta_c \cdot \eta_{ex}$.

Stepen 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:

$$q_{TE} = \frac{1}{\eta_{TE}} = \frac{3600 \text{ kJ} / \text{kWh}}{\eta_{TE}} \cdot 100, \text{ kJ/kWh.} \quad (1)$$

Specifična potrošnja energije izražava se i kao specifična potrošnja goriva (kg, g) za proizvodnju 1 kWh električne energije, npr., g/kWh ili kg/kWh. Stepenu korisnosti se izražava kod donje toplotne vrijednosti goriva H'_d (DTV, LHV). U Americi (SAD) se za parne procese stepen korisnosti izražava kod gornje toplotne vrijednosti goriva H'_g (GTV, HHV), a za cikluse gasnih turbina kod DTV. Razlikuje se ukupni (bruto), neto i godišnji (pogonski) stepen korisnosti. Ukupni stepen 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).



Sl. 1. Stepen korisnosti elektrana za različite energetske tehnologije, [7]

Godišnji ili pogonski stepen korisnosti se izračunava dijeljenjem godišnje proizvodnje električne energije (bruto ili neto) sa godišnjom potrošnjom energije goriva. Neto stepen korisnosti elektrane na uglj 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 stepen korisnosti kod $\eta_C = 65\%$ (slika 2) i sadržaj eksergije u pari kod približno 94%;
- $\eta_t = 93\%$ - stepen korisnosti savremenih parnih turbina;
- $\eta_g = 98\%$ - stepen korisnosti savremenih električnih generatora;
- $\eta_k = 91\%$ - stepen korisnosti savremenih kotlova;
- $\eta_{s.p.} = 93\%$ - stepen korisnosti pomoćne opreme TE (sopstvena potrošnja oko 7%).

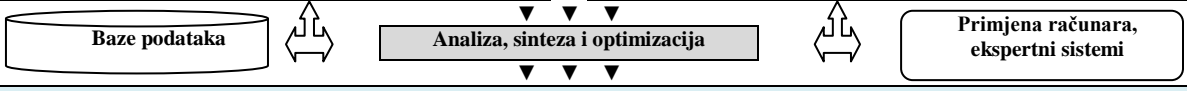
Neto stepen korisnosti savremene elektrane na uglj sa unapređenom klasičnom tehnologijom iznosio bi $\eta_{TE}^n = 47\%$. Efikasna realizacija niza mjera kojima se poboljšava energetska efikasnost snažno će uticati na ekonomiju energije i smanjenje emisije CO₂ uz najniže troškove. Prema procjenama Međunarodne agencije za energiju (IEA), realizacija predloženih niza mjera na globalnom nivou, moguće bi bilo do 2030. godine smanjiti emisiju CO₂ za približno 8,2 milijardi t CO₂/godisnje, što je ekvivalentno 1/5 emisije CO₂ povezanom sa potrebama energije u globalnom scenariju za 2030. godinu. Potpuno je jasno da nekonvencionalni izvori energije u doglednoj budućnosti mogu u potpunosti zamijeniti konvencionalne izvore energije. S druge strane, egzistira veliki lobi proizvođača opreme za obnovljive oblike energije. Kako su fosilna (konvencionalna) goriva omogućila značajan rast svjetske privrede u periodu koji je iza nas, važno je istaći da ovakav rast bi bio nemoguć sa obnovljivim izvorima energije (stalan rast je nemoguć ako je baziran na ograničenim resursima). Na slici 2 dat je prikaz mogućih alternativa razvoja zasnovanih na prednostima i nedostacima obnovljivih (nekonvencionalnih) izvora energije (OIE).

V. NEKA RAZMIŠLJANJA O OPTIMALNOM KORIŠĆENJU ENERGIJE I ODRŽIVOM RAZVOJU U BUDUĆNOSTI

Potrošnja energije predstavlja ključan faktor koji izaziva društveno raslojavanje na one koji je mogu i ne mogu u potpunosti priuštiti. Kako će energija u budućnosti postajati sve skuplja, a uticaj energetske aktivnosti na životnu sredinu sve izraženiji, racionalno korišćenje energije dovest će do manje potrošnje energije po jedinici nacionalnog proizvoda. Kako, bez obzira na promjene u strukturi svjetskog i nacionalnih privreda i na mjere štednje, odnosno racionalnog korišćenja energije, potrošnja energije u svijetu u posljednjih tridesetak godina neprestano raste po stopi od približno 1-3 % godišnje, s tim da je porast potrošnje energije izraženiji u onim zemljama koje bilježe i privredni rast, [20]. Prema određenim autorima [21]-[25], korišćenje energije do određenog praga omogućuje socijalni napredak, dok iznad tog praga potrošnja energije raste nauštrb jednakosti, tj. ukupnog blagostanja, jer sve manji broj ljudi može si priuštiti blagodati korišćenja. U tom slučaju, rast bruto nacionalnog proizvoda može biti samo privid povećanog blagostanja (to blagostanje uživa samo manji broj ljudi). Polazeći od korelacije između bruto nacionalnog dohotka i potrošnje energije po glavi stanovnika, s ekonomskog aspekta blagostanje neke nacije može se poistovjetiti s velikom potrošnjom energije po glavi stanovnika. S druge strane, sa termodinamičkog aspekta blagostanje bi se moglo karakterizovati velikom efikasnošću u energijskim transformacijama, dok bi sa socijalnog aspekta blagostanje rezultovalo u slučaju najmanje mogućeg korišćenja mehaničke energije najimućnijeg dijela društva.

Dosta autora smatra da velike količine energije uništavaju socijalnu strukturu (I. Illich, 1974.; D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers and W.W. Behrens, 2004.; F. Barbir, 2013.; H. T. Odum, 2001.). Tako su I. Illich i H.T. Odum, posmatrajuci isti problem (razvoj civilizacije) kroz iste pokazatelje (potrošnja energije) a u različito vrijeme (vremenska razlika od 30 do 40 godina), uz korišćenje različitih metoda (Odum koristio systemske modele i za to razvio posebne metode računanja energije, Illich je do zaključaka došao filozofskim razmišljanjem), došli praktično do istih zaključaka. Illich smatra da bi s malom potrošnjom energije ljudska civilizacija imala širok izbor različitih životnih stilova i kultura, no u društvu baziranom na velikoj potrošnji energije tehnokracija je ta koja diktira socijalne odnose, i takvo društvo propada bez obzira zvalo se kapitalizmom ili socijalizmom. Ako se preko 70 % svjetskih potreba za energijom trenutno zadovoljava na bazi fosilnih goriva (sagorijevanje uglja, nafte i prirodnog gasa), kao i da nastali štetni produkti sagorijevanja stvaraju velike probleme na moguće posljedice globalnih klimatskih promjena na svjetskom nivou (akumulacije stakleničkih gasova u atmosferi, u najvećoj mjeri kao posljedica sagorijevanja fosilnih goriva), jasno je da sa ekološkog satnovišta mora postojati granica uništavanja prirodnih resursa (potraživanja i ispitivanja za energentima, njihovo vađenje ili ekstrakcija iz zemlje ili njihovo korišćenje sagorijevanjem).

Prednosti OIE	Problemi sa OIE
<ul style="list-style-type: none"> • Raspoloživi su u dovoljnim količinama; • Biće raspoloživi i u budućnosti; • Besplatni su sa aspekta troškova dobijanja energenta; • Ne stvaraju relativno veća zagađenje vazduha, vode, zemljišta; • Mogu se koristiti uređaji svih veličina; • Moguća je centralna i decentralizovana proizvodnja energije; • Moguće je lakše pratiti rast potreba; • Omogućuju održivi razvoj i bolju zaštitu životne sredine 	<ul style="list-style-type: none"> • U principu su slabog intenziteta, pa su potrebne velike površine za njihovo iskorišćavanje i pretvaranje u korisne oblike energije; • Oprema za njihovo korišćenje je relativno skupa (sa trendom smanjenja cijena); • Imaju mali EROI - Energy Return On Investment (period povrata investicije); • Raspoloživi su povremeno i sa promjenjivim intenzitetom (stohastične prirode); • Najviše ih ima daleko od naseljenih područja (problemi prenosa i distribucije); • Ne mogu se koristiti u transportu za pogon automobila, autobusa ili aviona; • Egzistiraju problemi vezani za rad u okviru elektroenergetskog sistema - EES

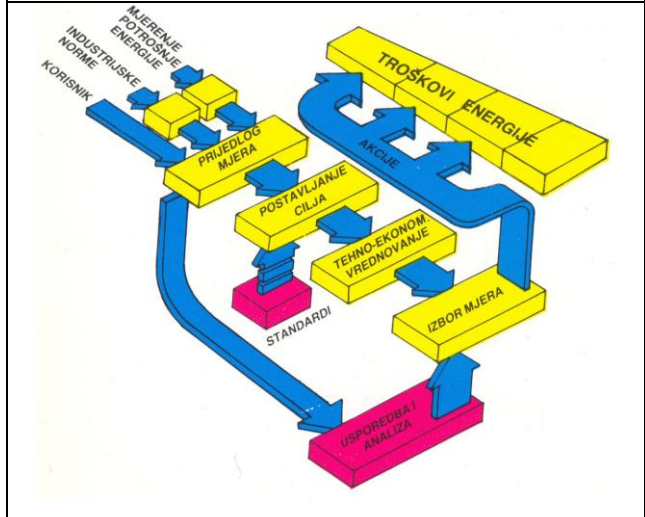


Neka razmišljanja, sugestije i pitanja u vezi održivog razvoja i obnovljivih izvora energije, [34]
<ul style="list-style-type: none"> • Fosilna goriva su omogućila fantastičan rast svjetske privrede, pri čemu ovakav rast ne bi bio moguć sa obnovljivim izvorima energije (stalan rast je nemoguć ako je baziran na ograničenim resursima); • Koje su alternative rastu: Stalan nivo (steady state), Pad/kolaps ili oscilovanje (pulsiranje) u vremenu koje dolazi? • Može li se ekonomija održavati na nekom visokom nivou sa obnovljivim izvorima? Energija vjetrova, sunca, unutrašnjosti zemlje, biomase, gorivnih ćelija i druge "održive varijante" troše značajna razvojna sredstva, ali još uvijek ne mogu u potpunosti da zamijene naftu, uglj i prirodni gas. Dosta autora postavlja alternativno pitanje: <i>Da li je pad neizbježan ili se možemo nadati ostvarenju tzv. "prosperitetnog pada"?</i> • Kakva je uloga OIE u narednom periodu i da li će njihovo uvođenje pomoći ili još više ubrzati pad? • Ako će se potrebe za električnom energijom u periodu do 2025. godine udvostručiti (23,072 biliona kWh), a očekivani porast u proizvodnji električne energije iz NE i HE neće (ili pak hoće?) igrati značajniju ulogu u energetskom bilansu, zbog čega su fosilna goriva još uvijek jedini izvjestan „energent budućnosti“ i koliko dugo još da očekujemo ovakvo stanje?

Da li su ovo adekvatne mjere, aktivnosti i unapređenja?

A. 3A koncept	B. Racionalizacija korišćenja i štednja energije (PPUD mjere)
<p><i>Accessibility ili dostupnost</i>, dostupnost minimalne komercijalne energetske usluge (u obliku električne energije, za potrebe stacionarnog korišćenja i transporta) po prihvatljivim (za siromašne) i održivim uslovima (koje omogućuju održavanje i razvoj cjelokupnog sistema);</p> <p><i>Availability ili raspoloživost</i>, raspoloživost dugotrajnog, kontinuiranog snabdijevanja kao i kratkoročne usluge, pri čemu nedostatak energije može uništiti razvoj, pa je potrebna diverzifikacija energetskih izvora, što postaje ključno razmatranje svih energetskih varijanti;</p> <p><i>Acceptability ili prihvatljivost</i>, koja se odnosi na javnost i životnu sredinu (okolinu).</p> <p style="text-align: right;"><i>World Energy Councila (WEC) „Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050“</i></p>	<p><i>Poboljšanje stepena korisnog djelovanja</i>: tehničko-organizacione mjere koje povećavaju stepen djelovanja kod proizvodnje, transformacije, akumulacije i transporta energije, tako da za određenu količinu potrošene energije treba utrošiti što manje primarne energije;</p> <p><i>Poboljšanje efikasnosti korišćenja</i>: postojeću korisnu energiju što efikasnije koristiti (npr. bolja izolacija, povećanje opterećenosti, rekonstrukcija zastarjelih postrojenja i sl.);</p> <p><i>Upravljanje i usmjeravanje potrošnje</i>: direktan uticaj na potrebe korisne energije (npr. niža temperatura prostorija, isključivanje suvišne rasvjete, veća tehnološka disciplina);</p> <p><i>Dugoročno strukturno smanjenje potreba</i>: potrošnja energije se smanjuje izmjenom u strukturi proizvodnje. napuštaju se visokoenergetski proizvodi u korist visoko produktivnih proizvoda uz malu potrošnju energije po jedinici proizvoda (primjena novih ili poboljšanih tehnologija).</p>

C. Ilustracija energetske efikasnosti, [19]



D. Održivi razvoj kroz 17 ciljeva

- Cilj 1: Svijet bez siromaštva;
- Cilj 2: Svijet bez gladi;
- Cilj 3: Zdravlje i blagostanje;
- Cilj 4: Kvalitetno obrazovanje;
- Cilj 5: Rodna ravnopravnost;
- Cilj 6: Čista voda i sanitarni uslovi;
- Cilj 7: Pristupačna energija iz čistih izvora;
- Cilj 8: Dostojanstven rad i ekonomski rast;
- Cilj 9: Industrija, inovacije i infrastruktura;
- Cilj 10: Smanjenje nejednakosti;
- Cilj 11: Održivi gradovi i zajednice;
- Cilj 12: Održiva potrošnja i proizvodnja;
- Cilj 13: Zaštita klime;
- Cilj 14: Očuvanje vodenog svijeta;
- Cilj 15: Očuvanje života na zemlji;
- Cilj 16: Mir, pravda i snažne institucije;
- Cilj 17: Partnerstvom do ciljeva

E. Objektivno vrednovanje energetske resursa	F. Valorizacija štete po životnu sredinu (okolinu)
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Vrijeme vraćanja primarne energije utrošene za gradnje</i>, izraženo u godinama, za koje elektrana ili investiciona mjera štednje, vrati primarnu energiju koja je utrošena za njenu realizaciju; • <i>Vrijeme vraćanja energije za izgradnju i održavanje postrojenja</i>, kao i izgubljene energije zbog zaposjedanja energetske produktivnog prostora; • <i>Indeks strateškog prioriteta (ISP) izvora energije i/ili investicionih mjera štednje</i>, kao bezdimenzionalna veličina može da bude $>$ ili $<$ 1 (ako je $ISP > 1$ radi se o izvoru energije ili mjeri racionalizacije potrošnje energije koji imaju neospornu dugoročnu stratešku valjanost, jer je energetske prihodi veći od sume svih rashoda - potrošenih primarnih energija; očito je da se u toj kategoriji mogu naći samo neki koncentrisani obnovljivi izvori energije, kao i neke energetske efikasne investicione mjere štednje); • <i>Finansijski efekti smanjenja emisija CO₂</i>; • <i>Osnovna dilema vezana za korišćenje OI je njeno objektivno vrednovanje uz korišćenje egzaktnih mjerljivih i uporedivih pokazatelja, zasnovanih na bilansu energije utrošene u procesu izrade proizvodnih uređaja, montaže i ugradnje, kao i tokom njihovog korišćenja (eksploatacije) i održavanja, sa jedne strane i ostvarenih energetske prihoda, ostvarenih tokom eksploatacije, sa druge strane</i> (tako se u okviru reference [28] za vrednovanje predlažu sledeći objektivni pokazatelji: vrijeme vraćanja uložene energije za izgradnju i održavanje energetske izvora, indeks strateškog prioriteta izvora energije ili investicionih mjera energetske racionalizacije, na bazi kojih se može konstatovati da brojne tzv. obnovljive energije u suštini nisu obnovljive, jer se za izradu takvih postrojenja utroši više primarne energije nego što se može da dobije tokom njihove eksploatacije) 	<ul style="list-style-type: none"> • I pored toga što je uticaj energije OI na okolinu daleko manji od uticaja konvencionalnih energetske izvora, on ipak postoji, pa je neophodno analizirati: uticaj na kvalitet zemljišta i pojavu efekta erozije tla, uticaj na kvalitet vode, uticaj na kvalitet vazduha i mikroklimu, uticaj na kvalitet pejzažnih karakteristika područja, uticaj na ukupni nivo buke, uticaj na intenzitet elektromagnetnog zračenja i vibracije, uticaj na flor i faunu, uticaj na prirodna dobra posebnih vrijednosti, kulturna i materijalna dobra, kao i uticaj na zasjenjivanje i treperenje. Pri realizaciji ove analize neophodno je posmatrati odvojeno periode životnog ciklusa energetske objekata, posebno periode pripreme i izgradnje (period mjerenja parametara vjetrova, priprema projektne dokumentacije, period montaže, period probnog rada), period eksploatacije i održavanja (periodi stacionarnih i nestacionarnih režima rada, pojave akcidentnih situacija), period rekonstrukcije, revitalizacije i modernizacije (period produženog radnog vijeka) i period uklanjanja objekta ili zamjene njegove funkcije (npr. promjena namjene u turistički objekat); • Štetni efekti po životnu sredinu (okolinu) i zdravlje ekonomski se vrednuju sa ciljem da se spriječi njihovo zanemarivanje pri donošenju odluka, pri čemu eksterni troškovi se procjenjuju na osnovu štete po okolinu/zdravlje koju uzrokuju, tzv. postupkom slijeda uticaja: <i>(utvrđivanje nivoa emisije + utvrđivanje nivoa imisije) → proračun efekata na okolinu i zdravlje → procjena eksternog troška</i>; • Za proračun eksternih troškova treba poznavati iznose emisija onečišćujućih materija, njihovo raspršenje u prihvatnim medijima (vazduhu, vodi, zemljištu), efekat povišenih koncentracija na okolinu i/ili zdravlje i pripadajuću novčanu štetu i sl.

ZAKLJUČCI I PREPORUKE

<ul style="list-style-type: none"> • Obnovljivi izvori energije neće moći zamijeniti fosilna goriva ili, alternativno, obnovljivi izvori sa ovakvim nivoom stepena razvoja primijenjenih tehnologija neće tako brzo moći zamijeniti fosilna goriva; • Neki od navodno obnovljivih izvora energije u suštini to nisu (više primarne energije utroši se za njihovu izradu i održavanje nego što ti uređaji proizvedu energije u čitavim svom periodu eksploatacije); • Razmjera štete i pripadajući eksterni troškovi bitno zavise o meteorološkim, geografskim i demografskim uslovima na makro i mikro lokaciji elektrane; • Biće potrebne adekvatne promjene kako u društvenom poretku, načinu razmišljanja, načinu života, tako i u načinima korišćenja energije, kao i načinima korišćenja svih resursa; • Racionalizaciju potrošnje energije čini skup mjera kojima se uz promjene organizacije rada, načina korišćenja strojeva, uređenja i materijala, a uzimajući u obzir i sigurnost rada, zaštitu zdravlja i okoline, ostvaruje optimalna proizvodnost, kvaliteta proizvoda, rentabilnost i ekonomičnost uz istovremeno smanjenje utroška energije po jedinici proizvoda; • Održivi razvoj umjesto potrošačkog mentaliteta → možemo li uživati u "manje, sporije, efikasnije, lokalno ili nam treba saradnja?", [18]; • Ne treba zanemariti ograničenje mogućnosti korišćenja rasutih obnovljivih izvora u tzv. velikoj energetici, za visokotemperaturne potrebe (proizvodnja električne energije, procesna toplota), zbog čega je nužno da se njihovo korišćenje prethodno detaljno analizira sa gledišta energetske dohodovnosti, upoređivanjem svih energetske rashoda - za izgradnju postrojenja, njihov pogon i održavanje (uključivši izgubljene energije na zaposjednutom prostoru), i energetske prihoda - energije koja se dobija tokom korišćenja postrojenja; • Podsticaji za korišćenje obnovljivih izvora na bazi potrošnje električne energije, koji plaćaju krajnji potrošači, nije najsretnije rješenje, jer egzistira ograničenje vezano za povišenje nivoa potrošnje ili povećanje broja potrošača koji u konačnici imaju isti efekat, teško je očekivati povećanje nivoa sredstava za sufinansiranje proizvodnje na bazi obnovljivih izvora; • Uticaj na životnu sredinu (posebno malih hidroelektrana, zatim vjetroelektrana) i porast otpora protiv gradnje istih narušava jedan od osnovnih principa održivosti njihove gradnje u budućnosti; • Ograničenost u raspoloživosti korišćenja biomase u Republici Srpskoj i dalje snabdijevanje imaće za rezultat značajniji rast cijena ovog energenta u budućnosti, pa se postavlja objektivno pitanje o njihovoj ekonomsko-finansijskoj opravdanosti u budućem poslovanju (poslovanje postojećih toplana u Prijedoru i Banjoj Luci, kao i nove toplane u izgradnji u Banjoj Luci); • Pronalaženje izbalansiranog odnosa u korišćenju primarnih energenata na bazi obnovljivih i neobnovljivih izvora energije, uz primjenu tzv. „čistih“ tehnologija u korišćenju fosilnih goriva, realizaciju principa vezanih za racionalizaciju i štednju energije i energetske efikasnost (posebno smanjenja sopstvene potrošnje proizvodnih objekata) i „objektivno“ vrednovanje obnovljivih izvora energije, ostaje kao „prelazno rješenje“ u planiranju energetske objekata i za naredni period; • Poboljšanje efikasnosti potrošnje energije ne podrazumijeva samo primjenu tehničkih rješenja, nego i jačanje nivoa svijesti ljudi i njihove volje za promjenom ustaljenih navika prema energetske efikasnim rješenjima. Zadovoljavanje 3E forme (energija, ekonomija i ekologija), predstavlja zahtjevniji zadatak koji se postavlja pred projektante i građevinski sektor u energetici, odnosno rješavanje problema nove izgradnje usklađene sa savremenim standardom života i održivim razvojem sa jedne, i problema osavremenjivanja postojeće izgradnje koja u velikom postotku ne zadovoljava današnje standarde, troši enormno mnogo energije i postaje značajni problem i veliki zagađivač okoline, sa druge strane; • Polazeći od energetske logike, po kojoj energetske prihodi trebaju biti dovoljno veći od ukupnih energetske rashoda, neophodno je prilagoditi i zakonske okvire vezane za podsticaje i stimulaciju korišćenja obnovljivih izvora energije i efikasne kogeneracije; • Kako najveći efekat imaju mjere energetske efikasnosti, posebno u dijelu planske racionalizacije potrošnje i štednje energije (striktno poštovanje propisa za toplotnu izolaciju zgrada i energetske certificiranje, promet proizvoda isključivo sa adekvatnim atestima sa aspekta energetske racionalnosti, reciklaže i zbrinjavanja otpada, sistemi grijanja sa toplotnim pumpama, koje će svoj pravi značaj iskazati u uslovima adekvatnog vrednovanja energije), neophodno je mjere fiskalne politike usmjeriti ka projektima iz ove oblasti.
--

Sl. 2. Alternative i različita razmišljanja o budućem razvoju energetike

VI. ZAKLJUČAK

Pariška i prethodne konferencije na svetskom nivou pokušavaju dogovoriti ograničenja emisije stakleničkih gasova, prvenstveno ugljen-dioksida, [1] i [2]. Manje je prihvaćena činjenica o postojanju granica rasta potrošnje energije sa socijalnog aspekta, iznad koje veća potrošnja energije uništava društvenu strukturu, a koja se ne mora podudarati sa granicom prihvatljive fizičke destrukcije životne sredine, [1]. Fantastičan rast svjetske ekonomije do sada zasnovan je na primjeni fosilnih goriva (ugalj, nafta i prirodni gas), koja su imala vrlo velik energijski povrat uložene energije čak iznad 50 (engl. *Energy Return On Energy Investment*, EROEI), dok obnovljivi izvori energije imaju znatno manji EROEI, [8] i [9]. Činjenica je i da ovakav rast ne bi bio moguć sa obnovljivim izvorima energije (EROEI za fosilna goriva sa vremenom se smanjuje, što ima za posljedicu da energija postaje sve skuplja). S druge strane, stalan rast privrede i bruto nacionalnog dohotka zahtijeva sve više energije. Kako za do sada korišćene izvore energije postoje ograničenja bilo u količini (rezerve, odnosno fizičke količine uglja, nafte i gasa u zemlji su konačne) ili u dotoku (sunčevo zračenje dolazi do zemljine površine sa maksimalnom snagom od 1 kW/m^2 , odnosno prosječnom od oko 200 W/m^2), alternative rastu su stalan nivo (engl. *steady state*) ili oscilovanje ([1]), pri čemu stalni nivo, kao i srednja vrijednost oscilovanja može biti na nekom nivou, većem jednakom ili manjem od trenutnog nivoa. Ključno pitanje koje se u analizama postavlja je može li se ekonomija održavati na nekom visokom nivou sa raspoloživim resursima zasnovanim na obnovljivim izvorima energije ili je budućnost zasnovana na manje energije neizbježna. Pri tome, budućnost sa manje energije ne mora biti katastrofalna, pa se umjesto o *održivom razvoju* treba početi razmišljati o tzv. *prosperitetnom padu*, kakav opisuje poznati ekolog Howard T. Odum u svojoj knjizi *A Prosperous Way Down*, [24]. Postoje i razmišljanja data u [25], koja govore o stremljenjima u pravcu tzv. *stagnirajuće ekonomije* (engl. *steady state economy*), pri čemu je u takvoj ekonomiji održivi razvoj još uvijek moguć, pri čemu, naravno, razvoj ne mora značiti i rast. U ekonomiji koja stagnira ili se smanjuje, ključne vrijednosti trebale bi postati: *manje* umjesto *veće*, *efikasnije* umjesto *brže*, *štedljivije* umjesto *potrošljivije* i *saradnja* umjesto *kompeticija*.

LITERATURA

- [1] Z. Prelec, Energetska postrojenja (hidroelektrane), Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, <http://www.riteh.uniri.hr/>, 2015.
- [2] Z. Milovanović, Hidroenergetska postrojenja, Skripta, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2004.
- [3] O. Bonacci, Oborine: glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus, GEING, Split, 1994.
- [4] L. Jozsa, Energetski procesi i elektrane, Skripta, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer u Osijeku, ETF Osijek, Osijek, 2006.
- [5] B. Đorđević, Korištenje vodnih snaga - Osnove hidroenergetskog korišćenja voda, Građevinski fakultet univerziteta u Beogradu, Beograd, 1991.
- [6] 30 godina CHE Čapljina, Brošura, JP Elektroprivreda Hrvatske zajednice Herceg Bosne d.d., Mostar, Mostar, 2009.

- [7] Lj. Papić, Z. Milovanović, Održavanje i pouzdanost tehničkih sistema, Biblioteka DQM monografije Kvalitet i pouzdanost u praksi, Knjiga 3, Prijedor, 2007, 501 s.
- [8] Z. Milovanović, Monografije: "Energetska i procesna postrojenja" Tom 1: Termoenergetska postrojenja - Teoretske osnove, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2011, 431 s.
- [9] Z. Milovanović, Monografije: "Energetska i procesna postrojenja" Tom 2: Termoenergetska postrojenja - Tehnološki sistemi, projektovanje i izgradnja, eksploatacija i održavanje, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2011, 842 s.
- [10] M. Hočevar, Hidroenergetski sistemi, Univerza v Ljubljani, Fakultet za strojništvo, Ljubljana, 2015.
- [11] P. Stojić, Hidrotehničke građevine, Knjiga I, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split 1997.
- [12] P. Stojić, Hidrotehničke građevine, Knjiga II, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split 1998.
- [13] P. Stojić, Hidrotehničke građevine, Knjiga III, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split 1999.
- [14] M. Babić, Hidrotehničke građevine, predavanja, Građevinski fakultet Osijek, 2014.
- [15] B. Radonjić, I. Vujošević, Ekonomski aspekti proizvodnje električne energije, Matica crnogorska, Br. 56/57, Cetinje Podgorica, 2013/2014.
- [16] B. Đorđević, Objektivno vrednovanje obnovljivih izvora, Vodoprivreda, 0350-0519, 40 231-233, 2008., pp. 19-38
- [17] F. Begić, Metoda procjene stepena održivosti energetskih postrojenja različitih izvora u Bosni i Hercegovini, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 2003.
- [18] F. Barbir, Obnovljivi izvori energije i održivi razvoj, Rekapitulacija – Zaključci, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, <http://marjan.fesb.hr/~fbarbir/PDFs%20Obnovljivi%20izvori/Zakljucci.pdf>, Split, 2011.
- [19] Ž. Tomšić, B. Sučić, Mjerenje i analiza potrošnje energije, Izvod iz predavanja, FER, Zagreb, 2008.
- [20] F. Barbir, Optimalno korištenje energije sa socijalnog aspekta (Osvrt na esej Ivana Illicha *Energy and Equity*), JAHR, Vol. 4, No. 8, 2013, pp. 673-680
- [21] D.H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W.W. III Behrens, *Limits to Growth*, Universe Books, New York, 1972 (dopunjena i ažurirana izdanja: Donella H. Meadows, Jorgen Randers and Dennis L. Meadows, *Beyond the Limits*, Chelsea Jorgen Randers and Dennis L. Meadows, *Limits to Growth: 30 Years Update*, Chelsea Green Publishing Co., Post Mills, Vermont, 2004)
- [22] I. Illich, *Energy and Equity*, Calder & Boyers, London 1974. Postoji hrvatski prijevod: Ivan Illich, *Energija i pravednost*, (Eugen Vuković i Kaja Ocvirek-Krušić, prev.), *Diskrepancija*, Vol. 10, No. 14/15, lipanj 2010.
- [23] R., Heinberg, Searching for Miracle, Net Energy' Limits & the Fate of Industrial Society, A Joint Project of the International Forum on Globalization and the Post Carbon Institute. (False Solution Series #4) September 2009.
- [24] H.T. Odum, E.C. Odum, *A Prosperous Way Down*, University Press of Colorado, Boulder, 2001.
- [25] H. Daly, *Steady State Economics* (2nd ed.), Island Press, Washington, DC 1991 (1st ed. W.H. Freeman 1977; Herman Daly, *Beyond Growth*, Beacon Press, Boston, 1996).

ABSTRACT

Planning development of electro energetic system, covers all the activities, starting from initial assumptions regarding construction of some building, all the way to its commissioning. When planning development of energetics, the starting point should be following criteria: safety in supplying consumers with minimal expenses, rational exploitation of domestic sources, together with correct evaluation of imported forms of energy, giving maximum in suppressing monopolism and having single form of energy

and reaching satisfying conditions concerning environment protection and sustainable development. Starting from gross national income and the energy consumption per citizen, from economy point of view, the prosperity of a nation can be equalized with high energy consumption per citizen. On the other hand, from the aspect of thermodynamics, the prosperity could be characterized through the high efficiency in energy transforming, while from the social aspect, the prosperity would result in case when the wealthiest part of population would consume the least amount of mechanical energy. New methods for, from the aspect of energetics, objective evaluation of all forms of energy, especially of those which are being treated as renewable ones, are based on analyzing and comparing all incomes and outcomes of the primary energy – from energy consumed for production of a device for the energy transformation, to all energy consumptions in process of its exploitation. Exploitation of the energy, to some extent enables social development. Above that extent, energy consumption increases on cost of social equality (overall prosperity), because less and less people can afford the

convenience of consumption. In that case, the growth of gross national production can be only the illusion of increased prosperity, which enjoy only small number of people. This paper addresses issues related to more objective evaluation of renewable energy sources, as well as the social aspect of the growth of consumption of useful forms of energy.

Key words: Energetic planning; Energetic development; Renewable energy sources; Objective energetic evaluation; Social aspect

**SOME THOUGHTS ABOUT PLANNING OPTIMAL
USAGE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES FROM
THE SOCIAL ASPECT AND THE ASPECT OF
SUSTAINABLE DEVELOPMENT - OBJECTIVE
EVALUATION AND SOCIAL ASPECT**

Zdravko Milovanović

Banjaluka kao pametni grad do 2040-te

Model naselja Borik

Slađana Janković¹, Marija Lukač², Petar Gvero³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko građevinsko geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²IPP Arhitektonski studio, Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

sladjana.jankovic@aggf.unibl.org, lukacm92@gmail.com, petar.gvero@mf.unibl.org

Sažetak—U radu je predstavljeno viđenje grada Banja Luke, kao pametnog grada do 2040. godine. Analizirano je naselje Borik – kao jedan modul grada, gdje se prijedlozi intervencija i ponudena rješenja za probleme unutar njega mogu implementirati na cijeli grad, u zavisnosti od ključnih problema određene zone. Problemi koji su analizirani vezani su uglavnom za oblasti omotača-fasada i krovova (oblasti sa velikim energetske gubicima), parkiranja, savremenih tehnologija, urbanog mobilijara, rasvjete, održivosti, upravljanja i podizanja svijesti o kontrolisanoj potrošnji energije. Ponudena su rješenja i krajnji rezultati za svaku oblast posebno, koja su u skladu svjetskih principa pametnog i održivog graditeljstva.

Ključne riječi—*smart city, Banja Luka, održivi razvoj, energetska efikasnost, optimizacija, tehnologije*

I. UVOD

Globalna ekonomska kriza, ne štedeći pogađa sve države svijeta i sve privredne sektore. Zbog toga, koncept održivog razvoja i energetske efikasnosti postaje presudan u kreiranju ekonomskih i političkih kretanja, kako na globalnom tako i u okviru kretanja svake pojedinačne države. Danas, sve razvijene zemlje i većina onih u razvoju imaju uspostavljene mehanizme koji će trajno obezbijediti smanjenje potrošnje energije u gradovima. Pametni gradovi nisu samo „modni“ trend, oni su potrebni cijeloj civilizaciji kao održivo rješenje urbanog života [1]. Bavljeno ovim temom treba da pokaže mogućnost realizacije Banja Luke kao smart city-a, probudi nadležne organe za primjenom ovih održivih koncepata i pomjeri razvoj našeg grada, sa akcentom na energetske efikasnosti i održivosti. Rad ističe jasne korake za realizaciju pametnog grada kroz određeni vremenski period te rješenja brojnih problema građana, potrošnje energije, smanjenja emisije CO₂, unaprjeđenja svijesti i informisanja. Svjesni parametara koje treba da zadovolji jedan pametni grad, ali i ekonomskih (ne)prilika u državi i trenutnog stanja na lokaciji, period do 2040.godine raspoređen je na period od 8, 5 i 10 godina kako bi manjim investicijama postigli prve korake, a kasnije – većim, uspostavili mehanizme funkcionisanja pametnog naselja Borik u Banja Luci. Do 2025.godine planirani su prvi koraci za rješenje problema neefikasnosti, rasipanja energije, lošeg kvaliteta života, a oni se odnose na

optimizaciju omotoča zgrada i uspostavljanje mehanizama funkcionisanja građana i gradske uprave. Na taj način, građani učestvuju u kreiranju svog okruženja i donošenju odluka, a gradska uprava pored pružanja usluga, podstiče građane na održiv i energetske efikasan način života. Do 2030. godine realizovao bi se koncept zelenih krovova (veliki potencijal na lokaciji), pametnog transporta i pametnog parkinga. Najveće investicije koje se odnose na daljinsko upravljanje, aplikacije, pametnu rasvjetu i pametni urbani mobilijar ostavljene su za period od 2030-2040, kada se na predmetnom području stvore uslovi (od 2017-2030.) za njihovu primjenu.

A. Fenomen „smart city“

Kao rezultat intenzivnih iseljavanja i neplaniranog razvoja gradova nastao je koncept „Smart city“-a koji pokušava da riješi kako urbanističke tako i ekonomske probleme, a sve u cilju poboljšanja života građana. Pametni gradovi su potrebni cijeloj civilizaciji kao održivo rješenje urbanog života. Sam pojam pametnog grada može se najjednostavnije definisati kao vizija urbanog razvoja koji koristi digitalne i komunikacione tehnologije i internet pomoćna sredstva, kako bi se što bolje zadovoljile potrebe građana i unaprijedila djelotvornost gradskih usluga. Na osnovu brojnih istraživanja dvije glavne stvari koje pametan grad donosi jesu održivost i efikasnost [1]. Najjednostavnije rečeno, pametan grad je koncept promišljanja razvoja grada u terminima održivosti i efikasnosti uz pomoć ICT-a. Kako bi grad bio Smart City, potrebno je pokrenuti što je moguće više inicijativa koje će doprinosti održivosti i efikasnosti korištenja resursa. To je zadatak svih učesnika funkcionisanja grada, prvenstveno gradske uprave, ali i poslovnog sektora, nevladinih organizacija, a ponajviše samih građana. Ključna polja pametnih gradova prema istraživanjima Tehničkog Univerziteta u Beču odnose se na: pametnu ekonomiju, pametnu upravu, pametni saobraćaj, pametno okruženje i življenje i pametne građane [2].

Zaključuje se da je cilj izgradnje pametnog grada poboljšati kvalitet života pomoću urbane informatike i tehnike za poboljšanje usluga te zadovoljenje potreba građana. Zahvaljujući informacionim i komunikacionim tehnologijama lako je ostvarljiva interakcija sa gradskim službama i administracijama te smanjivanje troškova i potrošnja resursa.

Zbog toga, smart city trebamo posmatrati kao jednu razvijenu mrežu čiju strukturu čine različiti aspekti urbanog života čiji je krajnji cilj neometano funkcionisanje u potpunosti.

B. Model naselja - princip za koncept pametnog grada

Model predstavlja pojednostavljenu sliku stvarnosti, jer obuhvata relevantne uticajne faktore neke oblasti koji su neophodni za istraživanje. Identifikacijom alternativnih rješenja (varijanti) i njihovim testiranjem te izborom najboljeg rješenja, kao i njegovom implementacijom, model zauzima nezamjenjivo mjesto i ulogu u procesu donošenja odluka. Modele koristimo da bismo pomoću njih što vjernije pokazali neki realan sistem sa svim njegovim svojstima i definicijama. Kako bi se ostvario koncept pametnog grada Banja Luke u periodu do 2040. godine princip modela korišten je da bi pojednostavio sam postupak. Projekat transformacije grada može biti spor zbog kompleksnosti gradske strukture, urbanih parametara i načina funkcionisanja mjesnih zajednica gradskih i prigradskih naselja. Za grad koji pripada nerazvijenom dijelu Evrope, koji ima velike gubitke energije, slabo razvijenu svijest o održivosti i efikasnosti period od 25-30 godina možemo reći da je relativno kratak. Zbog toga se modelom naselja na jednostavniji način predstavljaju analize, ideje i moguće realizacije kako bi za određeni vremenski period omogućili lakšu transformaciju ali i „napravili“ kalup za dalju implementaciju na ostala naselja (u koliko postoji dovoljna količina investicija, implementacija je brža i može se paralelno odvijetati u više naselja).

C. Naselje Borik kao model

Borik je naselje koje se nalazi u istočnom dijelu grada, neposredno uz centar i na lijevoj obali rijeke Vrbas. Obuhvat Borika prostorno je definisan ulicama sa tri strane (Aleja Svetog Save, Bulevar vojvode Petra Bojovića-istočna trznitna saobraćajnica, Gundulićeva ulica) i rijekom Vrbas na jugu. Predmet ovog istaživanja i prostornih analiza je obuhvat iz kojeg je izostavljen najsjevorniji niz blokova, jer taj dio susjedstva Borik ne sadrži kolektivne stambene objekte i nije dio cjeline sagrađene u periodu sedamdesetih godina.



Sl. 1. Projektni obuhvat, naselje Borik, [6]

Naselje Borik ima izuzetno povoljan položaj, razvijene infrastrukturne mreže a što je najvažnije na samom početku zamišljen je kao moderan stambeni mikrorejon u kojem će stanovnici imati sve. Veliki broj otvorenih javnih površina pruža mogućnost za brojne intervencije neophodne za pametno funkcionisanje jedne ovakve sredine [3].

II. KONCEPT ZA RAZVOJ NASELJA „SMARTER TOGETHER“

Kreativnošću, znanjem i vještinama potrebno je iskoristiti postojeće potencijale prostora, unaprijediti ih i integrisati sa informacionim i komunikacionim tehnologijama, a sve u cilju kvalitetnijeg života stanovništva. Uključivanjem građana, eksperata i političara mogu se osmisliti i realizovati dugoročni principi za rješenje problema. Čovjek kao osnovna jedinica mreže funkcionisanja nalazi se u centru svih razvoja, povezan je i umrežen sa svim ostalim segmentima „Sl.2“.



Sl. 2. Razvojni koncept sa osnovnim ciljevima, autorski rad

Kako bi dostigli efikasnost, održivost i uštede korisnicima treba pružiti otvorenost informacija, transparentnost, inspiraciju i pristupačnost te ih motivisati za brigu o okolini i probuditi svijest o pametnom gradu i načinima njegovog funkcionisanja. Postupak je potrebno razviti postepeno, što je detaljnije analizirano u sledećem poglavlju.

A. Periodi za realizaciju projekta

Problem današnjice neophodno je podijeliti na manje dijelove i rješavati po segmentima da bi kao krajni rezultat dobili sredinu koja funkcioniše na pametan način. Zbog toga treba krenuti od jednostavnijih koraka koji iziskuju manje investicije, a brzo „ubiranje plodova“ tj.za kratko vrijeme rješenje nekih od problema i poboljšanje kvaliteta života „Sl.3“. Treba krenuti od svakodnevnih navika i truditi se, da se krećući od sebe kao pojedinca, smanji svakodnevno rasipanje energijom koje je sve manje. Do 2025.godine neophodno je smanjiti emisiju CO₂ i velike energetske gubitke kroz omotač zgrade. Pored toga neophodno je uspostaviti mehanizme funkcionisanja kako bi se gradska uprava i korisnici povezali i ostvarili kvalitetan vid „saradnje“. Do 2030. neophodno se

pozabaviti ravnim krovovima, kao velikim potencijalom ove lokacije, ozeleniti ih ili koristiti za postavljanje dodatnih uređaja za primjenu obnovljivih izvora energije. U istom periodu uspostaviti mreže za pametni transport i parkiranje, koje su zbog velike koncentrisanosti stanovništva na ovom prostoru, sada na jako lošem nivou. Do 2040, sa najvećom količinom investicija cilj je uspostaviti sisteme za pametne tehnologije, upravljanje, pametnu rasvjetu i pametni mobilijar.



Sl. 3. Vremenski period i koraci za ostvarenje cilja, autorski rad

III. INTERVENCIJE NA OBUHVATU I POSTIGNUTI REZULTATI

Kroz detaljnu analizu lokacije, uočavaju se brojni problemi, vezani za nekontrolisanu i prekomjernu potrošnju energije, neuređenost javnih prostora kroz nepostojanje savremenih pametnih tehnologija, te neiskorištavanje postojećih potencijala za uvođenje elemenata energetske efikasnosti- zelene površine, dječija igrališta, parking prostori i ravni krovovi. U radu su prikazani koncepti intervencija koji se odnose na proces optimizacije omotača, uređenje parking površina i uvođenje pametnog parkiranja i drugih pametnih tehnologija vezanih za mobilijar i rasvjetu.

A. Optimizacija omotača

Elemente omotača zgrade čine netransparentni dijelovi (spoljašnji zidovi, ravni krov, međuspratne konstrukcije) i transparentni (prozori i vrata). Kako bi dobili što tačnije rezultate i preko m^2 korisne površine objekta iskazali potrebu toplotnu energiju prema stanju objekta, potrebnu toplotnu energiju nakon sprovedenih mjera optimizacije omotača, visinu investicija, uštede i period povrata investicija za stambene objekte u naselju Borik za potrebe ovog istraživanja izvršili smo analizu za stambeni objekat Lamela 7 (južni dio naselja u Ul. Majke Knežopoljke) koja predstavlja objekat karakteristične strukture za područje analiziranog obuhvata. Pojednostavljenim proračunom omotača ovog objekta možemo doći do rezultata i parametara koje će nam pokazati gubitke energije i stvoriti sliku moguće uštede u budućnosti. Da bi objekat mogao da se uvrsti u minimalni zahtjevani energetski razred C potrebno je da svaki od elemenata omotača zadovolji dozvoljene koeficijente prolaza toplote koji su propisani Pravilnikom o energetskej efikasnosti. Trenutno ni jedan od elemenata omotača ne ispunjava zahtjevane

koeficijente prolaza toplote-čak su do pet puta veći. U zavisnosti od vrste elementa omotača i njegovih karakteristika nakon analize istih, primjenjivani su različiti načini unapređenja. Toplotna izolacija spoljašnjih zidova podrazumijeva postavljanje termoizolacionog materijala (kamene vune debljine 12 cm) sa spoljašnje strane zida sa svim potrebnim završnim slojevima fasade. Podove ovog objekta čine tavanice iznad negrijanih prostora i prijedlog je da se izoluju kombi pločama debljine 12 cm koje bi se postavljale na strop iznad negrijanog prostora sa završnom obradom od cementnog maltera. Pod iznad spoljašnjeg prostora (erker), trebao bi biti izolovan lamelama kamene vune debljine 20 cm zbog zahtjevanog nižeg koeficijenta prolaza toplote $U=0,20$ (W/m^2K). Ravni prohodni krov zbog mehaničkih karakteristika koje su propisane tehničkim uslovima za ovu vrstu građevinskih elemenata i niskog koeficijenta prolaza toplote izolovan je sa pločama XPS-a debljine 15 cm (koef.toplotne provodljivosti $\lambda=0,034$ (w/mK)), sa svim potrebnim hidroizolacionim slojevima i parnim branama. Dodavanjem predviđenih slojeva toplotne izolacije na postojeće netransparentne elemente omotača zgrade, zamjenom postojećih drvenih prozora (krilo na krilo), vrata sa pvc stolarijom i uvrštavanjem njihovih karakteristika u proračun dobili smo da svaki od posmatranih elemenat omotača ispunjava zahtjeve za prolaz toplote i zahtjevana klasa objekta je C. Optimizacija omotača donosi niz pozitivnih efekata kako za korisnike stanova tako i za sam grad Banjaluku. Korisnici stanova bi dobili kvalitetnije grijanje i samim tim poboljšali uslove komfora. Uštede i investicije po m^2 korisne površine objekta iznose:

- Potrebna godišnja energija (stanje): $E_s=145,88$ kWh/a
- Potrebna godišnja energija nakon unaprijeđenja: $E_{gm^2} = 50,64$ kWh/a
- Ušteda u potrebnoj godišnjoj energiji: $E_u=95, 24$ kWh/a
- Step en iskorištenja sistema grijanja: 0,85
- Cijena toplotne energije po cjenovniku Toplana : $C_u=0, 13382$ KM/kW [4]
- Cijena grijane površine sa naplatom tokom cijele godine: $C_g=1, 65$ KM/ m^2
- Potrebna mjesečna količina novca nakon poboljšanja: $K_n m^2= K_n(mj)= K_n(mj)/ P_k=3566/6315=0,5647$ KM/ m^2
- Investicija za sprovođenje mjera unapređenja omotača objekta (bez PDV-a): $I_m^2=134,00$ KM
- Investicija za sprovođenje mjera unapređenja omotača objekta (sa PDV-om): $I_m^2 =156,77$ KM
- Ušteda na godišnjem nivou (sa PDV-om): 23,75 KM/god, za period do povrata investicije

Proračunom na osnovu cijene energije (KM/kWh) izražavamo potrošnju energije na godišnjem nivou za posmatrani objekat i iz odnosa cijene energije trenutne potrošnje i cijene energije nakon sprovedenih mjera unapređenja omotača dolazimo do visine godišnje uštede koja se može izraziti kao ušteda energije (kWh/a) i ušteda u novcu (KM). Prilikom proračuna jednostavnog perioda povrata investicije ušteda u novcu je najvažniji parametar, dijeljenjem

ukupne investicije sa novčanom vrijednošću uštede na godišnjem nivou dobijamo preiod povrata investicije izražen u godinama. Za naš objekat potrebna investicija za realizaciju predviđenih mjera je 989.391,00 KM sa PDV-om uz predviđenu uštedu na godišnjem nivou od 149.973,00 KM dolazimo do toga da je jednostavni period povrata investicije od 6,60 godina tj. investicija će se isplatiti u dozvoljenom roku do 8 godina. Gubici kroz omotač zgrade se smanjuju za 60%. Toplotnom izolacijom omotača ne smanjuju se samo toplotni gubici već se povećavaju i uštede u emisiji CO² koja iznosi 32,82 kg/god [6]. Ideja je da se vlasnici stanova finansijski dodatno ne opterećuju. Potrebno je obezbjediti da se usluga grijanja plaća po stvarnom utrošku, što je značajno manje od onoga što su do tada plaćali (po kvadratnom metru grijane površine sa naplatom tokom cijele godine). Kredit bi se isplaćivao iz razlike. Grad i Vlada Republike Srpske bi svoj dio obezbjedili iz postignutih ušteda, kao i iz fondova Evropske Unije za poboljšanje energetske efikasnosti. Za zgradu za koju su se provjeravale mjere unapređenja dobijeni rezultati su :

- Korisna grijana površina zgrade: $P_k = 6\,315\text{ m}^2$
- Potrebna godišnja energija nakon poboljšanja: $E_g = 319\,817,30\text{ kWh/a}$
- Potrebna investicija za poboljšanje omotača: $I_{uk} = 1\,000\,000\text{ KM}$
- Potrebna godišnja količina novca za grijanje poslije poboljšanja: $K_n(a) = (E_{gm} \cdot C \cdot P_k) = 42\,794\text{ KM}$
- Potrebna mjesečna količina novca za grijanje poslije poboljšanja $K_n(mj) = K_n(a) / 12 = 3\,566\text{ KM}$
- Novac koji je raspoloživ za otplatu kredita mjesečno: $K_{nmj} = (C_g - (K_n \cdot m^2)) \cdot P_k = (1,65 - 0,5647) \cdot 6315 = 0,94 \cdot 6315 = 5\,906\text{ KM}$

Ova količina novca je dovoljna za otplatu kredita u iznosu 600.000 KM (odnosno 60% od ukupnog iznosa) uz kamatnu stopu 3.5% i period otplate od 10 godina. Ostatak (40 %) bi trebalo da subvencionišu Vlada Republike Srpske i grad Banjaluka. Vlasnici stanova bi koristili kreditne linije koje su predviđene za finansiranje projekata za poboljšanje energetske efikasnosti.

B. Zeleni krovovi kao mjera unaprijeđenja lokacije

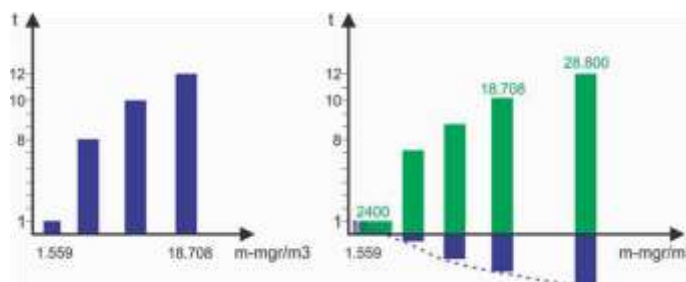
Konceptom intervencije se postojeće strukture ravnih krovova mjenjaju sa energetski efikasnim ravnim zelenim krovovima „Sl.4“. Koncept za izgradnju zelenih krovova predlaže podjelu krovova u dvije grupe (u skladu sa orijentacijom objekata, sklopom u okviru bloka i njihovom spratnosti): Na zelene krovove sa fotonaponskim panelima koji nisu prohodni i prohodne zelene krovove sa javnim površinama dostupnim mještanima. Ukupna površina zelenih krovova je 20.287 m² [6].



Sl. 4. Karta zelenih krovova, autorski rad

Krovovi sa solarnim fotonaponskim panelima u kombinaciji sa zelenim rastinjem niskog intenziteta i težine, trebalo bi da budu na zgradama ili djelovima zgrada (lamelama) koje su: okrenute direktno na južnu stranu, koje su visoke spratnosti i koje nisu zaklonjene od nekog objekta više spratnosti. Površine ovakvih krovova na lokaciji ima 16.602 m². Drugi oblici su krovovi koji nemaju pozicione mogućnosti za instalaciju fotonaponskih panela i oni predstavljaju zelene krovove javnog tipa, sa uređenim parterom, mobilijrom i mogućnosti boravka za stanare zgrade. Ovakvi krovovi su multifunkcionalnog karaktera i imaju brojne mogućnosti, od kojih je jedna izgradnja vrtova za uzgoj nisko rastućeg povrća i voća, za koji su stanovnici stambenih višeporodičnih objekata u gradskim zonama uskraćeni [7]. Površina ovakvih krovova na lokaciji ima 3.685 m².

Zeleni krovovi su značajni, jer osim što se njihovom izgradnjom smanjuju toplotni gubici, smanjuje se i emisija štetnih gasova [8]. Emisija štetnih gasova, kao što su sumpor oksid, azot oksid, čađ, ugljen monoksid u naselju Borik iznosi 1559 mg/m³ na mjesečnom nivou [6]. To je 18.708 mg/m³ na godišnjem nivou „Sl.4“. Izgradnjom zelenih krovova na površini od 12.000 m² (Smanjena i redukovana površina zelenila, jer se oduzima površina panela i partera) može se na mjesečnom nivou apsorbirati 2400 mg/m³ štetnih gasova. To znači da se izgradnjom zelenih krovova površine od 12.000 m² na godišnjem nivou može pročititi 28.800 mg/m³ što je za 10.000 mg/m³ više nego što je stvarna koncentracija štetnih gasova u naselju „Sl.5“. Time bi se kvalitet vazduha znatno poboljšao ne samo u naselju, nego i u njegovog okruženju, što opet predstavlja značaj za cijeli grad.



Sl. 5. Redukcija emisije štetnih gasova pomoću zelenih krovova, autorski rad

C. Pametno parkiranje

Pametno parkiranje predstavlja jedan od najznačajnijih aspekata modelovanja pametnih gradova. Kroz analizu predstavljen je problem parkiranja u naselju Borik i prijedlog rješenja za izmjene. Na lokaciji evidentiran je problem stacionarnog saobraćaja. Naime riječ je o nedostatku površina za parkiranje motornih vozila. Uvidom u stanje na terenu konstatovano je da je veliki broj vozila parkiran na za to nepredviđenim mjestima, te da je na taj način narušen kvalitet otvorenih javnih površina. Planiranim rješenjem je predviđeno da se nedostajuće parking površine obezbijede na nivou podrumskih etaža i da se uvodu pametne tehnologije za lakšu potragu slobodnih mjesta.

1) Izgradnja podzemnih parking etaža

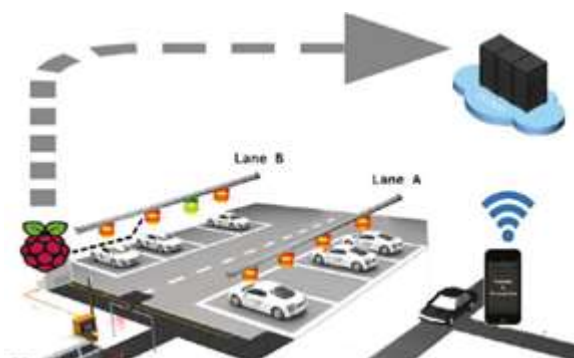
Okvirnim proračunom potreba za parkiranjem dobijen je podatak da je na predmetnom lokalitetu potrebno oko 1500 parking mjesta. S obzirom na navedeno, a imajući u vidu stvarno stanje, evidentno je da je na lokaciji neophodno obezbijediti dodatnih oko 500 parking mjesta. Obračunom površina predviđenih parking garaža dobijen je i okviran broj parking mjesta koji bi mogao da se obezbijedi. Broj parking mjesta je obračunat po ustaljenoj urbanističkoj praksi gdje se površina garaže podijeli sa brojem 35. U tabeli „TABELA I.“, numerički su prikazane planirane podzemne parking garaže, za koje postoje detaljniji grafički prikazi i urbanistička rješenja. U okviru tabele dat je okviran broj parking mjesta. S obzirom na navedeno, izgradnjom podzemnih parking garaža u datim površinama postiglo bi se okvirno 1150 dodatnih parking mjesta, čime bi se otvoreni javni parter naselja, ulazi u stambene zgrade i dio javnih površina mogao znatno rasteretiti.

TABELA I. PRIKAZ I PRORAČUN NASTANKA NOVIH PARKING MJESTA

Broj podzemne garaže	Okvirna površina garaže (m ²)	Površina/35m ²	Broj parking mjesta
1	2251	64,3142857	64
2	3995	114,14	114
3	3135	89,5714286	89
4	5405	154,428571	154
5	1440	41,1428571	41
6	8787	251,057143	251
7	1907	54,4857143	54
8	6235	178,142857	178
9	5263	150,371429	150
10	1803	51,5142857	51
UKUPNO P. MJESTA:			1146

Drugi dio rješenja odnosi se na uvođenje „smart“ aplikacija za pojednostavljenu potragu slobodnih parking mjesta, koje je detaljnije opisano u sledećem poglavlju.

2) Smart parking aplikacije



Sl. 6. Tehnologija pametnog parkiranja, [14]

Riječ je o android aplikacijama, koje su dio savremenih informacionih internet tehnologija, za lako i jednostavno parkiranje na javnim parking površinama „Sl.6“. Ova vrsta pametne tehnologije omogućava [9]:

- Pregled parking zona, garaža i parkinga u gradu;
- Informacije o slobodnim mjestima u garažama;
- Prepoznavanje trenutne zone;
- Ručno i automatsko produženje parkinga;
- Pogled “uživo” za parkinge i garaže;
- Lista parkinga, poredana od bližih ka daljim.

Ovim prijedlogom intervencije postiže se ušteda korisnika na vremenu, smanjeno kruženje automobila, a samim tim manja emisija CO₂, manja emisija buke i povećanje komfora.

D. Pametne tehnologije mobilijara i rasvjete

Naselje Borik ima velik broj zelenih površina i dječijih igrališta, koji se smatraju kao potencijali za uvođenje energetski efikasnih rješenja i pametnih tehnologija. To znači da bi se veći dio njih morao restaurisati novim principima gradnje, jer je trenutno u veoma lošem (devastiranom) stanju. Ukupna površina zelene infrastrukture iznosi oko 67.351 m². Urbani mobilijar upotpunjuje ambijent svakog grada stavljajući akcenat na njegovu autentičnost. Iz tog razloga veoma je važno pažljivo osmisliti gradski ambijent i obezbediti ugodan prostor u kom će se građani i turisti prijatno osjećati [10]. Naselje Borik ima potencijal da kreira novi pametni urbani mobilijar, koji funkcioniše na osnovu solarne energije, jer je radijacija sunčevog zračenja na godišnjem nivou 1300 kWh/m² [11] i u prosjeku ima 270 osunčanih dana. Taj intenzitet solarnog zračenja je isplativ da se postave fotonaponski solarni paneli koji sunčevu energiju pretvaraju u električnu i na taj način kreiraju mobilijar koji je funkcionalan i za građane i turiste, te stvore novi pozitivni identitet i atmosferu koja će biti komforna za sve korisnike. Konceptom intervencije koji se zasniva na tome da se postojeće 203 svjetiljke u naselju Borik „TABELA II“, zamjene sa led svjetiljkama koje se pokreću putem transformacije solarne energije u svjetlosnu, zahvaljujući fotonaponskim panelima

„TABELA III“. Time bi se napravila ušteda u potrošnji konvencionalne električne energije od 101.078 KM na godisnjem nivou. Proračun je izvršen na osnovu realizovanog primjera grada Slovenski Konjic [12], [13], koji je primjenom leed tehnologija postigao velike uštede.

TABELA II. POTROŠNJA I EMISIJA POSTOJ. SVJETILJKI, [13]

Količina (kom)	Potrošnja (W/kom)	Sati rada	Potrošnja kWh	Trošak (km)
203	900	4000	730.800	116.928

TABELA III. POTROŠNJA I EMISIJA LED SVJETILJKI, [13]

Količina (kom)	Potrošnja (W/kom)	Sati rada	Potrošnja kWh	Trošak (km)
203	122	4000	99.064	15.850

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan uzorak savremenog pametnog naselja, (grada u malom), sa principima održivog i pametnog funkcionisanja koji bi mogao da komparira već postojećim pametnim gradovima u Evropi i svijetu. Imajući u vidu konstantan problem nedostatka novca, unapređenja koja su osmišljena su podijeljena u 3 vremenska perioda. Vjerovatno najvažniji period je onaj prvi, do 2025. godine, kada bi bila realizovana rješenja koja iziskuju najmanje novca, a od kojih se ostvaruju uštede. To je prije svega obnova omotača zgrada u cjelosti. Opisanom mjerom smanjuje se potrebna sadašnja godišnja količina energije po m² grijane površine sa 145,88 kWh/a na 50,64 kWh/a, a toplotni gubici kod vanjskog omotača se smanjuju za 60%. Izgradnjom zelenih krovova smanjuje se emisija štetnih gasova, a izgradnjom podzemnih garaža i uvođenjem aplikacija za pametno parkiranje rasterećuje se parter i otvoreni međublokovski prostor. Uvođenje pametnih tehnologija u otvorene javne prostore poboljšava kvalitet i komfor stanovnika naselja. Svim poduhvatima poboljšavaju se i turističke vrijednosti grada. Podrška gradskih vlasti je takođe od izuzetne važnosti, kako sa finansijske tako i sa strane podizanja svijesti, jer uključivanje rukovodećih organa grada (finansijska pomoć, podsticaji i druge vrste angažmana) djeluju stimulirajuće na građane da se uključe i učine nešto što bi bilo od koristi svima. Uz dobru saradnju javnog i privatnog sektora uspostavio bi se ekonomičan način života za sve korisnike, a uz korištenje pametnih tehnologija stvorili bi se kvalitetniji javni prostori i zdravije okruženje u kojem bi svi bili zadovoljni. Iz analiziranog zaključuje se da za razvoj koncepta pametnog grada nije potrebno imati velika futuristička rješenja i novčana sredstva, već da je za početak dovoljno uočiti i iskoristiti postojeće potencijale i reagovati postepeno u skladu sa njima.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru predmeta „Timski projekat“ na master programu Energetska efikasnost u zgradarstvu, Univerziteta u Banjoj Luci. Tema predmeta, u protekloj školskoj godini bila je „Banjaluka smart city 2040“ Zahvaljujemo se profesorima i saradnicima koji su vodili ovaj predmet: doc.dr Darija Gajić, prof.dr Petar Gvero, doc.dr Goran Janjić i asist. Danijela Kardaš, kao i ostalim članovima tima Danijeli Đukić, Stefanu Gužviću, Draganu Barašinu i Vladanu Čubriloviću.

LITERATURA

- [1] S. Houbing, S.Ravi, T. Sookoor, S. Jeschke, “Sustainability in Smart Cities: Balancing Social, Economic, Environmental, and Institutional Aspects of Urban Life”, Smart Cities:Foundations, Principles, and Applications, Wiley Telecom eBook Chapters, 2017.
- [2] I. Majhen, “European Smart Cities”, City Hub, 2017.
- [3] N. Novaković, “Istrazivanje obrazaca upotrebe gradskih prostora u funkciji urbane regeneracije susedstva: Grad Banja Luka“, doktorska disertacija, Beograd 2014.
- [4] Топлана а.д. Бања Лука, “Закон о одржавању зграда“, Службени гласник Републике Српске 2011.
- [5] Д. Гајић, “Енергетска оптимизација омотача репрезентативних узорака постојећих стамбених зграда града БањаЛука“, докторска дисертација, Београд 2014.
- [6] Урбанистички завод Републике Српске, а.д. Бања Лука, “Ревизија регулационог плана стамбеног насеља Борик у Бањој Луци“, 2005.
- [7] Т. Модрић, “Улога зелених кровова у одрживом развоју заједнице“, Завршни дипломски рад, Varaždin, 2016.
- [8] American society of landscape architects, “The Roof is Growing“, Publikacija/Priručnik, 2008.
- [9] Siemens background Information, “Smart Parking: A System that Could Help Cities Rethink Parking“, 2015.
- [10] <http://www.urbanpark.rs/urbani-mobilijar-i-oprema,preuzeto> 18.06.2017.
- [11] R. Golob, A. Gubina, E. Podesser, and S. Halilčević, “Balkan Power Center Report: Guidelines for Renewable Energy Sources Technologies”, March 10- 11, 2005.
- [12] Б. Калањ, “Јавна расвета и локална самоуправа“, Београд, 2013 год.
- [13] <https://www.control4.com/solutions/smart-lighting,preuzeto> 14.05.2017.

ABSTRACT

The paper presents the vision of the city of Banja Luka, as a smart city until 2040. Borik settlement was analyzed - as one module of the city, where the proposals of interventions and the solutions offered for the problems within it can be implemented in the whole city, depending on the key problems of a particular zone. The problems analyzed are mainly related to the areas: envelope facades and roofs (areas with high energy losses), parking, modern technologies, urban mobility, lighting, sustainability, management and raising awareness of controlled energy consumption. The solutions and the ultimate results for each area are offered, which are in line with the world principles of smart and sustainable construction.

BANJA LUKA AS A SMART CITY BY 2040 MODEL OF BORIK SETTLEMENT

Slađana Janković¹, Marija Lukač², Petar Gvero³

Analiza mogućnosti unapređenja energetske efikasnosti kod toplana i industrijskih kotlarnica na ugalj

Goran Jankes¹, Nikola Tanasić², Mirjana Stamenić², Tomislav Simonović², Nikola Petković⁴, Aleksandar Nikolić³, Marko Radosavljević⁴, Miloš Saleta⁴

¹Inovacioni Centar Mašinskog fakulteta d.o.o., Beograd, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

³Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički Institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija

⁴Centar za energetska efikasnost i održivi razvoj d.o.o., Beograd, Srbija

jankes.goran@gmail.com, ntanasic@mas.bg.ac.rs, mstamenic@mas.bg.ac.rs

Sažetak—U radu će biti prikazani rezultati studija koje su realizovane sa ciljem da se utvrdi postojeće stanje nivoa energetske efikasnosti u jednoj toplani koja poseduje parni kotao u kojem se sagoreva spraseni ugalj. Para koja se proizvodi u kotlu se u rashladno-redukcionim stanicama redukuje na značajno niže pritiske i kao suvozasicena para šalje do potrošača. Aktivnosti na reliazaciji studija su podrazumevale merenja procesnih parametara na parnom kotlu radi utvrđivanja stepena korisnosti i pregled mera radi uklanjanja neracionalnosti u radu toplane i modernizacije kotlovsog postrojenja. U radu će biti prikazana metodologija materijalnog i energetsog bilasna posmatranog postrojenja, rezultati sprovedenog merenja i definisanje stepena korisnosti kotla i samog postrojenja u kome se proizvodi toplota. Posebna pažnja će biti posvećena analizi mogućnosti unapređenja energetske efikasnosti ugradnjom protivpritisnih parnih turbina koje treba da, umesto redukcionih stanica, vrše obaranje pritiska do nivoa potrebnih potrošačima. Na taj način bi se spregnuto proizvodila električna energija i toplota. Ovom analizom je utvrđeno da se, u slučaju posmatrane toplane, stepen korisnosti na pragu toplane primenom spregnute proizvodnje električne energije i toplote može povećati za 1,70%.

Ključne riječi—energetska efikasnost; stepen korisnosti kotla; toplana; kombinovana proizvodnja električne energije i kotla;

I. UVOD

Uprkos ubrzanom razvoju i implementaciji tehnologija za proizvodnju toplotne i električne energije iz obnovljivih izvora, procene su da će se do 2030. godine udeo finalne energije iz fosilnih goriva zadržati do 85% [1]. U tom smislu, mere energetske efikasnosti u toplanama i termoelektranama na ugalj naročito su važne, jer dovode do smanjenja utroška goriva za istu proizvedenu korisnu energiju, čime se postižu manje emisije ugljen-dioksida i drugih zagađujućih gasova.

U ovom radu su prikazani rezultati studija koje su realizovane sa ciljem da se utvrdi postojeće stanje nivoa energetske efikasnosti u jednoj toplani u kojoj se sagoreva spraseni ugalj. Studije su obuhvatile merenja procesnih parametara toplane i parnog kotla radi utvrđivanja stepena

korisnosti i pregled mera radi uklanjanja neracionalnosti i modernizacije kotlovsog postrojenja. U radu je takođe analizirana mogućnost unapređenja energetske efikasnosti ugradnjom protivpritisnih parnih turbina u cilju spregnute proizvodnje električne energije i toplote.

II. OPIS POSTROJENJA

Toplana koja je predmet analize je sa instalisanim kapacitetom od 120 MW. Namenjena je za proizvodnju toplotne energije koja je potrebna za odvijanje tehnoloških procesa i za toplifikaciju gradskih naselja. Kao gorivo na parnim kotlovima se koristi kolubarski klasirani lignit, čija se donja toplotna moć kreće u granicama od 7 do 10 MJ/kg. Kotlovsog postrojenje se sastoji od dva identična, paralelno vezana parna kotla. Kotlovi su nominalnog kapaciteta po 56 t/h pregrejavane pare parametara $p=59$ bar, $t=450^{\circ}\text{C}$. Maksimalni kapacitet kotlova je 70 t/h, nominalni 56 t/h a minimalni 45 t/h. Kotlovi su strmocevni ozidani sa ekranisanim ložištem, prirodnom cirkulacijom vode, prinudnom uravnoteženom promajom u gasnom traktu i sagorevanjem ugljenog praha u letu koji se priprema u ventilatorskim mlinovima.

Problemi u svakodnevnom radu kotlova su promenljiv kvalitet uglja, pucanje udarnih ploča na mlinovima, neodgovarajuća kontrola procesa sagorevanja na kotlovima koja uslovljava značajan višak vazduha u dimnim gasovima ali i povećane emisije ugljen-monoksida (zbog nedovoljne količine sekundarnog vazduha i nedovoljnog vremena zadržavanja ugljenog praha u zoni sagorevanja) kao i značajan udeo nesagorelih komponenti u pepelu i šljaci.

Pregrejana vodena para proizvedena na kotlovima vodi se na zajednički razdelnik, sa koga se vrši njena distribucija ka krajnjim potrošačima preko redukciono-rashladnih stanica. U toplani postoje 4 redukciono-rashladne stanice koje se snabdevaju napojnom vodom temperature 120°C iz zajedničkog voda na kome postoji merač protoka. Regulacija rada redukcionih stanica je ručna, na osnovu merenja

temperature i pritiska pare, tako da parametri pare na izlazu iz redukcionih stanica često odstupaju od stanja zasićenja.

Kondenzat se od većine krajnjih potrošača vraća u rezervoar kondenzata koji je na atmosferskom pritisku. Kondenzat se ne vraća od tehnoloških potrošača gde se para koristi direktno u tehnološkom procesu. Od razmenjivačke stanice za grejanje gradskih naselja pothlađeni kondenzat se u potpunosti vraća i odvodi direktno u napojni rezervoar u kotlarnici. Kondenzat koji se ne vrati u kotlarnicu mora da se nadomesti demineralizovanom vodom iz postrojenja za hemijsku pripremu vode (HPV) koja se termički priprema u degazatoru napojnog rezervoara čime se povećava sopstvena potrošnja pare.

Napajanje svih elektro potrošača u pogonu se vrši iz postrojenja na 35 kV. Sistem kompenzacije reaktivne snage nije ugrađen, kao ni filteri za eliminisanje viših harmonika napona. U pogonima gde se koristi električna energija napona 0,4 kV su u primeni motori osnovne (najniže) klase energetske efikasnosti, dok se u pogonima sa elektromotorima ne primenjuju frekventni regulatori što nepovoljno utiče na energetske efikasnost pogona u celini.

III. METODOLOGIJA

Pripreme aktivnosti su obuhvatile analizu upitnika koji je popunjen od strane stručnog osoblja toplane i pripremu mernih mesta na kotlovima. Upitnik je sadržao osnovne podatke o preduzeću, tehnološke šeme, tehničke karakteristike najznačajnijih potrošača energije, podatke o potrošnji energenata na mesečnom nivou, troškove za energente, obim proizvodnje itd. Merenja procesnih parametara su sprovedena u toku dva dana u zimskom periodu u cilju određivanja termičke efikasnosti parnih kotlova i toplane u celini. Takođe su definisani najznačajniji gubici toplote u sistemu. Termička efikasnost kotlova je određena indirektnom metodom prema standardu SRPS EN 12952-15:2009 [2]. Određen broj procesnih parametara je izmeren prenosnom mernom opremom, na primer, sastav i temperatura dimnih gasova i potrošnja električne energije na elektro motornim pogonima, dok je drugi deo podataka preuzet sa pogonskih merača preko SCADA sistema.

Stepen korisnosti parnih kotlova definiše se kao odnos korisne energije proizvedene pare i uložene energije (hemijska energija fosilna goriva, fizička toplota fosilnih goriva i fizička toplota vazduha za sagorevanje) i može se iskazati sledećim izrazom:

$$\eta_{koti} = \frac{Q_{kor}}{Q_{ul}} = \frac{Q_{pp} - Q_{nv}}{Q_{hfg} + Q_{ffg} + Q_{fvaz}} = \frac{m_{pp} h_{pp} - m_{nv} h_{nv}}{\sum B_i H_{d,i} + \sum B_i c_{fg,i} t_{fg,i} + m_{vaz} c_{p,vaz} t_{vaz}}$$

gde su:

m_{pp} – maseni protok pregrejane pare, kg/s

h_{pp} – entalpija pregrejane pare, kJ/kg

m_{nv} – maseni protok napojne vode, kg/s

h_{nv} – entalpija napojne vode, kJ/kg

B_i – maseni protok fosilnih goriva, kg/s

$H_{d,i}$ – donja toplotna moć fosilnih goriva, kJ/kg

$c_{fg,i}$ – specifični toplotni kapacitet fosilnih goriva, kJ/kg

$t_{fg,i}$ – temperatura fosilnih goriva, °C

m_{vaz} – maseni protok vazduha za sagorevanje, kg/s

$c_{p,vaz}$ – specifični toplotni kapacitet vazduha za sagorevanje, pri nepromenjenom pritisku, kJ/(kg°C)

t_{vaz} – temperatura vazduha za sagorevanje, °C

Procenjeni gubitak pare usled kontinualnog odsoljavanja kotlova iznosi 5% od produkcije pare kotla ($m_{nv} = 1,05m_{pp}$), dok se odmuljivanje kotla vrši u hladnom stanju. Za entalpiju napojne vode može se usvojiti vrednost $h_{nv} = 678$ kJ/kg, pri temperaturi i pritisku napojne vode kod kotlova u pogonu toplana (projektni parametri su 160°C i 60 bar).

Uzimajući u obzir granicu bilansnog polja 2 koja je definisana na Slici 1, stepen korisnosti na pragu Toplane (η_{topl}) se može odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$\eta_{topl} = \frac{Q_{izlaz}}{Q_{ulaz}} = \frac{Q_{isp}}{Q_{hfg} + Q_{el} + Q_{demi} + Q_{kon}}$$

gde su:

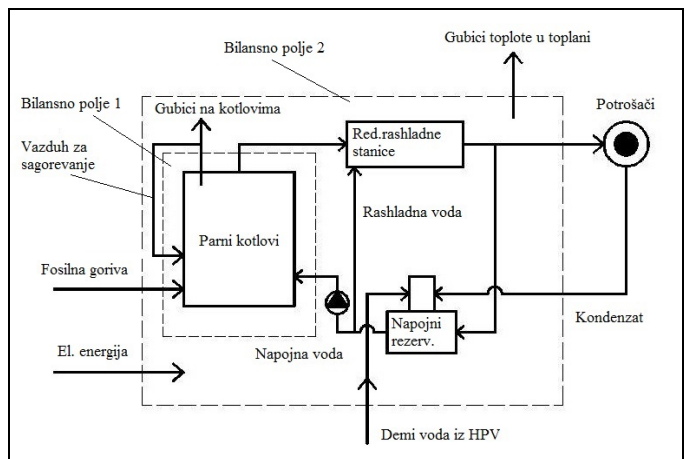
Q_{isp} – neto isporučena toplotna energija na pragu Toplane, MWh

Q_{hfg} – hemijska energija fosilnih goriva, MWh

Q_{el} – utrošena električna energija u pogonu, MWh

Q_{demi} – toplotna energija demineralizovane vode na ulazu u Toplanu, MWh

Q_{kon} – toplotna energija kondenzata koji se vrati u Toplanu, MWh



Sl. 1. Prikaz granica materijalnih i energetskih bilansa za kotlove i toplanu u celini

Za potrebe analize energetske efikasnosti rada kotlova bilo je potrebno meriti potrošnju 6 kV motora koji pripadaju datim

kotlovima. Tokom ispitivanja vršeno je merenje električne snage sledećih motora: ventilator svežeg vazduha VSV, ventilator dimnih gasova VDG1 i VDG2, mlin M1 i M2, napojne pumpe NP1 i NP2. Takođe su snimane ostale ćelije 6 kV postrojenja i to: rezerva, vodozahvat, odvod otpadne vode, osvetljenje toplane (transformator T6), elektromotorni pogoni za niskonaponske potrošače (transformator T4), elektromotorni pogoni za niskonaponske potrošače (transformator T5) i odvod sušara.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

U radu su prikazani rezultati za 2012. godinu koja je bila jedna od odabranih godina za procenu potencijala proizvodnje električne energije. u Tabeli I dat je prikaz potrošnje energenata, a u Tabeli II prikaz podataka o isporučenoj toplotnoj energiji na pragu toplane za istu godinu.

TABELA I. POTROŠNJA PRIMARNE ENERGIJE U TOPLANI U 2012.

Energent	jedinica	MWh/god
Ugalj, t/god	206021	464806
Mazut, t/god	264	2979
El.energija, MWh/god	19311	19311
Ukupno		487096
Toplotna moć uglja, Hd, kJ/kg		8122

TABELA II. ISPORUČENA TOPLOTNA ENERGIJA NA PRAGU TOPLANE U 2012.

	t/god	MWh/god
Tehnološka para – potrošač 1	255091	200810
Tehnološka para – potrošač 2	14976	11553
Tehnološka para – sopstvena potrošnja	196488	142940
Ukupno tehnološka para	466556	355303
Daljinsko grejanje		161923
UKUPNO sa sopstvenom potrošnjom		517226
UKUPNO bez sopstvene potrošnje		374286

TABELA III. REZULTATI PRORAČUNA STEPENA KORISNOSTI NA PRAGU TOPLANE U 2012.

Neto isporučena toplotna energija na pragu toplane, Q_{isp} , MWh	374286
Hemijska energija fosilnih goriva, Q_{hfg} , MWh	467785
Utrošena električna energija u pogonu, Q_{el} , MWh	19311
Toplotna energija demineralizovane vode na ulazu u toplanu, Q_{demi} , MWh	7578
Energija povratnog kondenzata – daljinsko grejanje, MWh	14352
Energija povratnog kondenzata – eksterni potrošači, MWh	1163
Toplotna energija kondenzata koji se vrati u toplanu, Q_{kon} , MWh	15515
Uložena energija na pragu toplane, $Q_{ulaz} = Q_{hfg} + Q_{el} + Q_{demi} + Q_{kon}$, MWh	510189
Stepen korisnosti na pragu toplane, $\eta_{topl} = Q_{isp} / Q_{ulaz}$, -	0,734

Udeo sopstvene potrošnje tehnološke pare u toplani je značajan (32% - sopstvena potrošnja i interni potrošači) i drastično odstupa od projektovanih parametara (16,6%). Na osnovu izmerenih procesnih parametara izvršen je proračun stepena korisnosti na pragu toplane za ukupne godišnje utroške i isporučenu energiju. Vrednosti su prikazane u Tabeli III.

Na osnovu izmerenih vrednosti, primenom prikazane metodologije, izračunate su vrednosti stepena korisnosti na pragu toplane (η_{topl}) koje su se za različite režime rada kotla kretale u granicama od 64,2 do 72,7%. Ovako niske vrednosti stepena korisnosti na pragu toplane pre svega su posledica velikih vrednosti sopstvene potrošnje pare u Toplani (u koje je uračunat i zbir gubitaka u sistemu za distribuciju pare) - 27 do 40% od proizvedene količine suvozasicene pare.

Rezultati proračuna energetskog bilansa su pokazali da je prosečna vrednost stepena korisnosti kotlova na godišnjem nivou za 2012. iznosio 83,5%. Izračunate vrednosti stepena korisnosti kotla na osnovu izmerenih parametara bile su u granicama od 83,51 do 86,39%. Zbog ovako niskih vrednosti stepena korisnosti je u 2015. godini rađena „Studija analize procesa sagorevanja u kotlovima Toplane sa pregledom mera na otklanjanju nedostataka i modernizaciji“ koja je imala za cilj optimizaciju rada kotlova i koja je pokazala da kotlovi, uz modernizaciju, pre svega, merno-upravljajčkog sistema, mogu da rade sa stepenima korisnosti preko 86% [3].

Kogeneracija sa protivpritisnim turbinama predložena je kao alternativa redukcionim stanicama (3 redukciono-rashladne stanice) u kojima se pregrejana para redukuje na pritiske potrebne potrošačima. Za usvojenu varijantu od 4 jednostepene protivpritisne turbine (po jedna za dve redukcije i dve za jednu redukciju gde je velika potrošnja pare u zimskom periodu) izračunato da je prema količinama pare isporučene potrošačima u 2012. godini moguće proizvesti 26.104 MWh/god električne energije. Ovdje će se dati procena uticaja koji bi ovako proizvedena količina električne energije imala na vrednost stepena korisnosti na pragu toplane.

Usvojen je način proračuna stepena korisnosti i podaci iz bilansa za 2012. godinu koji su prikazani u Tabeli II. Neto isporučena toplotna energija na pragu toplane ostaje jednaka postojećim vrednostima za 2012. godinu i odgovara količini suvozasicene pare koja je isporučena potrošačima. Uvođenjem turbina se smanjuje potrebna količina rashladne vode za hlađenje pare od stanja pregrejane pare do suvozasicene pare. Da bi se održala jednaka količina suvozasicene pare koja se isporučuje potrošačima, povećava se proizvodnja kotlova za 5%, a time i potrošnja uglja i hemijska energija uneta ugljem. Toplotna energija demineralizovane vode na ulazu u toplanu ostaje približno jednaka, jer se smanjuje količina rashladne vode za hlađenje pare, ali se približno za jednaku vrednost povećava količina napojne vode za kotlove zbog povećane proizvodnje pare. Svi ostali segmenti bilansa vezani za sopstvenu potrošnju i povrat kondenzata mogu se smatrati nezavisnim od rada turbina. Proizvedena količina električne energije od 26.104 MWh/god ulazi u isporučenu energiju na pragu toplane. Energetski bilans za 2012. godinu sa proizvodnjom električne energije i vrednost stepena korisnosti na pragu toplane dati su u Tabeli IV. Izračunata vrednost

stepena korisnosti na pragu toplane za 2012. godinu dobijena uz pretpostavku proizvodnje električne energije je 0,751, odnosno 1,70% veća u odnosu na slučaj bez proizvodnje električne energije.

TABELA IV. REZULTATI PRORAČUNA STEPENA KORISNOSTI NA PRAGU TOPLANE ZA 2012. GODINU UZ PRETPOSTAVKU PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Neto isporučena toplotna energija na pragu toplane, Q_{isp} , MWh	374286
Isporučena električna energija na pragu toplane, E_{isp} , MWh	26104
Ukupno sporučena energija na pragu toplane, Q_{isp} , MWh	400390
Hemijska energija fosilnih goriva, Q_{hfg} , MWh	491025
Utrošena električna energija u pogonu, Q_{el} , MWh	19311
Toplotna energija demineralizovane vode na ulazu u toplanu, Q_{demi} , MWh	7578
Energija povratnog kondenzata – daljinsko grejanje, MWh	14352
Energija povratnog kondenzata – eksterni potrošači, MWh	1163
Toplotna energija kondenzata koji se vrati u toplanu, Q_{kon} , MWh	15515
Uložena energija na pragu toplane, $Q_{ulaz} = Q_{hfg} + Q_{el} + Q_{demi} + Q_{kon}$, MWh	533429
Stepen korisnosti na pragu toplane, $\eta_{opt} = Q_{isp} / Q_{ulaz}$, -	0,751

Iz rezultata se može zaključiti da proizvodnja električne energije povećava stepen korisnosti na pragu toplane i da moguća proizvodnja električne energije za više od 35% prevazilazi utrošenu električnu energiju u toplani.

Rezultati merenja snage elektro-motora na kotlu 2 u nominalnom režimu rada su prikazani na Slici 2.



Sl. 2. Rezultati merenja aktivne snage elektromotora na kotlu 2 u nominalnom režimu rada

Na osnovu rezultata merenja može se zaključiti da su elektro motori predimenzionisani, naročito motori ventilatora svežeg vazduha koji rade sa 60% opterećenja (oko 150 kW) u nominalnom režimu rada kotla. Motori napojnih pumpi su opterećeni sa 80% do 90% (270 kW do 310 kW naspram instaliranih 360 kW), u zavisnosti od režima rada kotla. Opterećenje motora mlina u nominalnom režimu rada kreće se od 180 kW do 250 kW, u zavisnosti od procesnih parametara

kotla, što predstavlja opseg od 56% do 78% nominalnog opterećenja motora mlina koje iznosi 320 kW.

Ukupno angažovanje ostalih potrošača u toku merenja je bilo na nivou od 19%. Najveći udeo u toj potrošnji su pogonski motori na 0,4 kV (opseg potrošnje od 260 kW do 420 kW uz prosečnu potrošnju od oko 340 kW), zatim motori na vodozahvatu (konstatna potrošnja od 160 kW) i osvetljenje (90 kW).

V. MERE ZA POBOLJŠANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Pri sagorevanju lignita niske toplotne moći u velikim ložištima, referentna termička efikasnost prema BAT-u iznosi 86% [4]. U BREF dokumentu za energetske efikasnosti [5] prikazane su tehnike koje treba razmotriti u cilju povećanja energetske efikasnosti u industrijskim preduzećima. Najvažnije predložene tehnike su: uvođenje sistema energetskog menadžmenta, integracija proizvodnih procesa, ulaganje u znanje i ljudske resurse, efikasno održavanje, monitoring i kontrola procesa, merenje procesnih parametara, sprovođenje energetskih pregleda i uporedna statistička analiza, optimizacija procesa i tehno-ekonomska analiza.

Kod sistema za proizvodnju i distribuciju vodene pare posebno su naglašene sledeće najbolje dostupne tehnike (BAT): optimizacija procesa sagorevanja, vođenje procesa prema sadržaju kiseonika u dimnim gasovima, snižavanje temperature dimnih gasova ugradnjom ekonomajzera, korišćenje protivpritisne turbine umesto prigušnih ventila za regulaciju pritiska pare, predgrevanje napojne vode, prevencija stvaranja i uklanjanje nečistoća i depozita sa razmenjivačkih površina, minimizacija gubitaka usled odsoljavanja i odmuljivanja parnog kotla, optimizacija sistema za distribuciju pare (kontrola odvajanja kondenzata, izolacija parovoda i vodova kondenzata, smanjenje i eliminacija gubitaka usled cirenja pare), vraćanje kondenzata u kotlarnicu, korišćenje otparka gde god je to moguće (uključujući i vodu iz sistema za odsoljavanje kotla), regeneracija i rekuperacija toplote.

U domenu snabdevanja potrošača električnom energijom preporuke se odnose na korekciju faktora snage, korišćenje filtera za eliminaciju viših harmonika i efikasno upravljanje transformatorima. Preporuke se odnose i na korišćenje energetski efikasnih motora nove generacije koji su inicijalno skuplji, ali ekonomičniji ako se uporede troškovi tokom celokupnog radnog veka motora.

Kada je u pitanju upotreba motora povećane energetske efikasnosti treba istaći činjenicu da je trenutno u EU u primeni „Ecodesign“ direktiva, kojom se zahteva, počev od 01.01.2015. godine, primena energetski efikasnih motora klase IE2 za sve motore snage od 0,75 kW do 7,5 kW odnosno za motore snaga od 7,5 kW do 375 kW primena motora klase IE3 ili motora klase IE2 sa frekventnom regulacijom.

Takođe, preporuke se odnose na pravilno dimenzionisanje motora i korišćenje frekventnih pretvarača (regulatora) na pogonskim elektromotorima, prvenstveno pumpi i ventilatora. Savremeni frekventni regulatori osim funkcije regulisanja brzine motora vrše i funkciju zaštite motora (prekostrujna, temperaturna, zaštita od ispada faze, i dr.) i funkciju upravljanja preko PLC-a, tako da je moguće direktno

zadavanje brzine na osnovu merene veličine iz procesa (pritiska, temperature ili protoka).

U ovom radu su sumirane mere koje su predložene u studijama koje su sprovedene u toplani u prethodne tri godine (Tabela V). U tabeli su takođe prikazane izračunate uštede u potrošnji energenta, odgovarajuće smanjenje emisija CO₂ i uštede iskazane u novčanim jedinicama. Za pojedine mere je procenjena je vrednost investicije i određen prost period otplate (PPO). Emisioni faktor od 105 kgCO₂/GJ uložene primarne energije je izračunat prema analizama uzoraka uglja koji su prikupljeni u toku merenja.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je predložen veći broj organizacionih i tehničkih mera za poboljšanje energetske efikasnosti toplane. Implementacija predloženih mera bi doprinela većoj efikasnosti procesa transformacije energije u toplani, smanjenju emisija CO₂ i drugih zagađujućih gasova, povećanju fleksibilnosti toplane pri radu pri nižim opterećenjima i efikasnijem korišćenju niskokaloričnih fosilnih goriva sa značajnim varijacijama u kvalitetu.

U radu je takođe pokazano da se stepen korisnosti na pragu toplane primenom spregnute proizvodnje električne energije i toplote može povećati za 1,70%.

LITERATURA

- [1] Shi Y, Wang J, Liu Z, On-line monitoring of ash fouling and soot-blowing optimization for convective heat exchanger in coal-fired power plant boiler, Applied Thermal Engineering, 78, 2015, pp. 39-50
- [2] ***SRPS EN 12952-15:2009, Kotlovi sa vodogrejnim cevima i pomoćna oprema - Deo 15: Ispitivanja pri preuzimanju

- [3] Studija analize procesa sagorevanja u kotlovima Toplane sa pregledom mera na otklanjanju nedostataka i modernizaciji, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, 2015.
- [4] Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants, European Commission, July 2006
- [5] Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency, European Commission, February 2009

ABSTRACT

The results of several studies that have been carried out in order to analyze energy efficiency of a coal-fired heating plant are summarized in this paper. The steam produced in the boiler flows through cooling-reducing stations where the steam pressure is reduced to meet the designed pressure for the final consumers. The studies included measurement of process parameters on the plant and steam boilers for the purpose of determining the efficiency of the plant and proposing measures to eliminate the heat losses and promote modernization of the plant. The paper presents the methodology of the material and energy balance of the observed plant, the results of the conducted measurement and the determination of the plant efficiency. The analysis of the possibility of improving energy efficiency by installing steam turbines instead of cooling-reduction stations is also presented. In this way, the plant will produce combined heat and power. The results showed that by applying CHP technology for the case study plant, the efficiency of the plant could be increased by 1.70%.

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT WITHIN HEATING PLANTS AND INDUSTRIAL BOILER HOUSES WITH COAL COMBUSTION

Goran Jankes, Nikola Tanasić, Mirjana Stamenić, Tomislav Simonović, Nikola Petković, Aleksandar Nikolić, Marko Rasdosavljević, Miloš Saleta

TABELA V. PREDLOŽENE MERE ZA POVEĆANJE ENERGETKE EFIKASNOSTI U TOPLANI

Br.	Predložena mera	Uštede u potrošnji energenata t/god MWh/god	Smanjenje emisije CO ₂ t/god	Uštede iskazane u novcu 1000 EUR/god	Investicija 1000 EUR	PPO god
1.	Implementacija sistema energetskeg menadžmenta	15.190 t 1.550 MWh	17.007	265	-	-
2.	Rekonstrukcija i modernizacija merno-upravljačkog sistema na parnim kotlovima i optimizacija parametara sagorevanja ugradnjom gasnog analizatora	5.100 t	5.114	59,7	80	1,34
3.	Rad kotla sa jednim mlinom u uslovima smanjenog konzuma kod potrošača u letnjem periodu	5.655 t 410 MWh	6.140	89,66	-	-
4.	Uvođenje sistema za automatsko odsoljavanje kotlova	750 t	752	9,05	50	5,5
5.	Poboljšanje i optimizacija rada mlina sa aspekta upotrebe električne energije primenom frekventnog regulatora za upravljanje elektromotorom mlina	364 MWh	417	20	70	3,5
6.	Primena frekventnog regulatora kod pogonskog elektromotora ventilatora svežeg vazduha na kotlovima	290 MWh	332	16	40	2,5

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

620.9(082)
621.311(082)

НАУЧНО-стручни симпозијум Енергетска ефикасност (2017 ;
Бања Лука)

Zbornik radova [Електронски извор] / Научно-стручни
simpozijum Energetska efikasnost ENEF 2017 ; uređivački odbor
Branko Blanuša ... [i dr.] ; glavni urednik Branko Blanuša ; odgovorni
urednik Čedomir Zeljković. - Banja Luka : Univerzitet u Banjoj Luci,
Elektrotehnički fakultet, 2017

Način pristupa (URL): <http://enef.etfbl.net/2017/p10.html>. -
"Simpozijum "Energetska efikasnost - ENEF" je naučno-stručni skup
multidisciplinarnog karaktera kojeg organizuju Elektrotehnički,
Mašinski i Arhitektonskograđevinsko- geodetski fakultet Univerziteta
u Banjoj Luci, a uz suorganizatorstvo Saveza energetičara Republike
Srpske"--> predgovor. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-99955-46-27-4

COBISS.RS-ID 6921752

Partneri i sponzori



Empowered lives.
Resilient nations.



Implemented by



Фонд за заштиту животне средине
и енергетску ефикасност Републике Српске
Environmental Protection and Energy
Efficiency Fund of the Republic of Srpska



Life Is On

Schneider
Electric



УДРУЖЕЊЕ ИНЖЕЊЕРА
ЕЛЕКТРОТЕХНИКЕ
РЕПУБЛИКЕ СРПСКЕ



COFPC

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: enef.etfbl.net
E-mail: enef@etf.unibl.org