

Simpozijum Energetska efikasnost

Banja Luka, Bosna i Hercegovina

14-15. novembar 2019. godine

Zbornik radova



ENEf 2019

Organizatori



**Univerzitet u Banjoj Luci
Elektrotehnički fakultet**



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI

**Naučno-stručni simpozijum
Energetska efikasnost
ENEF 2019**

ZBORNİK RADOVA

Uređivački odbor

Branko Blanuša, Petar Matić, Čedomir Zeljković, Bojan Erceg

Glavni urednik

Branko Blanuša

Odgovorni urednik

Čedomir Zeljković

ISBN: 978-99955-46-39-7

Dekan Elektrotehničkog fakulteta

Prof. dr Branko Blanuša

Prodekan za NIR Elektrotehničkog fakulteta

Prof. dr Vladimir Risojević

Počasni predsjednik Simpozijuma

Prof. dr Branko Dokić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

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

Prof. dr Čedomir Zeljković, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Prof. dr Darko Marčetić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad

Prof. dr Milomir Šoja, Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo

Prof. dr Slobodan Lubura, Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo

Prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet Beograd

Prof. dr Ljubomir Mišćević, Arhitektonski fakultet Zagreb

Prof. dr Lidija Đokić, Arhitektonski fakultet Beograd

Prof. dr Biljana Antunović, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Banja Luka

Prof. dr Milenko Stanković, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Banja Luka

Prof. dr Sanda Midžić-Kurtagić, Mašinski fakultet Sarajevo

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

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

Doc. dr Mladen Knežić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Doc. dr Dijana Stupar, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Banja Luka

Doc. dr Srđan Vasković, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo

Doc. dr Milovan Kotur, Mašinski fakultet Banja Luka

Doc. dr Bojan Knežević, Mašinski fakultet Banja Luka

Dragoljub Davidović, Savez energetičara RS, Banja Luka

Predsjednik Organizacionog odbora

Prof. dr Čedomir Zeljković, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Članovi Organizacionog odbora

Prof. dr Branko Blanuša, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

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

Nemanja Kitić, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Slobodan Peulić, 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

PREDGOVOR

Pred vama se nalazi Zbornik radova sa četvrtog naučno-stručnog Simpozijuma „Energetska efikasnost – ENEF“ koji je održan 14. i 15. novembra 2019. godine u Banjoj Luci.

Simpozijum je multidisciplinarnog karaktera i organizuju ga Elektrotehnički, Mašinski i Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, uz suorganizatorstvo Saveza energetičara Republike Srpske. Simpozijum se održava svake druge (neparne) godine počevši od 2013. godine.

Na ovogodišnjem, četvrtom Simpozijumu, učestvovalo je preko 100 učesnika. Izloženo je 19 naučno-stručnih radova i dva predavanja po pozivu čiji autori dolaze iz zemalja regiona, iz akademske zajednice i industrije. Osim toga, održane su i prezentacije Ministarstva energetike i rudarstva i Ministarstva za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Vlade Republike Srpske vezano za regulatorni okvir iz oblasti energetske efikasnosti, te komercijalne prezentacije sponzora.

Ove godine, po prvi put, na Simpozijumu su učestvovali studenti završnih godina fakulteta, koji su predstavili studentski projekat iz unapređenja energetske efikasnosti kroz korišćenje solarne energije. Očekujemo da takvo učešće studenata postane redovna praksa na narednim simpozijumima.

Na kraju, u ime Programskog odbora, zahvaljujem svima koji su doprinijeli uspješnoj realizaciji ENEF-a, autorima radova, predavačima po pozivu, sponzorima, predstavnicima ministarstava i uprave na republičkom nivou i lokalnih zajednica, te svim učesnicima koji su svojim pitanjima i diskusijom podigli nivo Vašeg i našeg naučno-stručnog skupa.

Do narednog, jubilarnog, petog izdanja Simpozijuma ENEF 2021. godine!

Predsjednik Programskog odbora
prof. dr Petar Matić

Organizatori



Univerzitet u Banjoj Luci



Elektrotehnički fakultet



Mašinski fakultet



Arhitektonsko-geodetsko-građevinski fakultet



Savez energetičara Republike Srpske, Banja Luka

Sponzori i partneri



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 energetsку ефикасност Republike Srpske

Life Is On

Schneider
Electric

Schneider Electric



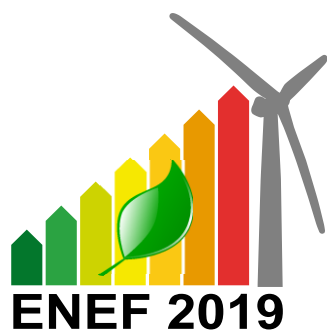
*Empowered lives.
Resilient nations.*

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

MAKOPRINT
ŠTAMPARIJA

printmako.com

Sadržaj ovog materijala ne odražava nužno stavove Razvojnog programa Ujedinjenih nacija (UNDP)



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2019

14 - 15. novembar, Banja Luka

Sesije Simpozijuma

Sesija A

Predsjedavajući: Biljana Antunović, Darija Gajić

Sesija B

Predsjedavajući: Tatjana Pešić-Brđanin, Čedomir Zeljković

Sesija C

Predsjedavajući: Predrag Petković, Zdravko Milovanović

Sesija D

Predsjedavajući: Branko Blanuša, Petar Matić

Sadržaj

Sesija A

Darija Gajić, Slobodan Peulić i Milica Malešević

MOGUĆNOSTI ENERGETSKOG UNAPREĐENJA VERTIKALNOG NEPROVIDNOG OMOTAČA U ZAVISNOSTI OD STEPENA ZAŠTITE ZGRADE	2
--	----------

Darija Gajić, Biljana Antunović i Diana Stupar

UNAPREĐENJE PODA NA TLU POSTOJEĆE ZGRADE U BANJOJ LUCI SAVREMENIM TOPLOTNO IZOLACIONIM MATERIJALOM	8
---	----------

Siniša Vučenović, Jovan Šetrajčić i Stevo Jaćimovski

NOVI TERMoeLEKTRICI U FUNKCIJI PRIGUŠENJA TOPLOTNOG RASIPANJA	14
--	-----------

Milan Pupčević, Petar Gvero i Milovan Kotur

ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI SISTEMA GRIJANJA OBJEKTA U FUNKCIJI ADMINISTRATIVNOG CENTRA	18
---	-----------

Sesija B

Alen Gačić i Zoran Govedar

ŠUMSKE KULTURE KAO OBNOVLJIVI IZVOR ENERGIJE	25
---	-----------

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić i Bojan Erceg

ANALIZA PERFORMANSI SAMOSTALNIH FOTONAPONSKIH SISTEMA ZA NAPAJANJE BAZNIH STANICA MOBILNE TELEFONIJE	31
---	-----------

Sesija C

Predrag Mršić i Željko Đurišić

ODZIV MODERNIH VJETROAGREGATA NA PROPADE NAPONA U PRIKLJUČNOJ MREŽI	38
--	-----------

Jovana Tuševljak i Željko Đurišić

OPTIMALNO POZICIONIRANJE PRIGUŠNICA U PRENOSNOJ MREŽI BOSNE I HERCEGOVINE	44
--	-----------

Dejan Stevanović, Miona Andrejević Stošović, Marko Dimitrijević i Predrag Petković

GUBICI NA EE MREŽI USLED KORIŠĆENJA OPREME ZA RUDARENJE KRIPTOVALUTA	49
---	-----------

Zdravko Milovanović, Valentina Janičić Milovanović, Snježana Milovanović i Momir Samardžić

OCJENA ENERGETSKE EFIKASNOSTI TERMoeLEKTRANE - PRIMJER RITE UGLJEVIK NOMINALNE SNAGE 300 MW	53
--	-----------

Zdravko Milovanović, Valentina Janičić Milovanović i Snježana Milovanović

UPRAVLJANJE PROJEKTOM ENERGETSKE EFIKASNOSTI NA TERMOENERGETSKIM POSTROJENJIMA	59
---	-----------

Zdravko Perić, Željko Despotović i Branislav Koprena

OPTIMIZACIJA I VERIFIKACIJA SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA U TS 110/20 kV LAKTAŠI 2	67
--	-----------

Sesija D

Sanja Jović, Marko Ikić, Mladen Banjanin i Goran Vuković

UTICAJ CFL I LED RASVJETNIH TIJELA NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE73

Predrag Mršić, Nemanja Kitić, Bojan Erceg, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković i Petar Matić

**PROJEKTOVANJE PASIVNOG KOMPENZATORA NEAKTIVNE SNAGE
INDUSTRIJSKOG POTROŠAČA79**

Diana Bogdan, Petar Gvero i Milovan Kotur

**KORIŠĆENJE TRNSYS SOFTVERA KAO ALATA U DIMENZIONISANJU I OPTIMIZACIJI SISTEMA ZA
SOLARNO ZAGRIJAVANJE TOPLE POTROŠNE VODE84**

Renata Srbljanin, Vladimir Popović, Roberto Varga, Petar Matić i Darko Marcetić

**GRAPHICAL USER INTERFACE FOR SELF-COMMISSIONING OF INDUCTION MOTOR DRIVE INSURING
HIGH-EFFICIENCY OF ELECTRICAL VEHICLE90**

Milan Paripović

TELEKOM JE LIDER U ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI95

Slobodan Lubura

REGENERACIJA KINETIČKE I POTENCIJALNE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM SISTEMIMA101



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2019

14 - 15. novembar, Banja Luka

Sesija A

Sesija A

Darija Gajić, Slobodan Peulić i Milica Malešević

MOGUĆNOSTI ENERGETSKOG UNAPREĐENJA VERTIKALNOG NEPROVIDNOG OMOTAČA U ZAVISNOSTI OD STEPENA ZAŠTITE ZGRADE2

Darija Gajić, Biljana Antunović i Diana Stupar

UNAPREĐENJE PODA NA TLU POSTOJEĆE ZGRADE U BANJOJ LUCI SAVREMENIM TOPLOTNO IZOLACIONIM MATERIJALOM8

Siniša Vučenović, Jovan Šetrajčić i Stevo Jaćimovski

NOVI TERMoeLEKTRICI U FUNKCIJI PRIGUŠENJA TOPLOTNOG RASIPANJA14

Milan Pupčević, Petar Gvero i Milovan Kotur

ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI SISTEMA GRIJANJA OBJEKTA U FUNKCIJI ADMINISTRATIVNOG CENTRA18

Mogućnosti energetske unapređenja vertikalnog neprovidnog omotača u zavisnosti od stepena zaštite zgrade

Darija Gajić¹, Slobodan Peulić¹, Milica Malešević¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina
darija.gajic@aggf.unibl.org, slobodan.peulic@aggf.unibl.org, milica.malesevic@aggf.unibl.org

Sažetak—Iako zgrade pod zaštitom prema važećem Zakonu ne potpadaju pod energetske sertifikovanje postoje načini njihovog energetske unapređenja kako bi se obezbijedio ugodan komfor njihovim korisnicima, a s tim stvorile i značajne uštede energije. Rad će se baviti analizom jednog višeporodičnog stambenog reprezentativnog uzorka u centralnom gradskom jezgri – činovničkog paviljona, koji je zaštićen od strane Republičkog zavoda za zaštitu kulturno-istorijskog i prirodnog nasljeđa RS, kao dio ambijentalne cjeline, a čijim unapređenjem omotača je moguća ušteda potrebne toplotne energije oko 58%. Prateći parametre energetske karakteristika unapređenog omotača, prikazane su moguće varijante tehničkog rješenja unapređenja vertikalnog neprovidnog omotača (fasadnog zida), u skladu sa adekvatnim fizičkim karakteristikama savremenih materijala i uz poštovanje istorijskog integriteta zgrade.

Ključne riječi—savremeni materijali; unutrašnje toplotno izolovanje; potrebna energija za grijanje; graditeljsko nasljeđe Banjaluke.

I. UVOD

Graditeljski fond Bosne i Hercegovine izgrađen do 1945. godine čini okosnicu centralnih urbanih struktura, što je evidentno i na primjeru grada Banjaluka. Pojedini objekti koji su izgrađeni u centralnoj zoni Banja Luke, a potiču iz perioda austrougarske vladavine (1878-1918) i Kraljevine SHS/Jugoslavije (1918-1941) danas su kategorisani ili kao Nacionalni spomenici BiH, ili se nalaze pod nižim stepenom zaštite, kao zaštićene ambijentalne cjeline. Činjenica je i da su pojedini objekti iz tog perioda često mijenjali svoju prvobitnu namjenu, ali nikada te adaptacije i sanacije nisu praćene mjerama i analizama energetske efikasnosti. U vezi s tim, procjenjuje se da one danas sa aspekta potrošnje energije nisu „nevidljive“ (zanemarive), te nakon sprovednih naučno-istraživačkih projekata „Tipologija stambenih zgrada BiH“ [1] i „Tipologija javnih zgrada BiH“ [2] došlo se do saznanja da je neophodno 332925 MWh potrebne energije za grijanje, odnosno oko 5% od ukupne potrebne energije za sve zgrade na urbanizovanom prostoru Bosne i Hercegovine. Iako zgrade pod zaštitom prema važećem Zakonu [3] ne potpadaju pod energetske sertifikovanje, te samim tim ni u poduzimanje energetske mjera obnove, postoje načini njihovog unapređenja kako bi se obezbijedio ugodan komfor njihovim korisnicima, a s tim stvorile i značajne uštede energije. Kako su za njihov opstanak neophodne kontinuirane obnove, u

prvom redu omotača, da bi se što duže očuvao njihov prvobitni izgled, neophodno je sagledati sve prepreke za njegovu obnovu, odnosno predložene mjere zaštite i tehnološko-ekonomski prihvatljive mogućnosti obnove. U radu se analizira jedan stambeni reprezentativni uzorak u centralnom gradskom jezgri, koji je zaštićen od strane Republičkog zavoda za zaštitu kulturno-istorijskog i prirodnog nasljeđa RS, kao dio ambijentalne cjeline, kako bi se ukazalo na moguća unapređenja omotača sa jasnim proračunskim spoljnim urbanističko-arhitektonskim parametrima koji utiču na omotač, te arhitektonsko-konstruktivnim parametrima samog omotača kao i nivoa potrebne energije za grijanje. Istraživanje je ukazalo da je moguća ušteda potrebne toplotne energije kod ovakvih tipova zgrada za oko 58%.

II. ZNAČAJ ČINOVNIČKIH PAVILJONA KAO NASLJEĐENE AMBIJENTALNE CJELINE

A. Činovnički paviljoni kao ambijentalna cjelina

Višedecenijska austrougarska uprava u Bosni i Hercegovini je, bez sumnje, pokrenula mnoge modernizacijske procese, koji su prvo obuhvatili infrastrukturne i graditeljske poduhvate, da bi ubrzo bili ostvareni pomaci i u ekonomskim, obrazovnim i kulturnim djelatnostima. Promjene koje su tada nastale u svim sferama života, značajno su uticale na transformaciju fizionomije i strukture bosanskohercegovačkih gradova. Banja Luka je u tom periodu doživjela značajne promjene, koje su se možda najviše odrazile na urbanističku matricu grada, jer se tada zvanično prekida sa orijentalnim konceptom strukture grada podijeljenog na mahale i čaršije, te prvi put u svojoj istoriji Banja Luka dobija ortogonalnu uličnu mrežu i moderne široke saobraćajnice sa drvoredima, po uzoru na mnoge evropske gradove. U periodu od 1882-1885. godine 17 km banjalučkih saobraćajnica je dobilo drvorede koje su formirali već odrasla stabala kestena i lipe dopremljenih sa Kozare. Prilikom ovog poduhvata prioritet je dat Vrbas-aleji (danas Aleja Sv. Save) u odnosu na glavnu tadašnju komunikaciju „Carski drum“. Vrbas-aleja je povezivala prvi objekat koji je austrougarska vlast izgradila u Banja Luci - zgradu Vojne komande - *Carsku kuću* (današnji Arhiv Republike Srpske) i nekadašnju vojnu kasarnu „Vrbas“, u kojoj je danas smješten Univerzitetski kampus. To je bila prva značajnija transverzala koja je presijecala Carski drum, a koja

će svoju graditeljsku ekspanziju doživjeti tek u doba Kraljevine Jugoslavije, „Sl. 1“.

Nakon perioda stagnacije graditeljskih aktivnosti, izazvane prvenstveno zbog teških ratnih i poslijeratnih godina [4], uslijediće period intenzivne gradnje centralnog dijela Banja Luke, jer u tom periodu grad postaje sjedište Vrbasko-banovine. Kao novi upravni centar, Banja Luka dobija svoja prva reprezentativna administrativna sjedišta u kojima će svoju dužnost obavljati veliki broj novopridošlih činovnika.



Sl.1. Nekadašnja *Vrbas-aleja*, danas Aleja Sv. Save (slika lijevo) i činovnički paviljoni u Vrbas-aleji (slika desno). Izvor: arhivska građa Arhiva Republike Srpske

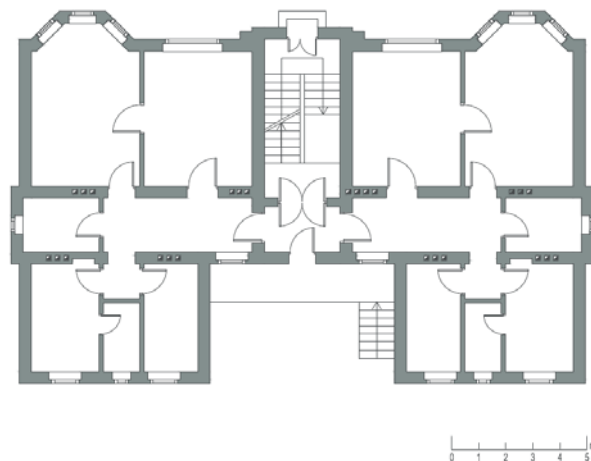
Naime, s obzirom da postojeći stambeni fond nije bio dovoljan da primi toliki broj činovnika koji su po dužnosti morali preseliti u Banja Luku sa svojim porodicama, bilo je neophodno hitno stambeno zbrinuti značajan broj novih stanovnika. Tako su 30-ih godina prošlog vijeka, u Banja Luci izgrađeni tzv. *činovnički paviljoni*, ukupno njih sedam, sa 52 stana dosta sličnih prostornih struktura. Šest od pomenutih sedam je izgrađeno u tadašnjoj *Vrbas-aleji*, sa uređenim pristupnim saobraćajnicama i drvoredom, te regulacijom zbog koje i danas čine prepoznatljiv ambijent, „Sl.1“. Sedmi, najreprezentativniji paviljon, izgrađen je uz *Carski drum* u neposrednoj blizini banovinske uprave i dvora i bio je namijenjen visokim službenicima Banovine.

Kompleks od šest višeporodičnih stambenih zgrada projektovao je Edgard Kobencel, mladi arhitekt banovinskog Tehničkog odjeljenja, 1928. godine, da bi objekti bili izvedeni do kraja 1930. godine. Građeni su u masivnom konstruktivnom sklopu, kao objekti sa podrumom, visokim prizemljem i dvije etaže, vrlo svedenih oblikovnih karakteristika, na kojima su umjesto dekorativne plastike primijenjeni jedino krunski vijenci kao određena vrsta fasadnog ornamenta. I pored tako jednostavne prostorne i oblikovne koncepcije, ovi objekti su u to vrijeme predstavljali snažan „modernizirajući“ otklon od dotadašnje prakse stambene izgradnje u Banja Luci. Zbog svoje značajne očuvanosti u izvornom stanju, te zbog posebnog ambijenta koji čini u urbanističkom smislu, ovaj ansambl je prilikom valorizacije od strane Republičkog zavoda za zaštitu kulturno-istorijskog i prirodnog nasljeđa Republike Srpske vrednovan kao zaštićena ambijentalna cjelina. Predložene su tehničke mjere zaštite u vidu restauracije i sanacije u postojećim gabaritima, o čemu će više biti riječi u daljem tekstu ovog rada. S obzirom da su ovi objekti tokom vremena u većoj mjeri zadržali svoju stambenu namjenu (u manjoj mjeri su

određene stambene jedinice adaptirane u poslovne prostore), pitanje poboljšanja komfora stanovanja, svakako se dotiče i pitanja obnove spoljašnjeg omotača a koji će zadovoljiti i propisane tehničke mjere zaštite.

B. Urbanističko-arhitektonske karakteristike činovničkih paviljona

Stambena slobodnostojeća zgrada je razučene osnove, sa složenim kosim krovom. Spratnost joj je Po+P+2 (4 etaže). Karakteriše je masivni konstruktivni sistem, „Sl. 2“. Konstruktivni zidovi od pune opeke, debljine 45 cm, obostrano su omalterisani i zidovi imaju samo horizontalne armirano-betonske serklaže. Međuspratne konstrukcije su izvedene kao armirano-betonske sitnorebraste tavanice, ali se javlja i puna armirano-betonska tavanica, na pozicijama iznad podrumskog prostora. U ovom periodu u omotaču nema toplotne izolacije. Prozori i balkonska vrata su dvostruka drvena razmaknuta krila sa običnim jednostrukim staklima. Zgrade imaju negrijane prostore stepeništa, tavana i podrumске prostore. Podrumski prostori su poluukopani. Krov je kosi, viševodni, prati razučenu osnovu sa drvenom klasičnom konstrukcijom sa pokrivačem od biber crijeva.



Sl.2. Osnova činovničkog paviljona. Izvor: [1].

Ovakva konstrukcija i materijalizacija omotača, u skladu sa periodom gradnje, tadašnjim materijalima i tehnologijom gradnje, na prirodan način je razrješavala današnje probleme vezane za toplotno-fizičke karakteristike zgrade, što je u potpunosti preuzela od austrougarskih graditelja. Svojom organizacijom prostora, odnosno toplotnim zoniranjem (grijani i negrijani prostori) sprečavani su veći toplotni gubici u krovu. Pojava dvostrukih razmaknutih krila koja imaju dva obična jednostruka stakla, takođe su umanjila toplotne gubitke i infiltraciju vazduha kroz omotač, za razliku od prethodnih jednostrukih krila. Poluukopani podrum je razrješavao probleme sa pojavom i zadržavanjem vlage, jer se preko otvora u podrumskim etažama omogućavalo vjetrenje i s tim isušivanje vlage. Debljinom zidova omogućavala se akumulacija toplote u zimskom periodu i uticaj vode i vlage sa vanjske strane omotača vremenom bi se isušivao, dok bi vođena para iz unutrašnjih prostora slobodno prolazila kroz zid i odlazila u atmosferu – potpuna paropropusnost. Površina prozora u odnosu na fasadni zid i podne površine prostora, kao

i debljina zidova, dimenzionisani su tako da su sprečavali da se u ljetnom periodu pregrijava unutrašnji prostor. Danas, ovakva pojava konstrukcije i materijalizacije omotača nije racionalna za energetske efikasnost i podrazumijeva toplotno i energetske unapređenje.

III. POTREBNA TOPLOTNA ENERGIJA PRIJE I NAKON MJERA ZA UNAPREĐENJE OMOTAČA ČINOVNIČKOG PAVILJONA

A. Postojeće stanje – projektni parametri i termogrami

Činovnički paviljoni su projektovani na način da su grijani prostori samo oni namijenjeni stanovanju, dok su negrijani prostori: stepenišni, podrumski i tavanški. Ukupna neto grijana površina zgrade je 492,30 m². Ukupna bruto površina – površina prema spoljašnjim dimenzijama 542 m². Projektna unutrašnja temperatura vazduha 20°C. Zgrada ima umjereno zaklonjen položaj u odnosu na dominantan sjeverozapadni vjetar i više od jednog fasadnog zida je izloženo vjetru. Konstruktivni sistem zgrade je masivni sa klasično zidanom gradnjom od pune opeke. Izloženi omotač dominantno posjeduje zid od pune opeke d = 45 cm obostrano omalterisani produžnim krečnim malterom d = 3 cm, ukupne debljine 51 cm sa projektnom vrijednosti U = 1.06 W/m²K.

Međuspratna konstrukcija prema negrijanom podrumu je AB ploča d = 15 cm, odnosno svi slojevi odozgo na dole, redom: parket, daščani pod, potpatosnice u pijesku, armirano betonska ploča, produžni krečni malter, sa procjenjenom projektnom vrijednosti U = 1.23 W/m²K. Tavanica prema negrijanom tavanu je sitnorebrasta AB ploča d = 35 cm i slojevitost materijala odozgo na dole, redom: pijesak, blato sa pljevom, sitnorebrasta AB tavanica i malter na trski, ukazuje na U = 1.22 W/m²K.

Prozori na zgradi su izvedeni kao dvostruko postavljena krila sa širokom kutijom koji imaju drvene okvire ostakljene jednostrukim staklom od 3 mm. Projektna vrijednost za takve prozore iznosila bi oko U = 3.20 W/m²K. Vremenom, zbog propadanja zaptivnog materijala između stakla i okvira, došlo je do povećanja toplotnih gubitaka kroz prozore, što je pokazao i termogram.

Termovizijsko snimanje zgrade ne može izmjeriti vrijednost U-koeficijenta, ali je značajno da se prema temperaturnom gradijentu uvide dominantni toplotni gubici na omotaču. Takođe, ako na projektnoj dokumentaciji nije jasna slojevitost omotača, ili su se vremenom desile izmjene na omotaču, preko infracrvenog snimka pregledom zgrade možemo sagledati promjene. Kod predmetnog činovničkog paviljona snimanje je izvršeno 10.03.2016. godine ujutro u periodu od 06:50 do 07:10 sati. Snimanje izvršeno pri slijedećim uslovima:

- unutrašnja temperatura vazduha u zgradi 20°C, relativna vlažnost vazduha 42%
- spoljašnja temperatura vazduha 6°C, relativna vlažnost vazduha 90%, parcijalni pritisak vodene pare 1010 Pa, brzina vjeta 2 m/s – sjevernog pravca. oblačno
- koeficijent emisivnosti 0,86

Termogrami na „Sl. 3“ ukazuju da stambena zgrada zbog nepostojanja termoizolacije ima ravnomjerne toplotne gubitke na cijelom omotaču, ali da su veći toplotni gubici na poziciji armirano betonskih horizontalnih serklaža i natprozornika. Vidno je da su najveći površinski toplotni gubici u poziciji svih otvora, a najveći kod balkonskih vrata na posljednjoj etaži, te kod međuspratne konstrukcije ispod tavaniskog negrijanog prostora. Gradacija temperature od najniže na prizemlju do najviše na posljednjoj etaži može ukazivati i na neuravnoteženu unutrašnju temperaturu u stanovima.



Sl.3. Termogrami činovničkog paviljona. Izvor: dokumentacija naučno-istraživačkog projekta „Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine“

B. Usporedna analiza potrebne toplotne energije prije i nakon unapređenja omotača

Analiza unapređenja omotača činovničkog paviljona vođena je Pravilnikom o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada u Republici Srpskoj. Pri tome su korišteni parametri prije i nakon mogućeg unapređenja koji se mogu sagledati u „TABELA I“. Toplotno zoniranje zgrade (grijani/negrijani prostori) su i prije i nakon mjera unapređenja omotača, tretirani kao u postojećem stanju.

Usporedna analiza prije i nakon unapređenja omotača prema minimalnim zahtjevima za dostizanjem U-koeficijenta elemenata omotača (dodavanjem toplotne izolacije), izmjenu g-koeficijenta na zastakljenjima prozora (zamjenom prozora) i poboljšanjem zaptivenosti omotača, a s tim i izmjena parametra infiltracije vazduha, ukazuju na 58% nižu potrebnu energiju za grijanje, odnosno sa 308.50 kWh/m² potrebna energija za grijanje bi iznosila 128.50 kWh/m². S obzirom da je u pravilnicima propisano da bi zgrade nakon unapređenja morale dostići „C“ razred, što predstavlja zahtjev ≤ 60 kWh/m², može se zaključiti da za ovakve vrste zgrada ili nije adekvatno postavljena vrijednost dopuštene potrebne energije za grijanje ili nije dovoljno samo unaprijediti omotač. Iz tog razloga trebalo bi razmotriti i izmjenu toplotnih zona (zbog unapređenja omotača i razrješavanja tehničkih detalja), odnosno, razmotriti varijantu u kojoj se stepenišni prostor tretira kao grijani, čime se poboljšava faktor oblika zgrade, te se može očekivati niža energija potrebna za grijanje.

TABELA I. UPOREDNA ANALIZA PRIJE I NAKON UNAPREĐENJA OMOTAČA ČINOVNIČKOG PAVILJONA U BANJOJ LUCI

PERIOD		1930	
GRIJANA POVRŠINA		492,30 m ²	
BROJ SPRATOVA		Po+P+2	
GRIJANI VOLUMEN		1600 m ³	
Toplotni kapacitet	Wh/m ² a	72	
Metabolička toplota	W/m ²	1.80	1.80
		PRIJE	NAKON
U-koef. ZIDOVI	W/m ² K	1.06	0.30
U-koef. PROZORI	W/m ² K	3.20	1.60
U-koef. KROV	W/m ² K	1.23	0.30
U-koef. POD	W/m ² K	1.22	0.30
g-koef.	-	0.75	0.61
A/V odnos- faktor oblika	-	0.59	0.59
Infiltracija/izmjena vazduha	h^{-1}	0.90	0.50
		projektna	projektna
Unutrašnja temperatura	°C	20.0	20.0
Doprinos od ventilacije	kWh/m ² a	0.00	
Doprinos od korisnika	kWh/m ² a	4.58	
Rasvjeta i razni uređaji/električna energija	kWh/m ² a	17.42	
POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE	kWh/m ² a	308.50	128.50

IV. MOGUĆNOSTI ENERGETSKOG UNAPREĐENJA VERTIKALNOG NEPROVIDNOG OMOTAČA ČINOVNIČKOG PAVILJONA

A. Principi toplotnog izolovanja omotača u zavisnosti od stepena zaštite zgrade

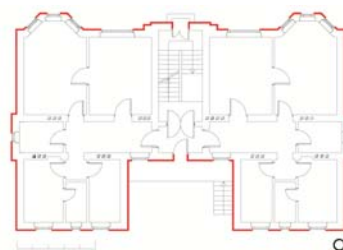
Primjena standardnih rješenja kontaktnih fasada sa spoljašnje strane vertikalnog omotača zgrade ponekad može biti otežana usljed potrebe za energetsom obnovom zgrade pod zaštitom i potrebe da se sačuva njihov autohtoni izgled. U ovim slučajevima primjena toplotne izolacije sa unutrašnje strane omotača se pokazuje kao neophodan sistem koji se mora pravilno projektovati i izvesti.

U zavisnosti od stepena zaštite zgrade, dijela zgrade ili ambijentalne cjeline moguće je definisati principe sanacije omotača i njegove energetske optimizacije. Pri definisanju ovih principa neophodno je sačuvati integritet omotača – njegovu strukturalnost, raspored primarnih masa, ritam otvora, elemente sekundarne i dekorativne plastike, te boju omotača. Tehničko-konstruktivni detalji moraju spriječiti potencijalnu pojavu kondenza, vlage i plijesni, orošavanje kontaktnih slojeva između toplotne izolacije i postojećeg zida i promjene na završnom sloju fasadnog omotača.

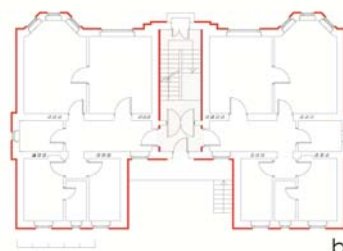
Rad analizira Činovnički paviljon u Banjaluci čije su tehničke mjere zaštite propisane od strane Republičkog zavoda, u vidu restauracije i sanacije u postojećim gabaritima, te se iz tog razloga predlažu potencijalne opcije energetskog unapređenja omotača u skladu sa predviđenim mjerama zaštite i toplotnim zoniranjem prostora unutar zgrade. Zgrada će biti analizirana kao da je pod punom zaštitom, djelimičnom zaštitom – samo glavno pročelje orijentisano ka ulici i da nije zaštićena. S tim u

vezi, definisana su četiri principa energetske optimizacije omotača i 4 zone postavljanja toplotne izolacije:

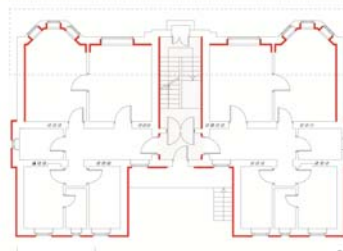
- sa spoljašnje strane fasadnih zidova (cijeli unutrašnji prostor zgrade se tretira kao grijani i da zgrada nije pod zaštitom)
- sa spoljašnje strane fasadnih zidova i na stepenišnom zidu između grijanog i negrijanog prostora stubišta (stepenišni prostor zgrade se tretira kao negrijani prostor i zgrada nije pod zaštitom)
- sa unutrašnje strane pročelja orijentisanog ka ulici, na stepenišnom zidu između grijanog i negrijanog prostora stubišta (stepenišni prostor zgrade se tretira kao negrijani) i sa spoljašnje strane ostalih fasadnih zidova (djelimična zaštita)
- sa unutrašnje strane svih fasadnih zidova i na prelazu između grijanog i na stepenišnom zidu između grijanog i negrijanog prostora stubišta (stepenišni prostor zgrade se tretira kao negrijani prostor a zgrada je pod punom zaštitom)



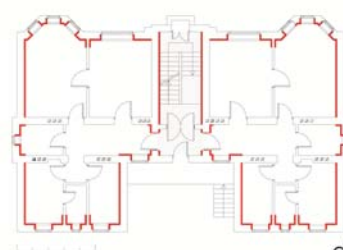
a



b



c



d

SI.4. Uputni prikaz potencijalnih mjesta postavljanja toplotne izolacije.
Izvor: Ilustracija autora.

Izazovi za postizanjem energetski efikasnih zgrada i unutrašnjeg toplotnog komforta unutar kulturnih i historijskih zgrada postaju izraženiji. Stambene zgrade pod zaštitom se uglavnom odlikuju masivnim konstruktivnim elementima i usitnjenom organizacijom stambenog prostora zbog čega je primjena sistema toplotne izolacije u unutrašnjosti predmet analize brojnih istraživanja koja za cilj imaju prijedlog potencijalnih rješenja za postizanje toplotnog komforta uz minimalne prostorne izmjene u unutrašnjosti.

B. Fizičke karakteristike materijala za unutrašnje toplotno izolovanje omotača

Materijali koji se postavljaju sa unutrašnje strane zidova „TABELA II”, direktno utiču na unutrašnji komfor, sigurnost i zdravlje korisnika, stoga bi trebali ispuniti sljedeće karakteristike:

a) *nizak koeficijent toplotne provodljivosti kako bi se omogućila primjena manjih debljina ovih slojeva usljed potrebe za obezbjeđenjem maksimalne korisne površine prostora,*

b) *visoka vatrootpornost ili kombinacija sa zaštitnim premazima i/ ili oblogama,*

c) *spособnost za upravljanje difuzijom vodene pare – paropropusnost, paronepropusnost ili kapilarni aktivni izolacioni sistemi*

TABELA II. KARAKTERISTIKE SAVREMENIH MATERIJALA ZA UNUTRAŠNJE IZOLOVANJE OMOTAČA ZGRADA. [5] [6] [7] [9]

Vrsta Izolacije	Koeficijent toplotne provodljivosti	Faktor otpora difuzije vodene pare	Klasa vatrootpornosti	Forma proizvoda
Kalcijum-silikati	0,042 [7] - 0,070	2/20	A1-A2	ploče
Čelijasto staklo	0,040-0,050	1/2	A1-B1	Ploče
Transparentne toplotne izolacije	0,02-0,01	∞	B2-D	paneli
Vakuum izolacioni paneli	0,004-0,006	∞	B2-D	paneli
Kapilarno aktivne izolacije	0,031	27 [5]	B2 [5]	paneli

Prema „TABELA II” može se napraviti uporedna analiza toplotnih karakteristika određenih materijala primjenjivih za unutrašnje izolovanje omotača. Uočljivo je da savremeni materijali poput transparentnih izolacija i vakuum izolacionih panela imaju vrlo niske koeficijente toplotne provodljivosti i smatraju se praktično potpuno paronepropusnim materijalima, ali pripadaju najnižim klasama vatrootpornosti (B2-D) [6] zbog čega je neophodna zaštita u vidu drugih, teško gorivih obloga te neophodnom potkonstrukcijom za postavljanje ovih obloga. Za razliku od navedenih savremenih materijala, kalcijum silikatne ploče odlikuju viši koeficijenti toplotne provodljivosti što rezultuje većim debljinama izolacije u unutrašnjosti, no kako pripadaju kategoriji teško gorivih

materijala (A1) [6] [7] ne zahtijevaju posebne zaštitne obloge s čime se debljina ukupnog sloja termičke zaštite izjednačava sa prethodnim tipom izolacija, te se proces postavljanja pojednostavljuje i ubrzava.

Jedan od osnovnih izazova pri unutrašnjem toplotnom izolovanju je rješavanje problema pojave vlage u zidu, mogućnost akumulacije toplote u zidu i postizanje otpornosti na dejstvo požara. Osim toga, relativna vlažnost vazduha u unutrašnjem prostoru zgrade (RH – relative humidity) i periodi isušivanja, takođe predstavljaju parametre od kojih zavisi tehničko rješenje i materijalizacija takvog načina izolovanja.

Paropropusne toplotne izolacije najbrže reflektuju na RH faktor unutrašnjeg prostora (u poređenju sa paronepropusnim toplotnim izolacijama) te da su one pogodne za vlažne prostore uz obavezne vremenske periode isušivanja zidova. [8] Neadekvatno rješenje toplotni mostovi, pogrešna postavka i materijalizacija toplotne izolacije, te pojava vodene pare u unutrašnjim prostorima zgrade, stvorice kondenzaciju na granici između toplotne izolacije i postojećeg zida, koje će biti zarobljena, što će na kraju prouzrokovati pojavu plijesni u unutrašnjosti zidova. U zavisnosti od navedenih problema, danas postoje tri grupe savremenih materijala, koje zahtijevaju različite načine tehničkog rješavanja. Nekadašnje toplotne izolacije su zahtijevale da se projektuju sa parnim branama na unutrašnjoj strani, prema grijanoj strani prostora. Danas, savremeni materijali na tri načina razrješavaju problem difuzije vodene pare, te se tako i grupišu. Prva grupa materijala su paropropusni (kalcijum-silikati i čelijasto staklo), kod kojih se vodena para iz unutrašnjeg prostora akumulira u izolaciji, po principu akumulacije kod postojećih zidova, te zahtijevaju mogućnosti isušivanja tokom dozvoljenih propisanih perioda. Druga grupa materijala su toplotno izolacioni materijali koji se ponašaju kao same parne brane (transparentne toplotne izolacije i vakuum izolacioni paneli), te ne dopuštaju prolaz i akumulaciju vodene pare. Treća grupa toplotnih izolacija su kapilarno aktivne toplotne izolacije, koje su otvorene difuziji vodene pare, propuštaju paru do postojećeg zida, ali uz pomoć kapilarne strukture imaju mogućnost isušivanja stvorene vlage. Ipak interakcija kapilarno aktivnih izolacionih sistema sa postojećim konstruktivnim elementima nije dovoljno istražena i generalna pravila za rješavanje dodirnih dijelova različitih komponenti ne postoje, kao ni smjernice za rješavanje toplotnih mostova, zbog kompleksnih fizičkih procesa koji se dešavaju unutar konstrukcije. [9]

Zbog neistraženosti treće grupe materijala (kapilarno aktivni izolacioni sistemi) razmatreni su samo paropropusni materijali (kalcijum-silikatne toplotne izolacije i čelijasto staklo) i paronepropusni materijali (transparentne toplotne izolacije i vakuum izolacioni paneli).

Sa aspekta otpornosti difuziji vodene pare, pomenuta dva tipa materijala, paropropusni i paronepropusni, se ponašaju različito. Vakuum izolacioni paneli i transparentne izolacije se ponašaju kao barijere, odnosno parne brane čime dobro zaptivaju unutrašnji prostor dok drugi tip (kalcijum silikati) materijala omogućuje paropropusnost, ali i akumulaciju vodene pare u samom materijalu. Oba sistema se pokazuju kao

efikasni i ne dolazi do značajne pojave kondenza u kontaktu s postojećom konstrukcijom, ali sistemi poput kalcijum-silikatnih ploča pružaju prirodnu regulaciju relativne vlažnosti (RH faktor), čime se stvara ugodniji unutrašnji komfor.

Primjena toplotne izolacije sa unutrašnje strane omotača oduzima korisnu površinu unutrašnjeg prostora, što je naročito značajno kod stambenih zgrada, te inovativni materijali i proizvodi poput vakuum izolacionih panela (VIP) [6] postaju predmet istraživanja zbog njihovog velikog potencijala koji omogućuje značajne uštede u zatvorenom prostoru u poređenju sa ostalim materijalima (kalcijum-silikatima, čelijskim staklom, pa i transparentnim izolacijama). Pojedina istraživanja dokazuju da primjena VIP materijala u debljini od 12 mm može dovesti do povećanja unutrašnje temperature za oko 1,4° i umanjiti vrijednost U-koeficijenta za 37%. [10]

V. ZAKLJUČAK

Smanjenje potrebne energije za grijanje kod stambenih zgrada iz perioda od austrougarske do 1945. godine, prateći zahtjeve za unapređenjem omotača zgrade prema važećem Pravilniku u Republici Srpskoj, moguće je do 60%. U Bosni i Hercegovini obnova zgrada na navedeni način smanjila bi ukupnu potrebnu energiju za grijanje takvih zgrada za 200000 MWh. Pošto su često zgrade iz tog perioda pod zaštitom, u radu su predstavljeni mogući načini unapređenja vertikalnog neprovidnog omotača, što u budućnosti doprinosi pojašnjavanju tehničkih mjera kao odgovor na složene fizičke procese unutar konstruktivnih elemenata. Svi korisnici zgrada imaju pravo na ugodan toplotni komfor, što se kod postojećih zgrada obezbjeđuje energetske unapređenjem omotača. Unapređenje omotača je moguće i kod zgrada pod zaštitom samo se mora obratiti pažnja na tehničke detalje i primjenjene materijale. Paronepropusni materijali primjenjeni na unutrašnjim zidovima zahtijevaju kontrolisano ventilisanje prostora, jer dovode do potpune zaptivenosti unutrašnjeg prostora, ali njihova pojava omogućila je da se značajno ne smanjuje unutrašnji prostor. Dok se kod paropropusnih materijala difuzija vodene pare slobodno kreće unutar zida, ali zauzima 5 puta više prostora od prethodno navedenih (min. 10 cm paropropusni materijali – kalcijum-silikat, u odnosu na max. 2 cm paronepropusnih materijala – Vakuum izolacioni paneli i sl.). Pored iznesenog doprinosa, ovaj rad je i podloga za buduća istraživanja koja će se baviti providnim elementima omotača zgrade, horizontalnim neprovidnim elementima, detaljima rješavanja termičkih mostova usljed unutrašnjeg toplotnog izolovanja i daljim istraživanjem savremenih materijala namjenjenih unutrašnjem toplotnom izolovanju.

LITERATURA

- [1] Arnautović-Aksić D., Burazor M., Delalić N., Gajić D., Gvero P., Kadrić Dž., Kotur M., Salihović E., Todorović D. i Zagora N.,

„Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine“, Sarajevo: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2016.

- [2] M. Nišandžić, Tipologija javnih zgrada Bosne i Hercegovine, UNDP BIH (2017), pp. 29-31. [Na mreži]. Dostupno: https://issuu.com/unitednations_bih/docs/tipologija_javnih_zgrada_u_bo_sni_i [Poslednji pristup 13 9 2019].
- [3] Zakon o uređenju prostora i građenju Republike Srpske, Sl. gl. 40/13
- [4] Đ. Mikić., Banja Luka: kultura građanskog društva. Banjaluka: Institut za istoriju, 2004
- [5] Remmers, „Technical Data Sheet - iQ-Therm 30 / 50 / 80 - Capillary-active, rigid PUR foam panels for the construction of highly thermal insulating, diffusion-open, interior insulation with capillary transport of moisture,“ [Na mreži]. Dostupno: http://www.remmers.co.uk/fileadmin/doc/tm/TM1_0241_EN.pdf. [Poslednji pristup 16 9 2019].
- [6] M. Hegger, V. Auch-Schwelk, M. Fuchs i T. Rosenkranz, Construction Materials Manual, Munich, Germany: Birkhäuser Edition Detail, 2006.
- [7] M. -. d. leaflet, „Multipor flat roof insulation,“ [Na mreži]. Dostupno: <https://www.multipor.com/multipor-flat-roof-insulation.php>. [Poslednji pristup 16 9 2019].
- [8] R. Walker i S. Pavia, „Thermal and moisture monitoring of an internally insulated historic brick wall,“ *Building and Environment* 133, 2018.
- [9] SHC TASK 47: renovation of nonresidential buildings towards sustainable standards; SUBTASK C: assessment of technical solution and operational management in case studies, Sandvika, Norway; Freiburg, Germany: Solar Heating and Cooling programe - International Energy Agency, 2015.
- [10] S. Fantucci, E. Fenoglio, G. Grosso, V. Serra, M. Perino, V. Marino i M. Dutto, „Development of an aerogel-based thermal coating for the energy retrofit and the prevention of condensation risk in existing buildings,“ *Science and Technology for the Built Environment*, 2019.

ABSTRACT

Although the protected buildings do not fall under energy certification of the current law, there are ways to upgrade them to provide comfort for their users, and thus create significant energy savings. The paper deals with the analysis of multi-family residential example in the central city area - the Officials pavilion, that is protected by the Republic Institute for the Protection of the Cultural, Historical and Natural Heritage of the RS, as part of the ambient whole, whose improvement of the envelope can save about 58% of the required heat energy. Following the parameters of the energy characteristics, possible variants of the technical solution for the improvement of the vertical non transparent envelope (facade wall) are presented, in accordance with the adequate physical characteristics of contemporary materials and with approach to keep the historical integrity of the building.

ENERGY RENEWAL POSSIBILITIES OF THE VERTICAL NON-TRANSPARENT BUILDING ENVELOPE ACCORDING TO THE LEVEL OF THE HERITAGE PROTECTION

Darija Gajić, Slobodan Peulić, Milica Malešević

Unapređenje poda na tlu postojeće zgrade u Banjoj Luci savremenim toplotno izolacionim materijalom

Darija Gajić¹, Biljana Antunović¹, Diana Stupar¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
darija.gajic@aggf.unibl.org, biljana.antunovic@aggf.unibl.org, diana.stupar@aggf.unibl.org

Sažetak — U radu su analizirana mjerenja vršena u decembru 2015. godine, a proračunom toplotnih karakteristika omotača predložene su mogućnosti njihovog energetskog unapređenja u skladu sa Pravilnikom o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada Republike Srpske, koji je na snazi od 2016. godine. Poseban osvrt je dat na prikaz tehničkih detalja unapređenja poda na tlu primjenjujući savremene toplotne izolacione materijale EPS, XPS i VIP.

Ključne riječi—EPS, XPS, VIP, tehnički detalji omotača, energetske karakteristike zgrada

I. UVOD

Obnova postojećih javnih zgrada sa aspekta energetske optimizacije zasniva se na strategijama i konceptima održivog razvoja, ako već isti nisu spovedeni kroz zakonske propise. Donošenju legislativa o energetske efikasnosti u zgradarstvu na područje Republike Srpske, a i područje Bosne i Hercegovine, prethodili su zahtjevi iz Direktiva EU o energetskim performansama zgrada. Kontinuirana istraživanja na Univerzitetu u Banjoj Luci (Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet i Mašinski fakultet) pokazuju da nije adekvatno preuzimati podatke i parametre iz standarda EU, jer svaka zemlja ima svoje osobenosti.

U zavisnosti od toga u koje se svrhe radi audit/pregled zgrada: u svrhu energetske certifikacije zgrade ili stvarne uštede energije (za postojeću zgradu), certifikovani auditor vrši procjenu koliko će biti detaljni ili pojednostavljeni parametri za proračun $Q_{H,nd}$ – godišnje potrebne toplotne energije za grijanje – indikator energetske efikasnosti u zgradama (indikator za energetski certifikat) za područje Republike Srpske i Bosni i Hercegovini. U svrhu energetskog certificiranja zgrada, pravilnici zahtijevaju da se minimalne procijenjene energetske karakteristike zgrada baziraju na vrijednostima iz projektne dokumentacije zgrade. Kod detaljnih energetskih audita, kada investitor želi prikaz stvarne potrošnje energije, te uopšte moguće tehničke mjere na uštedi energije, neophodno je da auditor svojom kompetentnošću odluči da li će se vršiti mjerenja i analize na omotaču zgrade, unutrašnje temperature u zgradi i potrošnje energije. Ako zgrada ne posjeduje mjerače potrošnje energije neophodno je da se mjerenja vrše i na ostalim tehničkim sistemima unutar zgrade (procjene efikasnosti sistema). Gore navedeni pravilnici, koji su na snazi, ne zahtijevaju da se kod postojećih zgrada u svrhu energetskog certificiranja moraju vršiti mjerenja. Istraživanja autora [1], [2], [3], [4] ukazuju da se

pravilnici moraju unaprijediti i da se za postojeće zgrade moraju uvesti obavezna mjerenja na omotaču zgrade.

Nakon donošenja legislative u oblasti energetske efikasnosti u zgradama, sprovedena su istraživanja i objavljena dva dokumenta Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine [5] i Tipologija javnih zgrada Bosne i Hercegovine [6], gdje je prikazana potrebna energija za grijanje (trenutni indikator energetske efikasnosti u Bosni i Hercegovini) postojećeg građevinskog fonda, kroz njegovu strukturu prema periodu izgradnje i vrsti zgrada. Osim ukupnih podataka za Bosnu i Hercegovinu, prikazani su i podaci po entitetima Bosne i Hercegovine.

Prema podacima iz navedenih Tipologija u Bosni i Hercegovini ima ukupno 861.965 stambenih i 7.600 javnih zgrada. Od tog broja Republici Srpskoj pripada 331.589 stambenih zgrada sa 39.846.631 m² korisne površine za grijanje i 2.908 javnih zgrada sa ukupnom korisnom površinom za grijanje od 3.614.839 m². Podaci pokazuju da je u Republici Srpskoj 0,89% javnih zgrada dok prema ukupnoj korisnoj površini za grijanje javnim zgradama pripada 8,32%. Na osnovu procjena iz objavljenih podataka u Tipologijama potrebna energija za grijanje svih zgrada u Republici Srpskoj je 8.427.652 MWh, od čega 7.729.138 MWh pripada stambenim zgradama, a 698.514 MWh javnim zgradama. Prema istraživanjima objavljenim u Tipologiji javnih zgrada, za sva obdaništa/vrtiće u Republici Srpskoj potrebna energija za grijanje je 10.914 MWh, odnosno 1,56% od ukupne potrebne energije namijenjene javnim zgradama. U radu je predstavljeno koliko je moguće smanjenje potrebne energije za grijanje pri obnovi cjelokupnog omotača karakterističnog uzorka postojećeg vrtića u Banjoj Luci za dostizanje minimalnih zahtjeva za energetskim karakteristikama zgrada prema važećem Pravilniku u Republici Srpskoj.

Rad pokazuje da je pojavom savremenih materijala postalo moguće energetsko unapređenje poda na tlu kao elementa omotača, koji do sad nije razmatran, jer je u Pravilniku u članu 34. navedeno, da se ne primjenjuje energetsko unapređenje na elementima konstrukcije „poda na tlu i plafonu prema negrijanom dijelu zgrade ili spoljašnjem prostoru, koji se obnavlja ili dograđuje samo na strani grijane prostorije“. Zbog toplotne ugodnosti korisnika vrtića, djece, koja provode više od 50% svoga boravka u vrtiću na podu, u radu je prikazano moguće rješenje energetskog unapređenja poda na tlu. Na konkretnom primjeru transmisijon gubici prema podu su oko 18.5% u odnosu na ukupne transmisijone gubitke cjelovitog omotača.

II. ZNAČAJ TOPLOTNOG OMOTAČA U ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI U ZGRADAMA

Značaj omotača kod zgrada, kod kojih je moguće prirodno ventilisanje i prirodno osvjjetljenje (sve vrste stambenih zgrada i pojedine vrste zgrada javne namjene – vrtići, škole), treba i dalje da se unapređuju indikatorom potrebne energije za grijanje, jer tada se i energetska optimizacija, kao i obnova postojećih zgrada može adekvatno sprovesti. Faktori koji utiču na energetska optimizaciju postojećih zgrada jesu važne strategije, koncepti i zakonski propisi. Zgrade su kompleksni sistemi i dijele se u više kategorija prema namjeni, načinu korištenja i energetske potrošnji, pa i njihova energetska analiza zahtijeva multidisciplinarni tim stručnjaka. Pred arhitekta, kao nosioca planiranja i projektovanja zgrada, postavlja se direktan problem kako energetska efikasnost postojećih zgrada izvesti na omotaču zgrade, ključnom elementu zgrade koji utiče na kvalitet klimatskih uslova unutrašnjeg prostora (toplotni komfor), zatim na obezbjeđivanje svježeg vazduha (vazdušni komfor), prirodnog osvjjetljenja (svjetlosni komfor) i zaštite od buke (zvukni komfor), te energetske bilans zgrade.

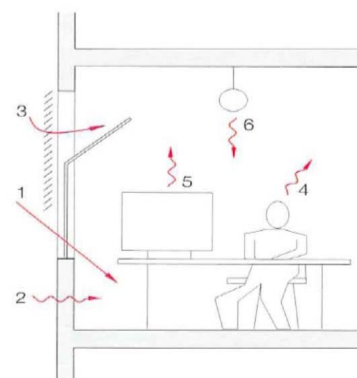
Brojni su zahtjevi postavljeni pred omotač zgrade „Sl. 1“, graničnu površinu u kojoj se odvijaju sve interakcije između spoljašnjih ambijentalnih uslova i unutrašnjeg prostora potrebnog korisnicima, koji provode više od 80% svoga života unutar izgrađenog prostora. Spoljašnji uticaji na omotač zgrade (uticaji specifični za lokaciju) su: sunčevo zračenje, temperatura, vlažnost, oborine i vjetar. Unutrašnji faktori koji utiču na omotač zgrade, odnosno osnovni zahtjevi koje omotač treba da obezbijedi unutrašnjem prostoru su: ugodna temperatura/vlažnost vazduha, količina i kvalitet svjetlosti, brzina izmjene vazduha/snabdjevanje svježim vazduhom, ugodno kretanje vazdušne mase i ugodan nivo zvuka.

SPOJAJŠNJI UTICAJI	OMOTAČ ZGRADE	UNUTRAŠNJI UTICAJI
SUNČEVA SVJETLOST	OSOBBINE	TOPILOTA
Intenzitet sunčevog zračenja	Transparentnost	Unutrašnja temperatura vazduha
Ugao sunčevog zračenja	Prozračnost	Prosječna temperatura okolnih površina
Osvjetljenost	Tamnoća	Temperatura okolnih površina
Topografija terena	Prolaz toplote	Temperatura dolaznog svježeg vazduha
Izgrađeno okruženje	Ukupan prolaz energije	Brzina dolaznog svježeg vazduha
Vegetacija	Težina	Unutrašnja vlažnost vazduha
VAZDUH	Zvučna apsorpcija	Vlažnost dolaznog svježeg vazduha
Temperatura vazduha	Toplotni kapacitet	Kretanje vazduha
Vlažnost	Difuzija vodene pare	AKUSTIKA/ZVUK
Brzina vazduha	FUNKCIJE ZAŠTITE	Nivo buke
Smjer vjetra	Vlaga	Obuhvat akustike
Kvalitet vazduha	Vjetar	Vrijeme povratnog zvuka
Zvuk	Toplotna zaštita zimi	VIZUELNOŠĆ
Atmosferske padavine	Toplotna zaštita ljeti	Direktno sunčevo zračenje
	Zaštita od sunca	Upadni ugao svjetlosti
ZEMLJA		Osvjetljenost
Temperatura zemlje	Zaštita od buke	Jačina svjetlosti
Tačka temperature rose	Privatnost	Kontrast, odbijesak
Toplotna masa zemlje	FUNKCIJE KOJE OBEZBIJEĐUJE	Faktor osvjjetljenosti
	Prirodno osvjjetljenje	Samostalnost svjetlosti
	Prirodna ventilacija	Izlaganje bojama okoline
	Vizure	Vizure
	Pasivni toplotni dobici	MIRIS
	Aktivni toplotni dobici	Brzina izmjene vazduha
	Proizvodnja električne energije	Kvalitet vazduha

Sl. 1. Omotač zgrade kroz uticajne faktore, osobine i funkcije, izvor: Hegger M., Fuchs M., Stark T., Zeumer M., *Energy Manual: sustainable architecture*, 2008., str.83

Omotač zgrade treba da: održava toplotu (danas i raznim pasivnim sistemima i da stvara toplotu), spriječi pregrijavanje prostora, decentralizuje ventilaciju i omogućiti korištenje dnevne svjetlosti.

Omotač zgrade u umjernih i hladnim klimatskim zonama mora garantovati zadovoljavajući unutrašnji toplotni komfor kada je spoljašnja temperatura veoma niska. Primarni cilj je obezbijediti toplotni komfor uz održavanje toplotnog bilansa kroz cijelu godinu koji je u specifičnom odnosu između toplotnih gubitaka (transmisionih i ventilacionih) i toplotnih dobitaka (aktivnim i pasivnim korištenjem solarnog zračenja i unutrašnji dobici od rasvjetnih tijela, ljudi-korisnika i električnih uređaja), „Sl. 2“.



Sl. 2. Spoljašnji uticaji kroz omotač zgrade zajedno sa unutrašnjim uticajima na unutrašnji komfor i toplotni bilans zgrade, izvor: Hegger M., Fuchs M., Stark T., Zeumer M., *Energy Manual: sustainable architecture*, 2008., str.96

Pri obezbjeđivanju toplotnog komfora u zimskom periodu unapređujući toplotne karakteristike omotača, elementi koji moraju biti u skladu, izuzimajući aktivno solarno dobijanje toplotne energije, su:

- optimizacija površine i geometrije omotača,
- toplotna izolacija neprovidnih komponenti omotača,
- toplotna izolacija transparentnih komponenti omotača,
- pasivno korišćenje solarnog zračenja,
- minimiziranje ventilacionih toplotnih gubitaka.

Nedostatak projektanata i stručnjaka iz oblasti energetske efikasnosti u zgradarstvu, pri određivanju parametara energetske efikasnosti u postojećim zgradama i uopšte poznavanja fizičkih procesa kroz omotač, dovodi do prepreka pri osmišljavanju adekvatne energetske optimizacije, odnosno određivanja energetske efikasne mjera pri obnovi zgrade.

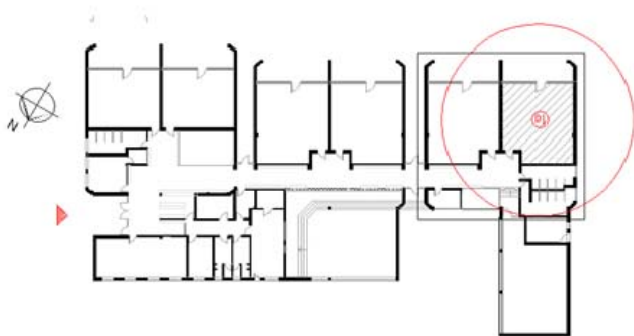
III. UPOREDNA ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA OMOTAČA I NJEGOVOG UNAPREĐENJA ZA VRTIĆ „NEVEN“ U BANJOJ LUCI

Pri analiziranju postojećeg stanja omotača, ako je to u svrhu određivanja indikatora energetske efikasnosti zgrade, odnosno potrebne energije za grijanje i ako nije bilo izmjena na omotaču,–osnova je postojeća projektna dokumentacija. U slučaju da su postojale izmjene na omotaču, a da nisu zabilježene ili ako ne postoji projektna dokumentacija

neophodno je izvršiti mjerenja na omotaču. Mjerenja energetske karakteristike na omotaču i na ovom konkretnom primjeru vrtića pokazala su odstupanja od projektne dokumentacije.

A. Postojeće stanje omotača

Energetske karakteristike omotača sagledane su iz postojeće projektne dokumentacije „Sl. 3“, gdje je navedeno da je objekat projektovan kao skeletna armirano – betonska konstrukcija.

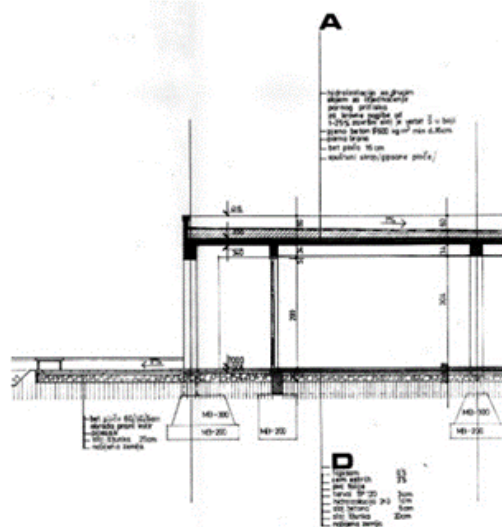


Sl. 3. Osnova vrtića „Neven“, izvor: autori

Zgrada vrtića je izvedena na temeljima samcima, marke betona MB 20 i MB 30 širine 40 cm. Podloga je urađena nasipanjem sloja šljunka debljine 20 cm na nabijenu zemlju, a na njemu je izvedena donja betonska ploča debljine 6 cm. Na postojeću ploču je postavljena hidroizolacija, a zatim sloj termoizolacije „tervol TP 120“ debljine 3 cm. Na slojevima ispod grupnih soba i praktikuma je izveden još samo estrih debljine 3.5 cm i završna podna obloga, dok je u hodnicima izveden još sloj betona armiran mrežom Q-92 debljine 4.5 cm sa završnim slojem epoksidnom smolom. Završne obrade su epoksidna smola, parket, keramičke pločice, laminat i cementna glazura. Prosječna vrijednost U-koef. poda iznosi 1.12 W/m²K, dok je dominantan pod u vrtiću sa završnom obradom od laminata, te je njegova vrijednost 0.80 W/m²K, „Sl. 4“.

Krov je izveden kao neprohodni ravan krov, minimalnog nagiba 1.0% sa hidroizolacijom i završnim slojem od pijeska u punoj površini objekta. Pjenobeton je izveden u minimalnoj debljini od 16 cm na armirano betonskoj konstrukciji. Obrada stropova je mjestimično od gipsanih ploča, a negdje od HD smjese. Zbog kondenzacije, rekonstrukcija ravnog krova je urađena 1997. godine i slojevi poslije rekonstrukcije ostaju nepromijenjeni. Prosječna vrijednost U-koeficijenta krova iznosi 0.77 W/m²K. Svi armirano – betonski vanjski elementi su zbog toplotnih zahtjeva iz tog perioda, obloženi heraklitom debljine 5 cm, te je njihova projektna vrijednost U-koeficijenta 1.04 W/m²K. Dominantan je fasadni zid od blok opeke 29 cm obostrano omalterisane produžnim malterom koji ima projektnu vrijednost U = 1.42 W/m²K. Prosječna vrijednost U-koeficijenta svih fasadnih zidova na vrtiću iznosi 1.47 W/m²K. Postojeći prozori na vrtiću izvedeni su kao dva spojena drvena okvira, svaki okvir zastakljen sa jednostrukim staklom („krilo

na krilo“) sa procijenjenom U-vrijednošću od 3.55 W/m²K.



Sl. 4. Dio presjeka vrtića „Neven“ iz originalne projektne dokumentacije iz 1974. godine, izvor: Arhiv Grada Banja Luka

Infiltracija vazduha zbog starosti prozora i otvora na više fasadnih zidova koji su izloženi vjetru procijenjena je na 0.70 l/h.

B. Unapređeno stanje

Pravilnikom o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada u Republici Srpskoj, za omotač zgrade su propisani najveći dozvoljeni U-koeficijenti. Za postojeći vrtić, koji ima karakterističan element konstrukcije pod na tlu, propisano je U = 0.30 W/m²K. U ovom istraživanju prikazano je njegovo adekvatno energetsko unapređenje. Vrtić posjeduje ravan krov, za koji se zahtijeva veoma nizak U-koeficijent od 0.20 W/m²K. Gore navedeno podrazumijeva dodavanje toplotne izolacije od 14 cm sa $\lambda=0.035$ W/mK i svih novih slojeva ravnog krova, kao i toplotno izolovanje cijelog nazitka na ravnom krovu. Za fasadne zidove i dostizanje U=0.30 W/m²K neophodno je dodavanje toplotne izolacije od 10 cm sa $\lambda=0.041$ W/mK i završnih slojeva fasade, te sa pravilnom izradom preklopa toplotne izolacije oko spoja okvira novih prozora i zidova zbog rješavanja linijskih toplotnih gubitaka - toplotnih mostova. Za prozore dostizanje U_w=1.60 W/m²K podrazumijeva zamjenu starih prozora, novim prozorima (okviri U_f=1.30 W/m²K sa termoizolacionom jedinicom zastakljena U_g=1.10 W/m²K i sa distancerom $\Psi=0.06$ W/mK), te je neophodno ugraditi po RAL sistemu i zbog pravilnog rješavanja spoja doprozornika sa zidom i sprječavanja infiltracije vazduha, vodonepropusnosti, a paropropusnosti. Za navedeno unapređenje očekuje se dobra zaptivenost omotača i procjena infiltracije vazduha od 0.50 l/h. Unapređeno stanje vrtića podrazumijeva i obezbjeđivanje toplotnog komfora i dostizanje unutrašnje temperature od 22°C.

C. Usporedna analiza i rezultati

Analizom energetskog unapređenja postojećeg omotača zgrade vrtića „TABELA I” moguće je smanjiti potrebnu energiju za grijanje za oko 70% (sa 249.00 kWh/m² na 74.40 kWh/m²).

TABELA I. UPOREDNA ANALIZA PROJEKTNIH I PREPORUČENIH VRIJEDNOSTI ZA POSTOJEĆI VRTIĆ „NEVEN“

Postojeći vrtić “Neven”			
PERIOD		1955 - 1980 (1974)	
GRIJANA POVRŠINA		1014 m²	
BROJ SPRATOVA		P	
GRIJANI VOLUMEN		3044 m³	
Toplotni kapacitet	Wh/m²a	72	
Metabolička toplota	W/m²	7	20
		projektna	preporučena
U-koef. ZIDOV	W/m²K	1.47	0.30
U-koef. PROZORI	W/m²K	3.55	1.60
U-koef. KROV	W/m²K	0.77	0.20
U-koef. POD	W/m²K	1.12	0.30
g-koef.	-	0.77	0.61
A/V odnos- faktor oblika	-	0.94	0.94
Infiltracija/izmjena vazduha	h^{-1}	0.70	0.50
		projektna	preporučena
Unutrašnja temperatura	°C	20.0	22.0
Doprinos od ventilacije	kWh/m²a	0.00	
Doprinos od korisnika	kWh/m²a	5.93	33.92
Rasvjeta i razni uređaji/električna energija	kWh/m²a	5.80	17.40
POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE	kWh/m²a	249.00	74.40

U Pravilnicima nije navedena adekvatna okupiranost/broj korisnika za ovakve namjene zgrada, te je procjena i prijedlog preporučenih vrijednosti izvedena na osnovu stvarnog stanja u vrtićima u Banjoj Luci. Osim toga, kako u Pravilnicima vrtići nisu posebna vrsta zgrada, projektanti se vode zgradama namjenjenim obrazovanju, gdje je navedena unutrašnja projektna temperatura u zimskom periodu od 20°C, dok bi preporučena projektna temperatura u vrtićima trebala biti 22°C.

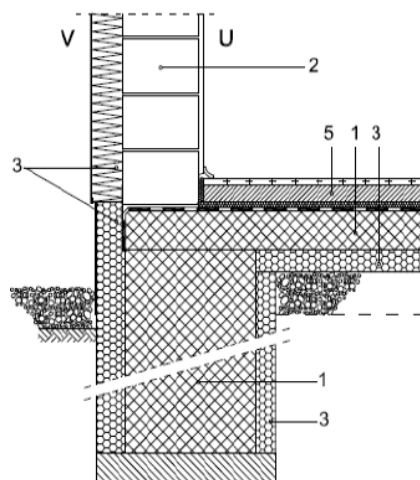
IV. UNAPREĐENJE PODA NA TLU SA SAVREMENIM MATERIJALIMA

Svi navedeni parametri preporučenog unapređenja omotača vode se vrijednostima dozvoljenih U-koeficijenata koji su navedeni u Pravilniku. Kako je kod postojećih zgrada najteže dostići U-koeficijent za pod, zbog problema sa ugrožavanjem svijetle visine prostora, neophodno je predstaviti moguće načine njegovog unapređenja kroz tehničke detalje i primjenu materijala. Trenutno u Pravilniku u članu 34. je navedeno da se kod postojećih zgrada ne mora unapređivati pod na tlu i plafon prema negrijanom dijelu zgrade, što može postati pravilo na način da u budućnosti niko ne unapređuje navedene elemente omotača, a koji ako se ne unaprijeđe ne mogu korisnicima prostora obezbijediti ugodan i konstantan toplotni komfor.

U katalogu toplotnih mostova propisana je pozicija toplotne izolacije „Sl. 5“, koju je moguće izvesti samo pri gradnji

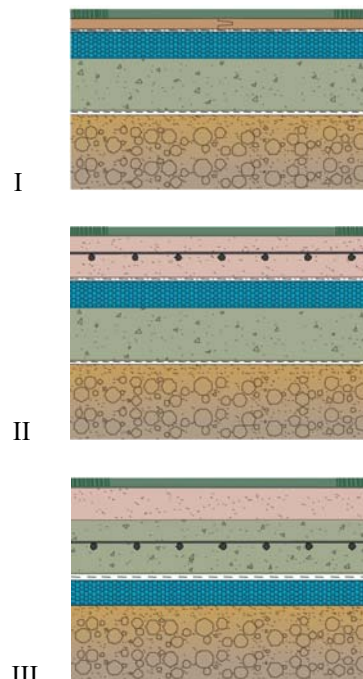
novih zgrada. Toplotna izolacija postavlja se oko cijele osnovne konstrukcije da bi se spriječili toplotni mostovi, te nalazi se ispod armirano betonske ploče poda na tlu. Kod ovakvih rješenja neophodno je korištenje ekstrudiranog polistirena – XPS-a, jer osim sprječavanja toplotnih mostova, ova izolacija štiti konstrukciju od prodora vode i vlage iz tla.

Na području Bosne i Hercegovine, a i u okruženju, u ovim pozicijama zgrade, najčešća je primjena toplotne izolacije od ekstrudiranog polistirena – XPS.



Sl. 5. Detalj toplotnog izolovanja temelja i poda na tlu, izvor: Katalog toplotnih mostova u Tehničkom propisu Hrvatske, 2015.

Kod poda na tlu moguće je projektovati i izvesti postavljanje toplotne izolacije u tri varijante u zavisnosti da li je ploča na tlu betonska ili armirano betonska, kao i od završnih slojeva poda „Sl. 6“.



Sl. 6. Varijante slojeva poda na tlu, izvor: Dow Chemical Company, ThermalInsulation.pdf, 2012

U I varijanti toplotna izolacija je iznad betonske ploče na koju je postavljena parna brana kao odvajajući sloj i drvene ploče kao sloj za prenošenje opterećenja – podloga za završne slojeve poda. U II varijanti takođe je toplotna izolacija iznad betonske ploče nakon koje se postavlja parna brana, pa armirana cementna košuljica kao podloga za završne slojeve poda. Dok je u III varijanti toplotna izolacija ispod armirano betonske ploče, varijanta koja je karakteristična za nove zgrade u skladu sa prethodno prikazanim detaljem. Pri unapređenju postojećih podova moguće je korištenje I i II varijante i pri ovakvom rješavanju moguća je primjena svih savremenih toplotnih izolacija. Kod predmetnog vrtića karakteristični slojevi poda su prikazani u „TABELA II“.

TABELA II. POSTOJEĆA PROJEKTNJA VRIJEDNOST U-KOEFICIJENTA DOMINANTE VRSTE PODA U VRTIĆU „NEVEN“

Br. sloja	Naziv sloja	d [cm]	λ [W/mK]	d/λ [m ² K/W]
1	laminat	0.80	0.210	0.038
2	PE filc	0.20	0.120	0.017
3	cementni estrih	3.50	1.400	0.025
4	PVC folija	0.5	0.190	0.026
5	kamena vuna	3	0.041	0.732
6	hidroizolacija	1	0.190	0.053
7	betonska podloga	6	2.040	0.029
8	nabijeni sljunak	20	1.510	0.132
	Rsi		0.170	
	Rse		0.000	
	ΣR		1.222	
	$U=1/\Sigma R$		0.818	

Pri unapređenju poda neophodno je ukloniti sve slojeve do hidroizolacije. Ako je hidroizolacija oštećena neophodno je preko postojeće izvesti novu hidroizolaciju, zatim postaviti toplotnu izolaciju, odvajajući sloj, podlogu i završni sloj poda. Zbog parametra toplotne provodljivosti materijala i dostizanja propisanog U-koeficijenta od 0.30 W/m²K, zahtjevane minimalne debljine toplotne izolacije pri unapređenju konstrukcije poda vrtića u zavisnosti od vrste materijala su:

- ekstrudirani polistiren - XPS ($\lambda = 0.035$ W/mK)
d = 10 cm
- ekspandirani polistiren - EPS ($\lambda = 0.041$ W/mK)
d = 12 cm
- vakuum izolacionog panel VIP ($\lambda = 0.007$ W/mK)
d = 2 cm

Postavljanjem toplotne izolacije od VIP-a i vraćanjem identičnih slojeva poda, čak bi se povećala svijetla visina prostora za 1 cm.

Istraživanja su pokazala da je primjena toplotne izolacije od VIP-a korisna kod podnog grijanja „Sl. 7“. Zbog niskog koeficijenta toplotne provodljivosti koji je 5-10 puta manji od tradicionalnih građevinskih materijala, VIP su najbolji toplotni izolatori danas i predstavljaju veliki iskorak u toplotnoj izolaciji zgrada energetski efikasnih zgrada [13]. Posebno su značajni u primjeni kod pasivnih zgrada i zgrada skoro nulte potrošnje energije ili zgrada koje imaju nultu emisiju. Ipak, postoje i nedostaci koje ovi materijali imaju: toplotno-izolaciono svojstvo materijala degradira vremenom, toplotni mostovi se javljaju na ivicama panela (ako panel nije dobro

ugrađen), nije ispitan uticaj na zdravlje, nema sječenja materijala i prilagođavanja na licu mjesta, energetski je zahtjevan i relativno skup proces proizvodnje [14].



linoleum	4,0 mm
plywood	9,0 mm
polyurethane foam	15,0 mm
gypsum plaster board	12,5 mm
metal sheet	0,4 mm
polystyrene	30,0 mm
insulation stripe	10,0 mm
vacuum insulation	20,0 mm
pu with al-foil	20,0 mm
foil	0,9 mm
equalizing subfloor	15,0 mm

Sl. 7. Primjena VIP-a u podu na tlu sa razvodom grijanja i ostalim neophodnim rasporedom slojeva, izvor: Pär Johansson, *Report in Building Physics*, Gothenburg: Civil and Environmental Engineering, 2012, str.11

V. ZAKLJUČAK

Kroz važeće pravilnike vezane za energetska efikasnost u zgradama, pod kao dio postojećeg omotača nije tretiran zbog njegovog otežanog energetskog unapređivanja.

Pojavom savremenih toplotnih izolacija, kao što je VIP, moguće je energetsko unapređenje poda, a da se zadrži debljina cjelokupne konstrukcije poda u postojećim okvirima. Međutim, upotreba ovih materijala nije prisutna na predmetnom području istraživanja s obzirom na visoku cijenu na evropskom tržištu i uopšte nepoznavanje upotrebe/ugrađivanja materijala na licu mjesta.

Svaka postojeća zgrada, zbog konstantnosti toplotne ugodnosti korisnika, zahtijeva da se energetski unaprijedi konstrukcija poda, a na način da se ne ugroze konstruktivne karakteristike zgrade, te da se u dozvoljenim gabaritima zadrže postojeće dimenzije prostora.

LITERATURA

- [1] B. Antunović, M. Stanković, A. Janković, D. Gajić, D. Todorović, „Mjerenje koeficijenta prolaza topline 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.
- [2] D. Gajić, „Energetska optimizacija omotača reprezentativnih uzoraka postojećih stambenih zgrada grada Banjaluka“, Beograd – doktorska disertacija, 2014.
- [3] 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, 2016, str. 229-236.
- [4] A. Janković, D. Gajić, B. Antunović, S. Čvoro, M. Slijepčević, „Ispitivanje toplotne izolovanosti nove zgrade uprave policije Distrikta Brčko“, U: Branko Blanuša i dr. (ur.) Zborniku radova sa III Naučno-stručnog simpozijuma ENEF 2017, Banjaluka: Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, str.15-20, 2017
- [5] D. Arnaudović-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.
- [6] EN 15217 Energy performance of buildings -Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings s. Brussels, 2007., pp.13-14.

- [7] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada Republike Srpske, Sl. gl. RS br. 30/15, str. 4.
- [8] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark and M. Zeumer, „Energy Manual: sustainable architecture“, Basel: Birkhäuser, 2008., pp. 85.
- [9] J. Parasonis, A. Keizikas, A. Endriukaitytė and D. Kalibatienė, 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.
- [10] D. Gauzin-Muller, „Sustainable architecture and Urbanism: Concepts, Technologies and Examples“, Basel: Birkhäuser, 2002., pp. 49.
- [11] M. Zbašnik-Senegačnik, “Pasivna kuća“, Zagreb: SUN ARH d.o.o., 2009.
- [12] 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
- [13] Bjørn Petter Jelle, 8 - Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings, Editor(s): Fernando Pacheco-Torgal, Erik Rasmussen, Claes-Göran Granqvist, Volodymyr Ivanov, Arturas Kaklauskas, Stephen Makonin, Start-Up Creation, Woodhead Publishing, 2016, pp 129-181,
- [14] R. Baetens, 9 - High performance thermal insulation materials for buildings, Editor(s): F. Pacheco-Torgal, M.V. Diamanti, A. Nazari, C-G. Granqvist, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural

Engineering, Nanotechnology in Eco-Efficient Construction, Woodhead Publishing, 2013, pp 188-206,

ABSTRACT

The paper analyzes measurements performed in December 2015, and using calculated thermal performance of the envelope proposes the possibilities of its energy improvement in accordance with the Rulebook on Minimum Requirements for the Energy Performance of Buildings of the Republic of Srpska that is in force since 2016. Special attention has been given to the presentation of technical details of improvement of the ground floor using modern thermal insulation materials: EPS, XPS and VIP.

IMPROVEMENT OF THE GROUND FLOOR ON THE EXISTING KINDERGARTEN IN BANJA LUKA WITH CONTEMPORARY THERMAL INSULATION MATERIALS

Darija Gajić, Biljana Antunović, Diana Stupar

Novi termoelektrici u funkciji prigušenja toplotnog rasipanja

Siniša M. Vučenović¹, Jovan P. Šetrajčić^{2,3}, Stevo K. Jaćimovski⁴

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Akademija nauka i umjetnosti Republike Srpske, Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet „Union – Nikola Tesla“, Fakultet za sport, Novi Beograd, Vojvodina – Srbija

⁴Kriminalističko-policijski univerzitet u Zemunu – Beograd, Srbija

sinisa.vucenovic@pmf.unibl.org, jovan.setrajcic@gmail.com, jacimovskis@gmail.com

Sažetak— U radu su predstavljeni rezultati istraživanja termoelektričnih svojstava pniktida rijetkih zemalja i monoslojnog grafena. Oba materijala pokazuju izuzetnu sklonost i efikasnost u transformaciji toplote u električnu struju, te su perspektivni za primjenu kao „čistači“ toplotnog otpada.

Ključne riječi—termoelektrici; lantanidni monopniktidi; monoslojni grafen; Bolcmanova transportna teorija;

I. UVOD – PROBLEM TOPLOTNOG RASIPAVANJA

Toplotno rasipavanje ili toplotni „otpad“ definiše se kao toplotna energija (količina toplote) koja je proizvedena od strane čovjeka, a praktično nije iskorištena za vršenje bilo kakvog rada.

Toplotni otpad je gotovo svuda prisutan [1]. Na primjer, kada se grije voda na električnoj ploči čija je površina grijača veća od donje površine suda u kojem je voda – jedan dio toplote se gubi na zagrijavanje okoline. Pored toga, sam sud izrači dio toplote okolnom vazduhu, pa dio toplote ode putem isparavanja tople vodene pare. Na taj način se nepotrebno rasijava toplota, tj. proizvodi se toplotni otpad. Kod zagrijavanja kuće, čak i kod one koja je dobro toplotno izolovana i ima dobro izolovana vrata i prozore, opet jedan dobar dio toplote odlazi neiskorišten kao toplotni gubitak. Svi motori sa unutrašnjim sagorjevanjem su energetski veoma neefikasni – njihov stepen iskorištenja je najveći kod dizel motora i iznosi maksimalno do 40 %. Razlog ovome leži u činjenici da se u motorima za dobijanje mehaničke energije ne može iskoristiti sva proizvedena toplota – veliki dio toplote se bespovratno gubi (motor mora da se hladi), a izduvni sistem (auspuh) kod ovih motora se grije do visokih temperatura i izbacuje vrele gasove, time nekorisno predajući okolini (pored zagađenja) i veliku količinu neiskorišćene toplote.

Toplotni otpad se ne može eliminisati – on uvijek mora postojati (toplota se – na kraju, i mora predati hladnijem rezervoaru). U suprotnom, ukoliko hladniji rezervoar ne bi postojao i kada bi se sva toplota pretvorila u rad – to bi praktično bio perpetuum mobile druge vrste, a ovo bi značilo kršenje drugog principa termodinamike. Ipak, mnogo energije bi moglo da se uštedi ako bi se smanjila količina „izgubljene“ toplote, tj. one koja se nepovratno, beskorisno i štetno predaje okolini, ne vršeći pri tome nikakav rad. Jedna od ideja je da se ovaj toplotni rastur pretvori u električnu energiju i to direktnim

putem! Ovu osobinu imaju termoelektrici – materijali koji imaju mogućnost da direktno vrše pretvaranje toplote u električnu energiju. Termoelektrici mogu da vrše i obrnut proces – da pretvaraju električnu energiju u toplotnu. Oblaganjem automobilskih, avionskih i ostalih toplotnih motora i izduvnih sistema, zatim toplotnih blokova termoelektrana i svih ostalih termičkih postrojenja ili njihovih dijelova koji emituju toplotni otpad efikasnim termoelektričnim materijalima, otvara se mogućnost dobijanja dodatne energije, kao i doprinos u smanjenju globalnog zagrijavanja naše planete.

Termoelektrični efekat ispoljavaju mnogi materijali od kojih su najzastupljeniji poluprovodnici dopirani različitim primjesama (Bi₂Te₃, PbTe, SiGe, ...) kako bi se termoelektrični efekat pojačao. Efikasnost pretvaranja toplote u električnu energiju kod termoelektrika se izražava bezdimenzionim zT -faktorom [2]:

$$zT = \frac{S^2 T}{\rho \kappa}, \quad (1)$$

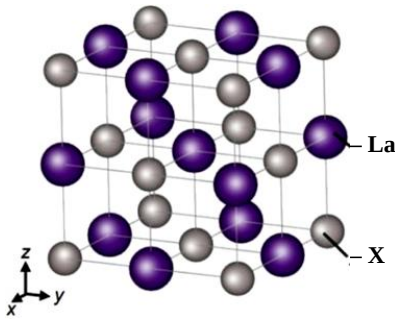
gdje su: S – Sebekov koeficijent, ρ – specifična električna otpornost, κ – koeficijent toplotne provodljivosti (koja se sastoji od elektronskog i fononskog dijela – tj. u provođenju toplote učestvuju i elektroni iz kristalne rešetke i fononi – vibracije te rešetke [3]) i T – temperatura. Sebekov koeficijent karakteriše jačinu izraženog Sebekovog efekta – generisanja električnog napona iz temperaturnog gradijenta. Iz gornjeg izraza se vidi da će efikasnost termoelektrika biti bolja kod materijala koji slabije provode toplotu ili struju, što je donekle u kontradikciji sa poželjnim karakteristikama termoelektrika – jer je potrebno da materijal i provodi (tj. odvodi) naelektrisanja koja se generišu pomoću toplote.

Ono što i dalje predstavlja veliki problem kod današnjih materijala je još uvijek mala vrijednost zT faktora i naučnici u svijetu traže materijale koji će imati bolje termoelektrične osobine i veću efikasnost. Savremeni istraživački rezultati izdvojili su dve vrste nano-materijala: lantanidni monopniktidi i grafeni, čiji je potencijal termoelektrične primjene veoma obećavajući. U ovom radu ćemo predstaviti te najnovije rezultate.

II. NOVI – EFIKASNIJI TERMOELEKTRICI

A. Lantanidni monopniktidi

Među sasvim novim termoelektričnim kandidatima od nedavno su se našla i lantanidna jedinjenja – kamene soli. Ona su privukla značajnu pažnju svojim različitim specifičnim svojstvima: visoka tačka topljenja, izrazita mehanička čvrstoća i ekstremna tvrdoća, zbog čega su obećavajući za tvrde prevlake i uređaje za magnetno skladištenje [4]. Strukturna, elektronska i optička svojstva faze kamene soli LaX (X = P, As, Sb i Bi, slika 1) široko su istražena [5]. Iako je softverskim simulacijama utvrđeno da bi LaP i LaAs trebali biti metalni materijali, na osnovu eksperimentalnih mjerenja [6] otkriveno je da oni teže ka poluprovodnicima, ali je nedavno pokazano [7] da sve navedene kamene soli teže topološkim izolatorima sa velikom magnetnom otpornošću.



Sl. 1. Oblik kristalne rešetke materijala LaX, iz [5]

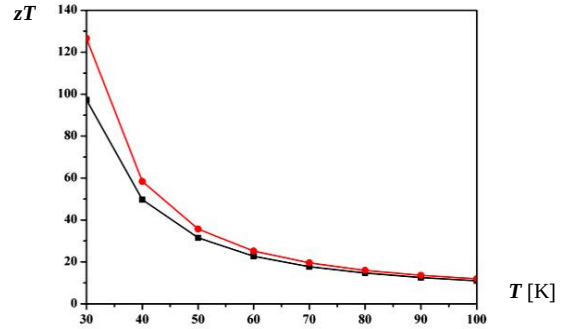
Kamene soli tipa LaX su nedavno pobudile naučnu javnost gdje je pokazano je da upravo LaP (lantan-fosfid) može biti najoptimalniji termoelektrični (TE) materijal iz porodice pomenute lantanid-monopniktida [8]. Kako je toplotna provodljivost rešetke važan faktor koji određuje performanse TE materijala, istražena su njihova fononska svojstva korišćenjem iterativne samo-konzistentne metode za rešavanje fononske Boltzmanove transportne jednačine [9], pri čemu su dobijena i ostala srodna svojstva, uključujući efektivno naelektrisanje, permitivnost, faznu i grupnu brzinu i Gruneisen-ov parametar [10]. Na taj način je pokazano da se toplotna provodljivost rešetke može se izraziti u obliku:

$$\kappa_{\lambda}^{\alpha\beta} = (k_B T^2 \Omega N)^{-1} \sum f_0 (1 + f_0) \hbar^2 \omega_{\lambda}^2 v_{\lambda}^{\alpha} F_{\lambda}^{\beta}, \quad (2)$$

gdje je Ω zapremina jedinične ćelije, N je broj tačaka ravnomjerno raspoređenih u Brillouinovoj zoni, ω_{λ} i v_{λ} su ugaona frekvencija i grupna brzina fononskog moda λ , f_0 je funkcija Boze-Ajnstajnovе raspodjele, dok je F_{λ} projekcija srednjeg slobodnog pomaka fonona [8]. Brzine rasipanja optičkih fonona su za jedan red veće od onih akustičnih fonona. Unutrašnje fononsko-fononsko rasipanje je obračunato kroz Gruneisen-ov parametar, koji pruža informacije o anharmonijskim interakcijama. Grafički prikaz temperaturske zavisnosti toplotne provodljivosti dat je na slici 2.

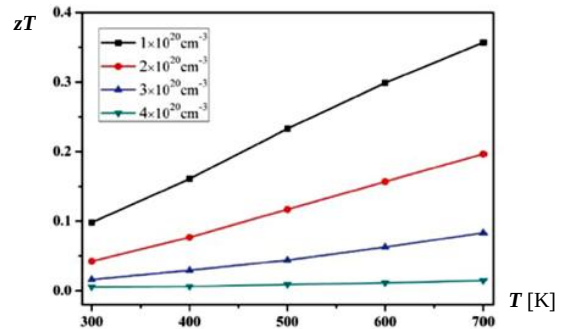
Transportni koeficijenti za elektronski deo, uključujući Seebeckov koeficijent S , električnu provodljivost σ/τ i elektronsku toplotnu provodljivost κ_e/τ (gde je τ vreme relak-

sacije), obračunata je u okviru Boltzmanove teorije i dobijena praktično linearna zavisnost od koncentracije naelektrisanja.



Sl. 2. Temperaturska zavisnost fononske toplotne provodljivosti LaX, iz [9]

Mada su istraživanja sa LaP pokazala da se ovi materijali još uvijek nalaze daleko ispod karakteristika termoelektrika baziranih na PbTe jedinjenjima (čiji zT faktor može postići vrijednosti i do $\approx 2,2$), smatra se da se finim podešavanjem nosilaca naelektrisanja kao i povećanjem temperature mogu postići i više vrijednosti zT faktora (slika 3).

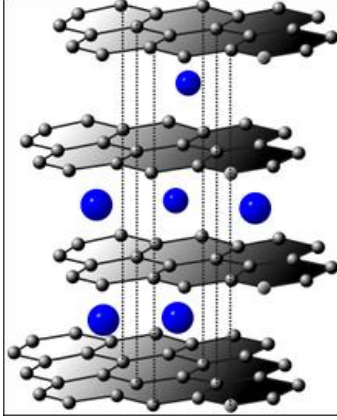


Sl. 3. Temperaturska zavisnost fononske zT faktora, LaX iz [8]

B. Grafeni

Grafen – jedan savremeni ugljenikov kristal, mnogo je egzotičnija supstancija od pomenutih pniktida. To je dvodimenziona ugljenička struktura (slika 4) debljine jednog atoma (grafit debljine 1 mm sadrži tri miliona slojeva grafena naslaganih jedan na drugi, međusobno labavo povezanih). Kao materijal, grafen ima izuzetno specifična svojstva [11]. On je skoro potpuno providan, ali je istovremeno i toliko gust da ni najmanji atomi gasa ne mogu da prođu kroz njega. Pored toga, elektricitet provodi jednako dobro ili bolje od bakra.

Grafen je istovremeno i najtanji i najjači poznati materijal: to je veliki kristal nanoskopske debljine, veoma je jak – sto puta jači od čelika – a može se rastegnuti i do 20%. Njegovo otkriće [12] odrazilo se odmah na brojne druge oblasti, od kvantne fizike (dvodimenzionalni materijali s jedinstvenim svojstvima) do praktične elektronike i tehnike (za izradu providnih ekrana osjetljivih na dodir, svjetlosnih panela i solarnih ćelija). Grafenski tranzistori bi mogli zamijeniti silicijumske i omogućiti izradu još efikasnijih računara, a pomješan sa plastikom, omogućio bi da se izrade lagani i superjaki kompozitni materijali za sljedeću generaciju satelita, aviona i automobila).



Sl. 4. Kristalno-molekulska struktura grafena

Kontrola toplotnog fluksa i minimizacija odgovarajućih gubitaka mogu biti od izuzetnog značaja kod projektovanja savremenih elektronskih nanokomponenti zasnovanih na grafenu. Eksperimenti [13] pokazuju da je termoelektrični efekat odgovoran za promjenu temperature kontakata nanoelemenata, čak preko 30% od njene vrijednosti, i da na taj način može biti odlučujući u njihovom hlađenju. Mjerena termoelektromotorna sila grafena dostiže na sobnim temperaturama vrijednost $k_B/e \approx 100 \mu\text{V/K}$, gde je k_B – Bolcmanova konstanta, a e – elementarno naelektrisanje. Stoga je proučavanje ovog efekta od izuzetnog značaja.

Termoelektromotorna sila definisana je redefinisanim Motovim izrazom [14], koja obračunava i nagli porast termoelektromotorne sile na temperaturama bliskim temperaturi Kondo, kod elektronskih topoloških prelaza, oscilacija u jakim magnetnim poljima itd:

$$Q_x = -\frac{k_B}{e} \frac{\int_{-\frac{\mu}{k_B T}}^{\infty} x(\mu + k_B T x) \tau(x, T) \frac{e^x}{(e^x + 1)^2} dx}{\int_{-\frac{\mu}{k_B T}}^{\infty} (\mu + k_B T x) \tau(x, T) \frac{e^x}{(e^x + 1)^2} dx}, \quad (3)$$

gde je μ hemijski potencijal, $\tau(x, T)$ – vreme relaksacije, promjenljiva $x = (\varepsilon - \mu) (k_B T)^{-1}$, sa zakonom disperzije oblika: $\varepsilon = \hbar v_F k$ (v_F – Fermijeva brzina, a k – talasni vektor).

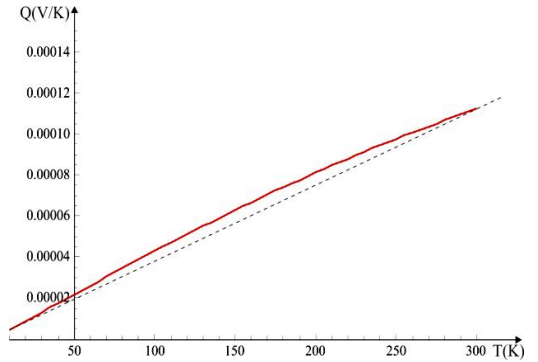
Za računanje ukupnog vremena relaksacije koristimo poznato Matisenovo pravilo [2]:

$$\tau^{-1} = \sum_i \tau_i^{-1}, \quad (4)$$

a uračunavamo dominantne mehanizme relaksacije [15–18], od rasejanja nosilaca naelektrisanja na neutralnim primjesama sa kratkodometnim potencijalom (1), zatim na naelektrisanim primjesama sa Kulonovim potencijalom (2), pa na akustičnim fononima (3), na česticama sa ekraniranim potencijalom (4) i konačno na vakansijama (5):

$$\begin{aligned} \tau_1^{-1}(x, T) &= \frac{n_i V_0^2}{4\hbar^3 V_F^2} (\mu + k_B T x); \\ \tau_2^{-1}(x, T) &= \frac{\pi^2 n_i}{h} \frac{e^4}{(\varepsilon_0 \varepsilon_r)^2} (\mu + k_B T x)^{-1}; \\ \tau_3^{-1}(x, T) &= \frac{D^2 k_B T}{8\hbar^3 V_F^2 \rho_m} (v_L^{-2} + v_T^{-2}) (\mu + k_B T x); \\ \tau_4^{-1}(x, T) &= \frac{1}{\tau_0} \frac{\mu + k_B T x}{\varepsilon_F} \left[1 - a_1 \left(\frac{\mu + k_B T x}{\varepsilon_F} - 1 \right) + a_2 \left(\frac{\mu + k_B T x}{\varepsilon_F} - 1 \right)^2 \right]; \\ \tau_0^{-1} &= \frac{n_i}{2\pi\hbar} \left(\frac{2\pi e}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right)^2 \frac{2I_0}{\varepsilon_F}; \quad a_1 = \frac{2I_1}{I_0}; \quad a_2 = \frac{3I_2}{I_0}; \\ I_n &= \int_0^1 \frac{x^{2+n} \sqrt{1-x^2}}{(x+2r_s)^{2+n}} dx; \quad n=0,1,2; \quad r_s = \frac{e^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \hbar v_F}; \\ \tau_5^{-1}(x, T) &= \frac{\pi^2 n_i \hbar v_F^2}{\mu + k_B T x} \ln^{-2} \left[\frac{(\mu + k_B T x) R_0}{\hbar v_F} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Za konkretno numeričko određivanje termoelektromotorne sile, kao i za numeričko izračunavanje provodnosti iz relacije (3), koristili smo literaturne vrijednosti parametara navedenih u [14]. Poslije numeričkog proračuna rezultate smo grafički predstavili na slici 5, kao zavisnost termoelektromotorne sile od temperature (u intervalu od 0 do 300 K).



Sl. 5. Zavisnost termoelektromotorne sile od temperature u slučaju rasejanja nosilaca naelektrisanja kada deluju svi pomenuti relaksacioni mehanizmi

Iz slike 5 se vidi da termoelektromotorna sila raste sa porastom temperature i ti rezultati u radu su u saglasnosti sa referentnim rezultatima u literaturi [15,19].

III. ZAKLJUČCI

U radu su predstavljeni rezultati istraživanja termoelektričnih svojstava pniktida rijetkih zemalja i monoslojnog grafena. Oba materijala pokazuju izuzetnu sklonost i efikasnost u transformaciji toplote u električnu struju, te su perspektivni za primjenu kao „čistači“ toplotnog otpada.

Istraživanje lantanidnih monopniktida obuhvatilo je proučavanje dinamike kristalne rešetke uz korišćenje prvih principa i Bolcmanove transportne teorije i transporta naelektrisanja. Rezultati pokazuju solidnu vrednost zT faktora, oko 0,36 na 300 K, dok je električna provodnost praktično nezavisna od temperature.

Eksperimenti [18,19] pokazuju da se u spektru kvazičestica u grafenu pojavljuje gep blizu Dirakove tačke, što je po svemu sudeći posljedica uticaja podloge na kojoj se grafen nalazi. Pojava gepa dovodi do pojave novog kanala rasejanja kvazičestica, pri čemu vrijeme relaksacije jako zavisi od energije kvazičestica. Približavanjem hemijskog potencijala ivici gepa mogu se pojaviti pikovi termoelektromotorne sile velikih vrijednosti. Kod monoslojnog grafena pojava gepa nije dovoljno istražena [14-17]. Stoga je u ovom radu primjenjen metod izračunavanja termoelektromotorne sile pomoću Bolcmanove jednačine u aproksimaciji vremena relaksacije. Numeričkim rješavanjem za usvojene vrijednosti nalazi se zavisnost termoelektromotorne sile od temperature u intervalu od 10 – 300 K za sve mehanizme rasejanja. Dobijeno je da termoelektromotorna sila raste sa porastom temperature što je u saglasnosti sa referentnim literaturnim podacima [15,19].

ZAHVALNICA

Rezultati izneti u ovom radu deo su istraživanja koja su finansijski podržana od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (TR-34019 i ON-171039) i Ministarstva za naučni i tehnološki razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Vlade Republike Srpske (19/6-020/961-21/18 i 19/6-020/961-35/18).

LITERATURA

- [1] S. Vučenović, „Termoelektrici u borbi protiv toplotnog „optada““, Zanimljiva fizika, Banja Luka: PMF UBL, 2019;
<http://www.fizika.rs.ba/termoelektrici-u-borbi-protiv-toplotnog-otpada/>
- [2] D. Raković, Fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala, 2. izdanje, Beograd: ETF UBG, 1997, str.48-137; 243-324.
- [3] Y. Z. Pei, X. Y. Shi, A. LaLonde, H. Wang, L. D. Chen, and G. J. Snyder, „Convergence of electronic bands for high performance bulk thermoelectrics“, *Nature*, vol. 473, pp. 66-69, 2011.
- [4] P. Jood, R. J. Mehta, Y. L. Zhang, G. Peleckis, X. L. Wang, R. W. Siegel, T. Borca-Tasciuc, S. X. Dou, and G. Ramanath, „Al-doped zinc oxide nanocomposites with enhanced thermoelectric properties“, *Nano. Lett.* vol. 11, no. 10, pp. 4337-4342, 2011.
- [5] G. Pagare, S. P. Sanyal, and P. K. Jha, „High-pressure behaviour of lanthanum mono pnictides“, *J. Alloys Compd.* vol. 398, no. 1-2, pp. 16-20, 2005.
- [6] M. Shoaib, G. Murtaza, R. Khenata, M. Farooq, and R. Ali, „Structural, elastic, electronic and chemical bonding properties of AB (A = Sc, Y, La; B = N, P, As, Sb, Bi) from first principles“, *Comput. Mater. Sci.* vol. 79, pp. 239-246, 2013.
- [7] J. Nayak, S. C. Wu, N. Kumar, C. Shekhar, S. Singh, J. Fink, E. E. D. Rienks, G. H. Fecher, S. S. P. Parkin, B. H. Yan, and C. Felser, „Multiple Dirac cones at the surface of the topological metal LaBi“, *Nat. Commun.* vol. 8, art. no. 13942, 2017.
- [8] Yu Zhou, W.-Li Tao, Zh.-Yi Zeng, X.-Rong Chen, and Qi-Feng Chen, „Thermoelectric properties of topological insulator lanthanum phosphide via first-principles study“, *J. Appl. Phys.* vol. 125, art. no. 045107, 2019.
- [9] T. Liang, W. Q. Chen, C. E. Hu, X. R. Chen, and Q. F. Chen, „Lattice dynamics and thermal conductivity of lithium fluoride via first-principles calculations“, *Solid State Commun.* vol. 272, pp. 28-32, 2018.
- [10] S. D. Guo and B. G. Liu, „Ultrahigh lattice thermal conductivity in topological semimetal TaN caused by a large acoustic-optical gap“, *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 30, art. no. 105701, 2018.
- [11] <https://www.graphenea.com/pages/graphene>
- [12] A. K. Gejm, and K. S. Novoselov, „The rise of graphene“ in: *Nanoscience and technology – A collection of reviews from nature journals*, Ed. P. Rodgers, ch. 1: Nanomaterials and nanostructures, pp. 11-19, World Scientific & NPG 2009.
- [13] K. L. Grosse, M.-Ho Bae, F. Lian, E. Pop, and W. P. King, „Nanoscale Joule heating, Peltier cooling and current crowding at graphene-metal contacts“, *Nature Nanotechnology*, vol. 6, pp. 287–290, 2011.
- [14] S. Jaćimovski, J. Šetrajčić, and D. Raković, „Termoelectrics effects in graphene monolayers“, *Proceedings of the 8th International conference on Contemporary Materials*, pp. 89-98, 2016.
- [15] S. Das Sarma, Sh. Adam, E.H. Hwang, and F. Rossi, „Electronic transport in two-dimensional graphene“, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 83, no. 2, pp. 407-470, 2011.
- [16] D. Wang, and J. Shi, „Effect of charged impurities on the thermoelectric power of graphene near the Dirac point“, *Phys. Rev. B*, vol. 83, art. no. 113403, 2011.
- [17] S. K. Jaćimovski, V. D. Sajfert, J. P. Šetrajčić, and D. I. Raković, „Electronic contribution to conductivity in graphene“, *Quantum Matter*, vol. 4, no. 5, pp. 1–4, 2015.
- [18] Khan M. F. Shahil, and A. A. Balandin, „Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials“, *Solid State Commun.* vol. 152, no. 15, pp. 1331-1340, 2012.
- [19] S. G. Sharapov, and A. A. Varlamov, „Anomalous growth of thermoelectric power in gapped graphene“, *Phys. Rev. B*, vol. 86, art. no. 035430, 2012.

ABSTRACT

We have introduced in this paper results of research of thermoelectric properties of the rear earth pnictides and monolayer graphene. Both of these materials show exceptional tendency and efficiency in transformation from heat to electricity, and have perspective application in heat harvesting.

NEW THERMOELECTRICS IN FUNCTION OF ATTENUATION OF HEAT DISSIPATION

Siniša M. Vučenović, Jovan P. Šetrajčić, Stevo K. Jaćimovski

Analiza energetske efikasnosti sistema grijanja objekta u funkciji administrativnog centra

Milan Pupčević¹, Petar Gvero², Milovan Kotur³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

milan.pupcevic@mf.unibl.org, petar.gvero@mf.unibl.org, milovan.kotur@mf.unibl.org

Sažetak - Prilikom analize energetske efikasnosti jednog objekta na našim prostorima prvenstveno se misli, a samim tim razmatra i realizuje, izolovanje objekta. Preliminarnom ocjenom može se doći do zaključka koji dio sistema predstavlja kritični element. Objekat razmatran ovim radom obezbjeđuje potrebnu toplotnu energiju pomoću električnih termoakumulacionih peći i mnogobrojnih klima-split sistema. Navedeni sistem grijanja ostvaruje veliku potrošnju električne energije. Cilj ovog rada je definisati prednosti i veću efikasnost prelaskom sa navedenog sistema grijanja na centralizovani sistem grijanja. Radom će biti izvršena analiza centralizovanog sistema grijanja sa biomasom kao energentom i električnom energijom pomoću toplotnih pumpi. Za navedeni objekat potrebno je izvršiti dimenzionisanje sistema, projektovanje centralnog sistema grijanja, ekonomsku analizu perioda otplat novih sistema i smanjenje štetnih produkata, to jest zagađivača okoline.

Ključne riječi - grijanje; energetska efikasnost; količina toplote; period otplat;

I. UVOD

Lokacija na kojoj se nalazi objekat, koji je prvenstveno predmet analize ispitivanja energetske efikasnosti i razreda objekta, nalazi se unutar centralne gradske zone Trebinja. Sam objekat je nestambene namjene, u funkciji administrativne službe.

Iako predstavlja jedinstvenu funkcionalnu cjelinu, sam objekat kao građevina se može podijeliti u tri dijela, te se može konstatovati da se i postupak gradnje odvijao u tri etape. Najstariji dio objekta je građen 1903. godine. Njegova spratnost je P+1, ukupne bruto građevinske površine 450 m². Objekat ima prepoznatljiv izraz za period u kom je građen, sa naglašenom simetrijom kako u osnovi, tako i na fasadama. Građen je od kamena sa impozantnom debljinom fasadnih zidova od 70 cm. Veći dio ovog objekta ima istočnu orijentaciju, dok su uži dijelovi orijentisani sjeverno i južno. Dio objekta, odnosno objekat spratnosti P+2, je izgrađen 1963. godine, a ubrzo nakon toga uz njega je dograđen još jedan dio koji je spojio stari i novi objekat. Njegova spratnost je P+1, sa ravnim neprohodnim krovom iznad sprata. Ukupna površina objekata iz 1963. godine je 995 m². Neposredno prije realizacije kompletnog objekta u funkciju administrativne službe, u unutrašnjem dvorištu izgrađenih objekata dograđen je prizemni prostor površine 82 m².

Ako sagledavamo objekat kao cjelinu, može se konstatovati da je to objekat poluatrijumskog tipa. Shodno tome fasade orijentisane prema atrijumu prave određena osjenčenja jedne na druge. Takođe, svi podaci o fasadnim i pregradnim zidovima, podovima i tavanicama, utvrđeni su opažanjem na samim objektima, a sve potrebne dimenzije su uzete na licu mjesta. Ukupna neto površina objekta je 1089 m².

II. PRORAČUN GODIŠNJE POTREBNE TOPLOTNE ENERGIJE ZA GRIZANJE ZGRADE I ODREĐIVANJE ENERGETSKOG RAZREDA

Trebinje pripada području mediteranske klime, sa srednjom godišnjom temperaturom 14,9 °C. Proračun godišnje potrebne toplotne energije je rađen prema [1] i [2]. Koeficijent prolaza toplote, za građevinski element jednostavne heterogenosti, određuje se proračunom na osnovu jednačine (1), a dobijene vrijednosti su prikazane tabelom (I),

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_m \frac{d_m}{\lambda_m} + R_{se}}, \quad (1)$$

gdje su:

- d_m - debljina sloja [m],
- λ_m - koeficijent toplotne provodljivosti [W/mK] i
- R_{si} , R_{se} - otpor prelazu toplote na unutrašnjoj/ spoljašnjoj površini konstrukcije [m²K/W].

Koeficijenti prolaza toplote transparentnog građevinskog elementa, tabela (I), određuju se pomoću jednačine (2),

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f}, \quad (2)$$

gdje je:

- A_g - površina stakla [m²],
- A_f - površina okvira [m²],
- U_g - koeficijent prolaza toplote stakla [W/m²K],
- U_f - koeficijent prolaza toplote okvira [W/m²K],
- l_g - dužina sloja (procjepa) okvira i stakla [m] i
- ψ_g - faktor korekcije temperature za toplotne mostove između okvira i stakla.

TABELA I. PREGLED KOEFICIJENATA PROLAZA TOPLOTE

Oznaka površine	Oznaka	U [W/m ² K]
Vanjski zidovi	Tip ZV1	1,42
	Tip ZV2	1,78
	Tip ZV3	2,38
Unutrašnji zidovi	Tip ZU1	2,32
	Tip ZU2	2,78
	Tip ZU3	1,96
Stropovi	Tip S1	2,21
	Tip S2	3,70
	Tip S3	2,73
Pod	Tip P1	3,97
Otvori Prozori i vrata	Tip 1	3,50
	Tip 1a	4,90
	Tip 1b	4,90
	Tip 1c	4,70
	Tip 1d	5,80
	Tip 1v	5,00
	Tip 2	5,20
	Tip 2a	5,80
	Tip 2b	4,90
	Tip 3	2,10
	Tip 4	4,80
	Tip 4a	4,70
	Tip 5	4,70
	Tip 5a	5,00
	Tip 6	4,90
	Tip 7	5,00
	Tip 8	5,00
	Tip 9	5,00
	Tip 10	6,00
	Tip 11	2,00

Koeficijent transmisijonog toplotnog gubitka računa se prema formuli (3),

$$H_{tr,ad} = H_D + H_A + H_U + H_g, \quad (3)$$

gdje su:

- H_D - koeficijent transmisijonih gubitaka kroz omotač prema vanjskoj okolini [W/K],
- H_A - koeficijent transmisijonih gubitaka prema susjednim zgradama [W/K],
- H_U - koeficijent transmisijonog toplotnog gubitka kroz negrijane prostorije prema vanjskoj okolini [W/K] i
- H_g - koeficijent toplotnih gubitaka prema tlu [W/K].

Koeficijent ventilacionog gubitka toplote računa se pomoću formule (4),

$$H_{ve,ad} = \rho_a \cdot c_a \left(\sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \right), \quad (4)$$

gdje je:

- $\rho_a \cdot c_a$ - zapreminski toplotni kapacitet vazduha [J/m³K],
- $q_{ve,k,mn}$ - srednja količina vazduha koji prolazi kroz svaki pojedini element k [W/K] i
- $b_{ve,k}$ - faktor korekcije temperature za svaki element k.

Godišnja potrebna toplotna energija za grijanje izračunava se prema formuli (5),

$$Q_{H,nd} = Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn}, \quad (5)$$

pri čemu se ukupni toplotni gubici $Q_{H,ht}$ određuju pomoću formule (6), a ukupni dobici toplote $Q_{H,gn}$ određuju se kao zbir ukupnih unutrašnjih i solarnih dobitaka, prema formuli (7):

$$Q_{H,ht} = Q_{tr} + Q_{ve}, \quad (6)$$

$$Q_{H,gn} = Q_{int} + Q_{sol}. \quad (7)$$

Ukupni transmisijonni gubici određeni su pomoću formule (8) a ukupni ventilacioni gubici određeni su formulom (9):

$$Q_{tr} = \frac{1}{1000} \sum_k (H_{tr,k} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_{e,k})) \cdot t, \quad (8)$$

$$Q_{ve} = \frac{1}{1000} \sum_k (f_t \cdot H_{ve,k} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_{e,k})) \cdot t, \quad (9)$$

gdje su:

- f_t - vrijeme trajanja operacije od ukupnog računskog perioda,
- $\theta_{int,set,H}$ - projektna temperatura u zgradi i/ili zoni za grijanje [°C],
- $\theta_{e,k}$ - temperatura susjednih prostorija, okoline ili zone elementa k [°C] i
- t - vrijeme trajanja računskog perioda (čas).

Ukupni unutrašnji dobici određuju se prema formuli (10), a ukupni solarni dobici se određuju prema formuli (11):

$$Q_{int} = \left(\sum_k \Phi_{int,mn,k} \right) \cdot t + \left(\sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{int,mn,u,l} \right) \cdot t, \quad (10)$$

$$Q_{sol} = \left(\sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right) \cdot t + \left(\sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{sol,mn,u,l} \right) \cdot t \quad (11)$$

pri čemu su:

- $b_{tr,l}$ - faktor redukcije za susjedne nekondicionirane prostorije sa unutrašnjim izvorom toplotne energije,
- $\Phi_{int,mn,k}$ - prosječni toplotni fluks od unutrašnjih izvora k toplotne energije [W],
- $\Phi_{int,mn,u,l}$ - prosječni toplotni fluks od unutrašnjeg izvora u susjednoj nekondicioniranoj prostoriji [W],
- $\Phi_{sol,mn,k}$ - prosječni toplotni fluks od solarnog zračenja kroz k-ti građevinski dio u grijani prostor [W],
- $\Phi_{sol,mn,u,l}$ - prosječni toplotni fluks od solarnog zračenja kroz l-ti građevinski dio u susjedni grijani prostor [W] i
- t - dužina sezone grijanja [čas].

Srednji toplotni tok od solarnog zračenja kroz građevinski dio zgrade proračunava se pomoću formule (12),

$$\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} - F_{r,k} \cdot \Phi_{r,k}, \quad (12)$$

gdje su:

- $F_{sh,ob,k}$ - faktor zasjenčenja usljed spoljnih prepreka direktnom padu sunčevog zračenja površine k ,
- $I_{sol,k}$ - srednji toplotni tok od solarnog zračenja na površinu građevinskog dijela k [W/m²],
- $A_{sol,k}$ - efektivna površina otvora k na koju upada solarno zračenje [m²],
- $\Phi_{r,k}$ - toplotni tok zračenja od površine otvora k prema nebu [W] i
- $F_{r,k}$ - faktor oblika između otvora k i neba.

Vrijednosti dobijene proračunom za ukupne unutrašnje dobitke prikazani su tabelom (II), dok su ukupni solarni dobitci prikazani tabelom (III).

TABELA II. UNUTRAŠNJI DOBITCI TOPLOTE

Površina	Q_{int} [kWh/a]
Stari objekat prizemlje	1164,90
Stari objekat sprat	1164,90
Novi objekat prizemlje	2060,50
Novi objekat I sprat	1628,20
Novi objekat II sprat	1125,00
Ukupno	7143,50

Faktor iskorištenja dobitaka toplote za period grijanja računa se prema jednoj od navedenih formula (13), (14) i (15):

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{\alpha_H}}{1 - \gamma_H^{\alpha_H + 1}} \text{ za } \gamma_H > 0 \text{ i } \gamma_H \neq 1, \quad (13)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{\alpha_H}{\alpha_H + 1} \text{ za } \gamma_H = 1, \quad (14)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{1}{\gamma_H} \text{ za } \gamma_H < 0, \quad (15)$$

pri čemu su:

- γ_H - bezdimenzioni odnos toplotnog bilansa u režimu grijanja koji se računa po formuli (16),

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad (16)$$

- α_H - bezdimenzioni numerički parametar koji se računa pomoću formule (17),

$$\alpha_H = \alpha_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}}. \quad (17)$$

TABELA III. SOLARNI DOBITCI TOPLOTE

Q_{sol} okt.	Q_{sol} nov.	Q_{sol} dec.	Q_{sol} jan.	Q_{sol} feb.	Q_{sol} mar.	Q_{sol} apr.	[kWh/ mjesec]
3921,20	3985,57	3047,51	3799,58	5618,58	8094,54	4697,30	
Q_{sol} ukupno za sezonu grijanja						33,16	[MWh/a]

TABELA IV. BEZDIMENZIONI NUMERIČKI PARAMETAR

$a_{H,0}$	1
$\tau_{H,0}$	15
τ	16,1299
a_H	2,07533

Bezdimenzioni numerički parametar a_H , prikazan tabelom (IV), zavisi od vrijednosti vremenske konstante, pri čemu su:

- $a_{H,0}$ - numerički parametar zavisn od metode proračuna, za mjesečni $a_{H,0} = 1$, za sezonski $a_{H,0} = 0,8$,
- $\tau_{H,0}$ - konstanta zavisna od metode računanja [h], za mjesečni proračun $\tau_{H,0} = 15$, a za sezonski $\tau_{H,0} = 30$,
- C_m - dinamički toplotni kapacitet [J/K] i
- τ - vremenska konstanta [h], koja se računa pomoću formule (18),

$$\tau = \frac{C_m / 3600}{H_{tr} + H_{ve}}. \quad (18)$$

Godišnja potrebna energija za grijanje za sisteme koji rade sa prekidom $Q_{H,nd,interm}$ [kWh/a] računa se prema formuli (19), a proračunom dobijene vrijednosti prikazane su tabelom (V):

$$Q_{H,nd,interm} = \alpha_{H,red} \cdot Q_{H,nd,cont}, \quad (19)$$

pri čemu su:

- $\alpha_{H,red}$ - bezdimenzioni faktor redukcije u zagrijavanju koji se računa prema formuli (20) i
- $f_{H,hr}$ - odnos broja sati rada sistema za grijanje u toku sedmice prema ukupnom broju sati u sedmici,

$$\alpha_{H,red} = 1 - 3 \cdot (\tau_{H,0} / \tau) \cdot \gamma_H (1 - f_{H,hr}). \quad (20)$$

Temperature negrijanih prostora su definisane pomoću formule (21),

$$\theta_u = \frac{\Phi_U + \theta_i (H_{Tr,iu} + H_{Ve,iu}) + \theta_e (H_{Tr,ue} + H_{Ve,ue})}{H_{Tr,iu} + H_{Ve,iu} + H_{Tr,ue} + H_{Ve,ue}}. \quad (21)$$

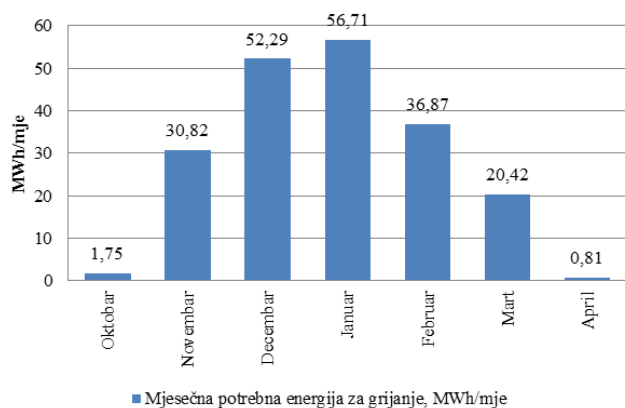
TABELA V. GODIŠNJA POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE

Mjesec	Okt.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
Q_{sol} [kWh]	3921	3985	3047	3799	5618	8094	4697
Q_{int} [kWh]	653	1176	1219	1219	1088	1219	566
$Q_{H,gn}$ [kWh]	4574	5161	4267	5019	6707	9314	5263
$Q_{H,ht}$ [kWh]	12367	45673	65020	71633	56081	45306	12489
γ_H	0,37	0,11	0,07	0,07	0,12	0,21	0,42
$\eta_{H,gn}$	0,92	0,99	1,00	1,00	0,99	0,97	0,90
QH_{nd} [MWh]	8,18	40,56	60,77	66,63	49,45	36,27	7,77
$a_{H,red}$	0,21	0,76	0,86	0,85	0,75	0,56	0,10
$Q_{H,nd,interm}$	1,75	30,82	52,29	56,71	36,87	20,42	0,81
Ukupno za sezonu grijanja $Q_{H,nd,interm}$ [MWh/a]						199,7	

Nepoznati članovi formule (21) su:

- Φ_U - toplotni tok negrijanog prostora od unutrašnjih toplotnih izvora ili solarnih dobitaka [W],
- θ_i - unutrašnja projektna temperatura [°C] i
- θ_e - spoljna projektna temperatura [°C].

Godišnja potrebna energija za grijanje predstavljena je u vidu dijagrama po mjesečnim vrijednostima na sl. 1.



Sl. 1. Mjesečna potrebna energija za grijanje

Definisanje energetske klase objekta izvršeno je prema [3], a objekat je konkretno energetske klase „G“, sl. 2.

Emisija zagađivača CO₂ može biti direktna i indirektna. Direktna emisija CO₂ nastaju na lokaciji neposredne potrošnje energije, a indirektna emisija CO₂ nastaju pri korištenju električne energije ili toplotne energije iz javnih toplana [2].

Indirektna emisija CO₂ računaju se pomoću formule (22),

$$EM = AD \cdot EF, \quad (22)$$

pri čemu su:

- EM - emisija CO₂ [kg/a],
- AD - količina potrošene električne energije [kWh/a] i
- EF - specifični faktor emisije CO₂ za električnu energiju [kg CO₂/kWh].

Trenutni sistem grijanja, predstavljen detaljnije tabelom (VI), proizvodi ≈150 tona CO₂ tokom jedne grejne sezone.

TABELA VI. VRSTA, SNAGA I BROJ POSTOJEĆIH GREJNIH TIJELA

RB.	Uređaj	Komada	Snaga [W]
1	Kvarcna peć	4	3000
2	TA peć	8	3000
3	TA peć	10	4000
4	TA peć	7	6000
5	Uljeni radiator	7	2000
6	Grijalica	5	2000
7	Klima-split	32	570

Energetska klasa	$Q_{H,nd,rel}$ [%]	$Q_{H,nd}$ [kWh/(m ² a)]
A+	≤ 15	≤ 8
A	≤ 25	≤ 14
B	≤ 50	≤ 28
C	≤ 100	≤ 55
D	≤ 150	≤ 83
E	≤ 200	≤ 110
F	≤ 250	≤ 138
G	> 250	> 138

Sl. 2. Energetske klase za nestambene zgrade namijenjene za obavljanje javnih administrativnih poslova i poslovne zgrade [3]

III. PRORAČUN KAPACITETA SISTEMA GRIJANJA

Proračun kapaciteta novog sistema grijanja, to jest snaga izvora toplote, definisana je prema [4]. Ukupni toplotni gubici, transmisijni i ventilacioni, za spoljnu projektnu temperaturu $\theta_e = -6$ [°C] i unutrašnju projektnu temperaturu $\theta_{int,i} = 20$ [°C], definisani su prema formulama (23) i (24),

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e), \quad (23)$$

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e), \quad (24)$$

gdje su:

- $H_{T,ie}$ - koeficijent transmisijnih gubitaka kroz omotač prema vanjskoj okolini [W/K],
- $H_{T,iue}$ - koeficijent transmisijnog gubitka kroz negrijane prostorije prema vanjskoj okolini [W/K],
- $H_{T,ig}$ - koeficijent toplotnih gubitaka prema tlu [W/K],
- $H_{T,ij}$ - koeficijent toplotnih gubitaka prema susjednim zgradama [W/K] i
- $H_{V,i}$ - koeficijent ventilacionih gubitaka toplote [W/K].

Proračun gubitaka toplote za definisanje kapaciteta sistema grijanja prema [4], ima analogiju kao već urađeni proračun za godišnju potrebnu energiju (izuzetak su gubici toplote kroz pod), pa su date samo konačne vrijednosti zbog same obimnosti rada. Pored dobijenih transmisijnih i ventilacionih gubitaka neophodno je uzeti u obzir i dodatak zbog prekida u grijanju, koji se definiše pomoću formule (25),

$$\Phi_{RH,i} = A_i \cdot f_{RH}, \quad (25)$$

gdje su:

- A_i - neto površina poda grijanog dijela objekta [m²],
- f_{RH} - korekcionni faktor koji je u zavisnosti od vremena ponovnog zagrijavanja i pretpostavljenog pada unutrašnje temperature tokom prekida rada.

Ukupni toplotni bilans računa se pomoću formule (26), a konačne vrijednosti gubitaka prikazane su tabelom (VII),

$$\Phi_{HL} = \sum \Phi_{T,i} + \sum \Phi_{V,i} + \sum \Phi_{RH,i}. \quad (26)$$

TABELA VII. TOPLOTNI KAPACITET SISTEMA GRIJANJA

A [m ²]	f_{RH}	Φ_{RH} [kW]	Φ_T [kW]	Φ_V [kW]	Φ_{HL} [kW]
1089,00	13	14,16	146,31	34,09	194,56

IV. ODABIR OPREME SISTEMA GRIJANJA NA BIOMASU

Na analiziranom objektu su podovi veoma istrošeni i zamjena navedenih je neophodna u skorijem periodu. Realizacija sistema grijanja je zamišljena tokom zamjene, to jest radova na podovima. Usvojen je sistem centralnog radijatorskog grijanja sa dvocijevnim razvodom mreže, gdje su cijevi položene u pod.

A. Toplovodni kotao na biomasu

Na osnovu gore navedenog kapaciteta koji treba zadovoljiti usvojen je toplovodni kotao na biomasu kapaciteta 200 [kW], proizvođača TOPLING d.o.o. Prnjavor.

B. Grejna tijela - radijatori

Da bi sistem grijanja zadovoljio očekivane parametre potrebna su 52 pločasta radijatora tipa PKP i PKKP, usvojenog proizvođača Metal-as d.o.o. Visoko. Već je navedeno da se objekat sastoji iz tri različito građene cjeline. Na svakom spratu, svakog navedenog dijela objekta, nalazi se ormar iz kojeg su napojena grejna tijela. Raspored grejnih tijela po ormarima prikazan je tabelom (VIII).

C. Pumpa, cjevovod i ekspanziona posuda

Razvodni ormari su od kotlovnice napojeni bakarnim cjevovodom, a dalje kroz pod su razvod i povrat izvedeni alupex cijevima promjera 16 [mm]. Dimenzionisanje pojedinih grana bakarne cijevne mreže nije prikazano zbog same obimnosti rada. Prikazane su samo konačne vrijednosti dobijene proračunom za odabir opreme.

Pumpa je usvojena na osnovu protoka vode i pada pritiska dobijenih proračunom. Maseni protok je $\dot{m} = 7797,6 [kg/h]$, a pad pritiska $\Delta p = 15160 [Pa]$, na osnovu čega je usvojena pumpa proizvođača Grundfos UPS 32-80.

Ekspanziona posuda je usvojena na osnovu ukupne zapremine vode u sistemu (1263 litre) i koeficijenta dilatacije ($K = 0,029$). Usvojena je ekspanziona posuda proizvođača CAL-PRO zapremine 50 litara.

TABELA VIII. RASPORED GREJNIH TIJELA I RAZVODNIH ORMARA

Br.	Prizemlje			I sprat			II sp.
	Tip-ZV1	Tip-ZV2	Tip-ZV3	Tip-ZV1	Tip-ZV2	Tip-ZV3	Tip-ZV2
1	PKKP 2000	PKP 1200	PKKP 2000	PKP 600	PKKP 800	PKP 1400	PKKP 800
2	PKKP 2000	PKP 1600	PKKP 2000	PKKP 1800	PKP 1400	PKP 1400	PKP 1400
3	PKKP 2000	PKP 1600	PKP 1400	PKKP 800	PKKP 1400	PKP 1400	PKP 1600
4	PKKP 1400	PKP 1600	PKKP 1800	PKKP 1000	PKKP 1400	PKP 1200	PKP 1600
5	PKKP 1400	PKKP 1200	PKP 1600	PKKP 800	PKKP 1800		PKKP 2000
6	PKKP 2000	PKKP 1200	PKP 1600	PKKP 2000	PKKP 2000		PKKP 2000
7	PKP 400	PKKP 1400	PKP 1600	PKKP 1400	PKKP 1200		PKKP 2000
8	PKP 400	PKP 1400	PKP 1600	PKKP 1400	PKKP 800		
9				PKKP 1400			

D. Potrošnja goriva

Proizvođač kotla daje određene preporuke vezane za gorivo, na primjer, samo pelet koji je napravljen od piljevine drveta je dozvoljen za loženje. Kalorijska moć peleta iznosi oko $H_g = 18000 [kJ/kg]$ ili $5 [kWh/kg]$. Radom je definisana godišnja potrebna energija za grijanje (sa prekidima) $Q_{H,nd,interm} \approx 200 [MWh/a]$, te se na osnovu formule (27) može definisati sezonska potrošnja goriva koja iznosi 40 tona peleta,

$$B = \frac{Q_{H,nd,interm}}{H_g}. \quad (27)$$

V. EKONOMSKA ANALIZA

Cilj ekonomske analize je prikazati realne troškove sistema na godišnjem nivou, kao i period otplate novih sistema grijanja. Prvenstveno je razmatran postojeći sistem grijanja, koji prema formuli (28) i trenutnim cijenama električne energije ($0,1486 [KM/kWh]$), godišnje troši $34720 [KM]$,

$$C_{g,el} = (Q_{H,nd,interm} \cdot C_{el}) + PDV, \quad (28)$$

pri čemu su:

- $C_{g,el}$ - godišnji troškovi postojećeg sistema grijanja sa električnom energijom kao energentom $[KM/a]$ i
- C_{el} - cijena električne energije (2019 g.) $[KM/kWh]$.

Sistem centralnog grijanja sa kotlovnicom u sklopu objekta koristio bi pelet kao energent. Pelet je skup, ali ekonomičniji od električne energije i usvaja se da nije zagađivač. Cijena peleta van sezone grijanja iznosi $\approx 300 [KM/t]$ i to je usvojeno daljim proračunom. Investicioni troškovi novog sistema prema poglavlju IV, sa pratećom opremom za regulaciju, dimnjakom, skladištem peleta, instalaterskim radovima, i slično, iznosi $C_{it} = 36883 [KM]$. Godišnji troškovi sistema sa biomasom pored cijene energenta uključuju i platu radnika koji bi opsluživao kotao, te prema formuli (29) iznose $15600 [KM]$,

$$C_{g,p} = (B \cdot C_p) + C_{pr}, \quad (29)$$

gdje su:

- $C_{g,p}$ - godišnji troškovi centralnog sistema grijanja sa peletom kao energentom $[KM/a]$,
- C_p - cijena peleta (2019 g.) $[KM/t]$ i
- C_{pr} - sezonska plata radnika koji bi održavao sistem.

Period otplate novoprojektovanog sistema predstavljen je formulom (30), pri čemu je godišnja ušteda sistema grijanja prikazana formulom (31):

$$T = \frac{C_{it}}{C_u}, \quad (30)$$

$$C_u = C_{g,el} - C_{g,p}, \quad (31)$$

gdje su:

- T - period otplate novog sistema $[god]$ i
- C_u - godišnja ušteda sa novim sistemom $[KM/a]$.

Prema navedenom, godišnja ušteda sa novim sistemom grijanja u poređenju sa postojećim iznosi 19120 [KM/a], na osnovu čega je period otplate sistema dvije godine.

Biomasa se usvaja kao obnovljivi izvor energije, te novom sistemu ide u korist smanjenje emisije CO₂ za 150 [t].

Zbog same lokacije objekta neophodno je definisati i drugu mogućnost kao alternativu, jer nije uvijek lako i jeftino snabdjeti pelet. Sistem grijanja sa toplotnom pumpom svakako treba analizirati, jer se potrošnja električne energije smanjuje drastično. Definisanje opreme u poglavlju IV se mora izvršiti ponovo, jer temperaturni režim kotla na pelet i toplotne pumpe nije isti.

Usvojena je toplotna pumpa proizvođača Carrier sa pratećom opremom i izvršene su neophodne izmjene na samoj cjevnoj mreži i grejnim elementima.

Investicioni troškovi za drugu varijantu iznose $C_{i2} = 106560$ [KM]. Godišnji servis i održavanje sistema iznose $C_{pr2} = 1000$ [KM/a]. Potrošnja električne energije prilikom rada uređaja, kako bi zadovoljio željene parametre, usvojena je prema podacima proizvođača. Prema navedenoj cijeni električne energije godišnji troškovi rada sistema centralnog grijanja sa toplotnom pumpom iznose $C_{g,tp} = 11200$ [KM].

Godišnja ušteda za varijantu 2 je $C_u = 23520$ [KM/a], na osnovu čega period otplate za varijantu 2 iznosi manje od 5 godina ($T_2 = 4,5$).

Emisija CO₂ je smanjena za više od 100 tona tokom grejne sezone, tačnije iznosi manje od 50 [t] godišnje.

VI. ZAKLJUČAK

Za usvojeni objekat izvršeno je prikupljanje neophodnih podataka na samom objektu na osnovu kojih je urađen proračun i definisan energetska razred. Energetski razred za navedeni objekat je kategorije G, što je veoma loše i svakako bi izolacija objekta bila neophodna, ali preliminarno je ocijenjeno da bi brži period otplate bio za sistem grijanja, koji je veoma neefikasan. Drugi proračun je definisao snagu sistema grijanja i razmatrana su dva energenta. Prva opcija je sistem centralnog grijanja sa kotlom na biomasu i period otplate za tu investiciju iznosi dvije godine, a smanjenje zagađenja emisijom CO₂ za 150 tona godišnje. Druga opcija je sistem grijanja sa toplotnom pumpom na električnu energiju i period otplate za tu investiciju iznosi manje od 5 godina. Smanjenje štetne emisije CO₂ za drugu varijantu je više od 100 tona za sezonu grijanja.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske, Službeni glasnik Republike Srpske, broj 30/15.
- [2] Pravilnik o metodologiji za izračunavanje energetskih karakteristika zgrada, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske, Službeni glasnik Republike Srpske, broj 30/15.
- [3] Pravilnik o vršenju energetskog pregleda zgrada i izdavanju energetskog sertifikata, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske, Službeni glasnik RS, broj 30/15.
- [4] Heating systems in buildings - Method for calculation of the design heat load (BAS EN 12831:2010)
- [5] B. Todorović, „Projektovanje postrojenja za centralno grejanje“, Mašinski fakultet, Beograd, deseto izdanje, maj 2005.



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2019

14 - 15. novembar, Banja Luka

Sesija B

Sesija B

Alen Gačić i Zoran Govedar

ŠUMSKE KULTURE KAO OBNOVLJIVI IZVOR ENERGIJE25

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić i Bojan Erceg

**ANALIZA PERFORMANSI SAMOSTALNIH FOTONAPONSKIH SISTEMA ZA NAPAJANJE
BAZNIH STANICA MOBILNE TELEFONIJE31**

Šumske kulture kao obnovljivi izvor energije

Alen Gačić¹, Zoran Govedar²

¹JPŠ Šume Republike Srpske, ŠG „Borja“ Teslić

²Univerzitet u Banjoj Luci, Šumarski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

alen.gacic@gmail.com, zoran.govedar@sf.unibl.org

Sažetak- Sve veći zahtjevi i potreba za energijom doveli su čovječanstvo u situaciju da se moraju tražiti alternativni izvori energije. Biomasa je jedan od izvora energije koji će u budućnosti imati prioritetnu ulogu u odnosu na već iscrpljene izvore energije. Šumske kulture, iako trenutno sa malim procentom učešća (5,47%) u ukupnoj površini zemljišta pod šumom, predstavljaju izvor sirovine za proizvodnju biomase. U ovom radu izložena je trenutna problematika gazdovanja ovim tipom šuma, a ujedno i putokaz za dobijanje sirovine za proizvodnju energije. Neophodno i nužno je sprovesti proredne sječe u šumskim kulturama, ne samo što se dobija određena korist u vidu biomase, već se utiče na skraćanje ophodnje, stvaraju se stabilnije i otpornije šume i poboljšavaju se i sve druge opštekorisne funkcije šuma. Takođe, veliko učešće visokih degradiranih šuma (1,95%), izdanačkih šuma (21,27%), površina podesnih za pošumljavanje (16,68%) i uzurpacija (1,95%), predstavlja polaznu osnovu za pretvaranje neproduktivnih šuma u šumske kulture, koje bi uz korektan i adekvatan pristup, bile izvor sve većim zahtjevima za biomasu u budućnosti a ujedno i rasterećenje prirodnih šuma.

Gljučne riječi – biomasa; šumske kulture; proredne sječe; mjere njege;

I. UVOD

Značaj šumske biomase kao obnovljivog izvora energije ukazuje na potrebu poznavanja kontinuiteta gazdovanja šumama (kontinuiteta prihoda i produkcije) kao osnovnog principa u šumarstvu, starog više od 200 godina. U novije vrijeme uvažavajući i druge funkcije šuma (ekološke i socijalne) ovaj princip se izražava kroz održivi razvoj šuma i u kontekstu obnovljivog izvora sirovine uz optimalno korišćenje potencijala šuma i šumskih staništa. Energetski potencijal neiskorišćene drvene biomase u svijetu 1987. godine iznosio je 1,2 milijarde tona ekvivalenata nafte godišnje [1]. Gajenje bioenergetskih plantaža kao šuma posebne namjene ima za glavni cilj proizvodnju obnovljivog izvora energije (biomase) čijim će korišćenjem u procesu sagorijevanja emisija gasova koji izazivaju efekte staklene bašte biti na ekološki prihvatljivom nivou, odnosno neće uzrokovati otopljanje klimata [2]. Šumska biomasa predstavlja potencijalni izvor energije koja se može dobiti kao toplotna, kogeneracijska, trigeneracijska i biogas [3]. Trupci, kao glavni šumski drveni sortimenti, ekonomski gledano, nisu isplativi da se koriste za proizvodnju energije. Šumska drvena biomasa u vidu ogevnog

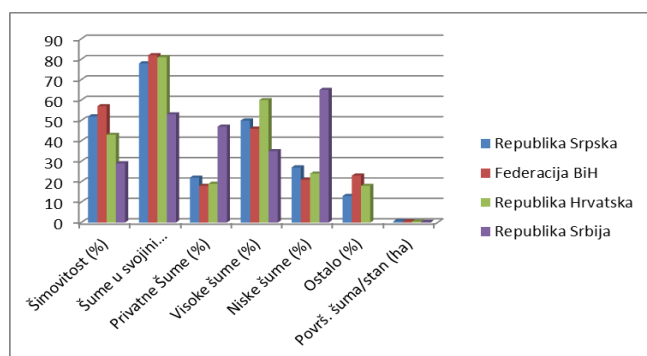
drveta, otpada od sječe stabala, otpada iz drvne industrije i dr. može biti važna sirovina za dobijanje energije. Savremeno doba zahtijeva gajenje tzv. energetskih plantaža i kultura kao specijalizovanih objekata za obnovljive izvore energije. To su intenzivno gajene sastojine (šume) iz kojih je cilj dobiti što veću količinu drvene zapremine za što kraće vrijeme i uz što manje troškove. Zbog toga se ove sastojine osnivaju od tzv. brzorastućih vrsta drveća (topola, vrba, bagrem i dr.), a zbog toga što one imaju specifičan proizvodni cilj one se nazivaju i šumama posebne namjene. Evidentne su prednosti šumske biomase kao izvora energije i scenario opravdanosti njenog korišćenja do 2050. godine [4]. Iako Bosna i Hercegovina u regionu (Hrvatska, Crna Gora i Srbija) najmanje koristi biomasu kao izvor energije [5], opravdanost korišćenja biomase kao izvora energije uočljiva je u Republici Srpskoj (gradske toplane u Gradišci i Banjoj Luci na bazi piljevine i pilanskog otpada, drvena sječka i dr.). Korišćenje šumske biomase kao obnovljivog izvora energije, dolazi do izražaja u svim kategorijama šuma [6] i u raznim oblicima sječa jer sa ekonomskog aspekta postoji mogućnost iveranja šumskog otpada kada se koriste najlošiji sortimenti koji inače imaju najmanju ekonomsku vrijednost. Šumske kulture u Republici Srpskoj (površine oko 65.000 ha) osnivane su uglavnom od četinarskih vrsta drveća (preko 95 %) a one predstavljaju značajan potencijal za korišćenje šumske biomase zbog velikog učešća grana i četina. Višegodišnje bioenergetske kulture, pored uticaja na tokove CO₂ i drugih plinova, povećavaju biodiverzitet, smanjuju pritisak na prirodne šume, poboljšavaju vodosnabdijevanje, stabiliziraju tlo (erozija), smanjuju transport hranjivih tvari, a za svoj uzgoj traže manje pesticida i herbicida. Cilj ovog rada je da se ukaže na mogućnosti korišćenja biomase iz šumskih kultura u svrhu proizvodnje energije.

II. DRVNA BIOMASA IZ ŠUMSKIH KULTURA KAO IZVOR ENERGIJE

Potencijal šumskog fonda BiH u odnosu na zemlje u okruženju je značajan u pogledu šumovitosti, zapremine i godišnjeg prirasta (Tabela 1.; Sl. 1.).

TABELA 1. Uporedni pokazatelji šumskog fonda entiteta BiH sa državama u okruženju (FAO, 2015)

	Republika Srpska	Federacija BiH	Republika Hrvatska	Republika Srbija
Šumovitost (%)	52	57	43	29
Šume u svojini država/entiteta (%)	78	82	81	53
Privatne šume (%)	22	18	19	47
Visoke šume (%)	50	46	60	35
Niske šume (%)	27	21	24	65
Ostalo (%)	13	23	18	-
Povr. šuma/stan. (ha)	0,7	0,6	0,5	0,3



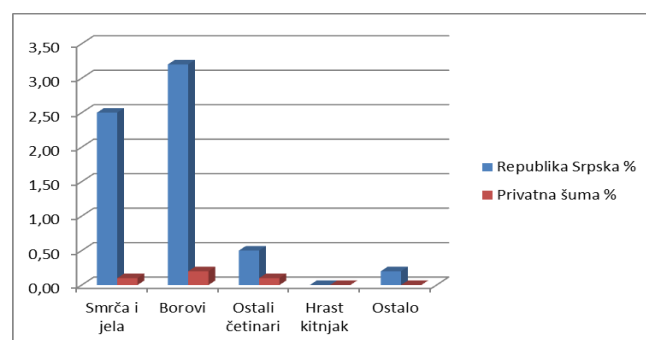
Sl. 1. Uporedni pokazatelji šumskog fonda entiteta BiH sa državama u okruženju (FAO, 2015)

Tehnologija proizvodnje biomase za energiju je uglavnom razvijena u zapadnoevropskim zemljama, dok se kod nas tek počinje sa razvojem ovih tehnoloških sistema. Osnivanje bioenergetskih plantaža od brzorastućih vrsta drveća kao intenzivnih zasada omogućava stvaranje održivih i ekološki opravdanih izvora obnovljive energije i sirovine za industriju, čime se smanjuje pritisak na prirodne šumske resurse. Glavni cilj intenzivnog gazdovanja i ulaganja u osnivanje bioenergetskih zasada je dobijanje što većeg prinosa drvene mase, pa se zbog toga ove sastojine često nazivaju lignikulturama. Ovako osnovane sastojine imaju posebnu, specifičnu namjenu i spadaju u šume posebne namjene. Njihov značaj se ogleda i u smanjivanju negativnih efekata

„gasova staklene bašte“ (GHG-greenhouse gases) i otopljanje klimata. Šumski fond Republike Srpske odlikuje se velikim površinama šumskih kultura (Tabela 2, Sl. 2), [7]-[8] koje nisu namjenski osnivane u ove svrhe i u kojima se nedovoljno provode šumskouzgojne mjere (prorede, orezivanje grana, ostaci nakon izrade šumskih drvnih sortimenata i dr.). One su uglavnom prepuštene spontanom razvoju i iz njih bi se potencijalno mogla obezbjediti značajna količina sirovine za biomasu.

TABELA 2. Stanje šumskih kultura Republike Srpske (Strategija razvoja šumarstva RS, 2011)

Kategorija šuma	Sastav vrsta drveća	Šume u svojini Republike Srpske		Privatne šume	
		Površina (ha)	%	Površina (ha)	%
Šumske kulture	Smrča i jela	24,485	2,5	308	0,1
	Borovi	31,258	3,2	432	0,2
	Ostali četinari	4,834	0,5	253	0,1
	Hrasta kitnjaka	404	0	1	0
	Ostalo	1,768	0,2	82	0
	Ukupno	62,749	6,4	1,076	0,4



Sl. 2. Stanje šumskih kultura Republike Srpske (Strategija razvoja šumarstva RS, 2011)

Šumske kulture se nalaze uglavnom u razvojnim fazama mladika i letvenjaka (srednje dobi) jer su osnivane uglavnom šezdesetih i sedamdesetih godina prošloga vijeka. Često su ugrožene zbog neprovođenja mjera njege pa stradaju od abiotičkih faktora (Sl. 3). U njima je potrebno vršiti intenzivne prorede a prethodni prinos zbog relativno lošijeg kvaliteta bi se mogao koristiti kao sirovina za bioenergiju (Sl. 4).



Sl. 3. Štete od abiotičkih faktora



Sl. 5. Šumska kultura bagrema



Sl. 4. Biomasa iz šumske kulture smrče nakon proreda i orezivanja grana

Šumska drvena biomasa se trenutno kod nas najviše koristi kao ogrevno drvo za proizvodnju toplotne energije, iako današnja tehnologija pruža mogućnosti za preradu drveta u različite proizvode koji imaju veću energetske efikasnost. Ogrevno drvo za domaćinstva potiče uglavnom od lišćarskih vrsta (bukva, hrast, grab i dr.). Te vrste imaju različitu kaloričnu snagu i obično se ne koriste za osnivanje šumskih kultura i plantaža posebne namjene. Vrste drveća koje se koriste za energetske izdanačke plantaže klasifikovane su u sljedeće grupe:

- veoma pogodne: topola i vrba (i njihovi klonovi);
- provjerene: pajasen, brijest, jova, breza;
- perspektivne vrste, ali neprovjerene: lipa, vrste roda *Sorbus*.

To su energetske plantaže (lignikulture) koje se osnivaju kao kulture posebne namjene (Sl. 5), i one se odlikuju specifičnostima gajenja [9]:

- Gaje se u cilju povećanja produkcije drvene mase (biomase);
- Koriste se brzorastuće autohtone i alohtone vrste drveća;
- Osnivaju se, najčešće, selekcionisanim sadnim materijalom na zemljištima visokog proizvodnog potencijala;
- Gaje se u kratkoj ophodnji;
- Primjenjuju se intenzivne silvikulturne mjere.

III. UTVRĐIVANJE KOLIČINA BIOMASE IZ ŠUMSKIH KULTURA

Nekoliko autora se bavilo različitim aspektima procjene energetskeg potencijala šumske drvene biomase u Bosni i Hercegovini [10] ili njenim entitetima, te pitanjima energetskeg potencijala obnovljivih izvora energije. Prosječna drvena zapremina kod šumskih kultura i vještački podignutih sastojina iznosi 104,6 m³/ha, a tekući zapreminski prirast iznosi u prosjeku 6,9 m³/ha. Prosječno po hektaru etat iznosi 2,4 m³/ha. Neprovođenjem mjera njege u vidu proreda godišnje ostaje neiskorišćeno oko 380 000 m³ drvene mase. Prinos drvene mase u lignikulturama topola i vrba iznosi od 8 do 25 tona suve materije po hektaru godišnje. U njima se može ostvariti na kraju ophodnje zapremina i preko 300 m³/ha i dobiti vrlo zadovoljavajuće dimenzije stabala, sa izraženom sposobnošću vegetativne regeneracije [11]. Vrbe su veoma pogodne za osnivanje lignikultura jer imaju visok sadržaj celuloze u drvetu, visoku produkciju, zapreminski prirast veći od 10 m³/ha i ranu kulminaciju zapreminskog prirasta [12]. Bioenergetska plantaža uklanja se kada prinos biomase počne da

opada, a to je obično nakon 15 do 25 godina, jer je tada njeno dalje zadržavanje na istoj površini ekonomski neopravdano.

TABELA 3. Osnovni podaci o proizvodnosti sastojina vrbe i poljskog jasena u Srbiji

Stanište	Starost sastojine (god.)	V ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Iv ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Dg (cm)	Hs (m)
Prirodne visoke sastojine vrbe		198–333	2,2–9,9		
Vještački podignute sastojine vrbe		147–246	4,7–10,9		
Izdanačke sastojine vrbe		199	6,7		
Poljskog jasena	21	224	-	33,8	23,2

Kamion pun sječke (drvnog čipsa) dobijenih od grana i ovršaka stabala iz kulture, neposredno nakon sječe stabla sadrže najmanje 50 % od ukupne mase, tako da 20 tona utovarene biomase na kamionu je zapravo 10 tona suve materije, a 10 tona čini voda u biomasi. U procesu sagorjevanja ova masa bi imala energetski sadržaj oko 150 GJ.

Međutim, ukoliko bismo na isti kamion utovarili istu zapreminu drvnog čipsa ali ovaj put izrađenog na međustovarištu nakon što su grane i ovršci prethodno ostavljeni nekoliko sedmica da se prirodno isuše na oko 20 % sadržaja vlage, onda bi suva materija tovara ponovo iznosila 10 tona, ali učešće vode bi bilo svega 2,5 tona. U ovom slučaju je energetski sadržaj tovara veći i iznosio bi oko 175 GJ, a istovremeno je laganiji za transport. Takođe, samim tim što je suvlja, biomasa efikasnije sagorjeva. Prema tome, troškovi prevoza po energetskoj mjernoj jedinici (GJ) su manji što je manji sadržaj vlage u biomasi.

U šumskim kulturama četinaru danas postoji visokomehanizovani način sječe i izrade šumskih drvnih sortimenata pomoću harvesteru. U zemljama u kojima je upotreba harvesteru najdalje otišla uglavnom se radi o jednodobnim sastojinama četinaru kojima se gazduje prorednim i čistim sječama. U čistim sječama četinaru harvesterom se ostvaruje godišnji učinak do 40.000 m^3 [13]. U cilju efikasnosti pri korišćenju biomase iz šuma razvijeni su specijalni harvesteri koji kombinuju sječu, usitnjavanje i transport biomase za energiju. Takav je Valmet 801 Bioenergy Combi koji kombinuje harvester i iverač (Sl. 6.). Najefikasnija primjena mu je u proredama u plantažama.



Sl. 6. Valmet 801 Bioenergy Combi

Ogrevna vrijednost i sadržaj pepela kod različitih vrsta dječica kreće se u širokim granicama (Tabela 4).

TABELA 4. Ogrevna vrijednost po vrstama drveta

Vrsta Drveta	Ogrevna vrijednost		
	1 m^3 zapremine (kWh)	po 1 m^3 slož. (kWh)	po 1 kg (kWh)
Breza	2700	1900	4,3
Bukva, grab	2800	2100	4
Hrast	2900	2100	4,2
Jasen	2900	2100	4,2
Jablan, topola	1700	1200	4,1
Brijest	2800	1900	4,1
Vrba	2000	1400	4,1
Smreka	2100	1500	4,5
Bor, ariš	2300	1700	4,4
Jela	2000	1400	4,5

Lignikulture kratkih ophodnji (kratkog produkcionog perioda) i specijalne namjene za proizvodnju šumske biomase za energiju imaju relativno visok sadržaj pepela jer se osnivaju od vrsta sa drvnom supstancom bogatom hemijskim elementima i mineralima. Tako je maseni udio elemenata u apsolutno suvoj biomasi u njima sledeći: C – 47 do 51 %, H – 5,8 do 6,7 %, O – 40 do 46 %, N – 0,2 do 0,8 %, S – 0,02 do 0,1 %, Cl < 0,05 %. Takođe je za ove kulture karakteristična donja ogrevna vrijednost koja se kreće od 18,6 do 19,2 MJ/kg a sadržaj pepela nakon izgaranja je oko 2,0 %. U novije vrijeme zagovara se osivanje kultura miskantusa (Sl. 7.) koji ima slične osobine u pogledu masenog udjela elemenata ali sa znatno većim učešćem sumpora i hlora ali mu je manja ogrevna vrijednost (17,6 MJ/kg) i znatno veći sadržaj pepela (3,9 %). Druga značajnija alohtona vrsta koja se nastoji gajiti je paulovnia (hibrid vrsta *tomentose* i *fortunei*) koja se smatra najbrže rastućom vrstom drveta u svijetu (Sl. 8.). Može imati tekući visinski prirast čak 6,0 m i za samo nekoliko godina (5-6 godina) dostići prsni prečnik oko 40 cm. Njene kulture se osnivaju između ostalog i zbog velike mogućnosti

apsorpcije CO₂ iz atmosfere (10 puta više od drugih drvenastih vrsta) u procesu fotosinteze pa su značajne za borbu protiv otopljanja klimata odnosno sekvestraciju ugljenika. Kalorična vrijednost biomase od paulovnije je nešto veća od pedeset posto kalorične vrijednosti ugljena, ali je znatno manji zagađivač jer emituje manje sumpora. Njena ogreivna vrijednost suve drvene supstance je 17-19 MJ/kg, odnosno 4000-4500 kal/kg.



Sl. 7. Kultura miskantusa



Sl. 8. Plantaža Paulovnie

IV. DISKUSIJA

Podizanje kultura brzorastućih vrsta može imati opravdanje u slučajevima postojanja tržišta biomase, prihvatljive prodajne cijene i ograničenih troškova transporta (radijus do 30 km od instaliranog pogona korištenja biomase).

Iako postoje objektivna ograničenja koja otežavaju korišćenje šumske biomase za energiju, ona ne predstavljaju neprelazne prepreke ali podrazumjevaju njihovo postepeno, sistematsko i dugoročno otklanjanje. Tako ŠPO kao planski dokumenti u šumarstvu za jedan uređajni period (10 godina), podrazumjeva planiranu realizaciju etata kako po

količini tako i po kvalitetu, na ŠPP uz poštovanje principa kontinuiteta gazdovanja šumama. Pored navedenog potrebno je uskladiti s jedne strane proizvodnju biomase (uzgojno šumarstvo) uz prethodno razvijenu rasadničku proizvodnju (količina, kvalitet i vrsta sadnog materijala), prirodnu regeneraciju i njegu šuma (sistemi gazdovanja šumama) sa kapacitetima i mogućnostima za korišćenje šumske biomase za energiju, s druge strane. Intenziviranje korišćenja šumske biomase podrazumjeva uvođenje modernih tehnoloških rješenja i mašina (harvesteri, forvarderi i dr.), za šta ne postoje adekvatni ljudski resursi za rukovanje ovim mašinama, a putna mreža je nezadovoljavajuća za njihovu intenzivnu primjenu.

Takođe, za razvoj korišćenja šumske biomase za energiju potrebna su značajna finansijska sredstva kako za modernizaciju tehnoloških postupaka tako i za uzgoj postojećih i novih šuma koje bi bile namjenjene za proizvodnju biomase za energiju.

Pored prednosti upotrebe biomase, njeno korištenje je vezano i za nedostatke. Neki od njih su periodičnost u nastanku biomase, razućenost u prostoru, otežano sakupljanje, velike investicije u opremu za skladištenje, nepovoljan oblik, visok sadržaj vlage i dr. Jedna od prepreka širem korištenju biomase je i nedostatak stručnog kadra iz ove oblasti (tehnologija prikupljanja i obrade stajnjaka, izgradnja postrojenja za proizvodnju i eksploataciju biogasa) i ekološka svijest stanovništva, koja je na niskom nivou. Ipak postrojenja za proizvodnju energije na osnovu šumske biomase mogla bi da predstavljaju budućnost za razvoj privrede Republike Srpske ako bi se dugoročno, studiozno i uz odgovarajuće realne investicije pristupilo realizaciji projekata proizvodnje i korišćenja biomase za energiju.

Mjerama njege odnosno proredama u budućnosti bi doprinijeli popravljaju stanja, posebno kvaliteta i produktivnosti tih šuma u pretpostavljenoj dinamici na površini 2000 – 3000 ha/god.

Ovakvo stanje šumskih kultura, ukazuje na neminovnu činjenicu da je potrebno vršiti uzgojne zahvate, prije svega prorede, koje bi pored višestrukih pozitivnih stvari za samu kulturu, obezbijedili i biomasu za proizvodnju energije. Ima veliki broj površina koje ne koriste proizvodni potencijal na odgovarajući način i to treba da bude jedan od osnova za dobijanje biomase a ujedno i da se rasterete prirodne šume. Na takvim površinama formirati odgovarajuće šumske kulture koje bi mogle poslužiti u svrhu energetske proizvodnje.

V. ZAKLJUČAK

Na osnovu istraživanja u ovom radu, može se zaključiti sledeće:

- Šumske kulture u Republici Srpskoj predstavljaju značajan izvor šumske biomase kao obnovljivog izvora energije.
- Biomasa iz šumskih kultura je relativno lošeg tehničkog kvaliteta i iz nje se danas uglavnom ne mogu dobiti šumski sortimenti visokog kvaliteta (pilanski trupci, furnirski i trupci za ljuštenje), već je to uglavnom sirovina lošijeg kvaliteta koja može da se koristi kao biomasa za proizvodnju energije.
- Biomasa iz šumskih kultura može se dobijati na osnovu realizacije uzgojnih mjera (prorede i orezivanje grana) u planskom obimu na ukupnoj površini oko 2000 ha godišnje u Republici Srpskoj.
- Potrebno je osnivati specijalizovane kulture i plantaže posebne namjene za proizvodnju šumske biomase za bioenergiju od brzorastućih vrsta (vrba, topola, paulovnia i dr.) na odgovarajućim staništima.

LITERATURA

- [1] Hakkila, P. (1987): Korišćenje biomase stabala iz prorednih sastojina (Utilisation of tree biomass from thinning assortments), Yugoslav agriculture-forestry centre, Utilisation of forest biomass for energetics, Information for technique and technology in forestry, Volume II, pages 7-18.
- [2] **Govedar, Z.**, Marčeta, D., Keren, S., Jokanović, D., Mičić, N., Đurić, G., Jotanović, S., Kondić, D., Bosančić, B., Radun, M., Pašalić, N., Granić, G., Jelavić, B., Kulišić, B., Vorkapić, V. (2015): Biomasa kao obnovljivi izvor energije. Univerzitet u Banjoj Luci, Institut za genetičke resurse, ISBN 978-99976-655-0-8, str. 1-143, Banja Luka.
- [3] Čupin, N., „Iskustva u korištenju šumske biomase“, Udruga za razvoj Hrvatske (URH), 2015.
- [4] Konrad, R., „Erfahrungen bei der Biomassenutzung zu energetischen Zwecken in Baden-Württemberg“, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2015.
- [5] Macura, A., „Framework conditions for biomass utilization“, Regional bioenergy workshop, 2015.

- [6] Vorkapić, A., „Korišćenje šumske biomase iz oplodnih seča u brdsko-planinskim uslovima“, JP „Srbijašume“ Beograd.
- [7] JPŠ „Šume Republike Srpske“, izvor Google
- [8] Program korišćenja šumske biomase iz šuma Republike Srpske, Banja Luka, 2013.
- [9] Govedar, Z., Krstić, M. (2016): Gajenje šuma posebne namjene. Univerzitet u Banjoj Luci, Šumarski fakultet, Banja Luka.
- [10] Jovanović, B., Gurda, S., Musić, J., Bajrić, M., Lojo, A., Vojniković, S., Čabaravdić, A. „Šumska biomasa-potencijalni izvor obnovljive energije u Bosni i Hercegovini“, Šumarski fakultet univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 2005.
- [11] Herpka, I. (1979): Ekološke i biološke osnove autohtonih topola i vrba u ritskim šumama podunavlja. Radovi, Institut za topolarstvo, knj. 7, Novi Sad.
- [12] Tomović, Z., Janjatović, G., Seratlić, B. (2007): Proizvodno-ekonomski potencijal topola i vrba u šumskom fondu javnog preduzeća „Vojvodinašume“. Šumarstvo, br. 3-4, str. 109-118.
- [13] Krpan A.P.B., T. Poršinsky (2004): Djelotvornost strojne sječe i izrade u sastojinama tvrdih i mekih listača-2. dio: Djelotvornost harvesteru u kulturi mekih listača, Šumarski list, br. 5-6, (233-244).

ABSTRACT

The increasing demands and need for energy are enough for humankind to find alternative energy sources. Biomass is one of the energy sources that will play a priority role in the future over already depleted energy sources. Forest crops, although currently with a small percentage (5.47%) of the total area lands under forest, are a source of raw material for biomass production. This paper presents the current problems of forest management, as well as a roadmap for obtaining raw materials for energy production. It is necessary to carry out deforestation in forest crops, not only gaining a certain benefit in the form of biomass, but also reducing the patency, creating more stable and resilient forests and improving all other generally useful forest functions. Also, the high percentage of high degraded forests (1.95%), coppice forests (21.27%), areas suitable for afforestation (16.68%) and usurpations (1.95%) is the starting point for the conversion of unproductive forests into forest crops, which, with a fair and adequate approach, would be a source of increasing demands for biomass in the future, as well as relieving natural forests.

Keywords - biomass; forest cultures; logging; care measures;

Forest crops as a renewable energy source

Alen Gačić, Zoran Govedar

alen.gacic@gmail.com; zoran.govedar@sf.unibl.org

Analiza performansi samostalnih fotonaponskih sistema za napajanje baznih stanica mobilne telefonije

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—U ovom radu je teorijski opisan i softverski implementiran metod za analizu performansi samostalnih fotonaponskih sistema, baziran na sekvencijalnoj *Monte Carlo* simulaciji. Metod je testiran na primjeru napajanja bazne stanice mobilne telefonije. Rezultati simulacija pokazuju koliko se godišnje iskoristi solarne energije, koliko časova u toku godine je neophodno angažovati dizel agregat, zatim koliko energije se utroši na hlađenje itd., te mogu da posluže kod tehnno-ekonomske ocjene kvaliteta odabranog rješenja za napajanje bazne stanice.

Ključne riječi—fotonaponski sistemi; bazna stanica mobilne telefonije; sekvencijalna *Monte Carlo* simulacija.

I. UVOD

Cijene fotonaponskih modula, energetske pretvarača i baterija za skladištenje električne energije kontinuirano opadaju [1]. Iako je kilovat-čas koji je proizveden samostalnim sistemom i dalje značajno skuplji od kilovat-časa iz mrežno povezanog sistema, samostalni sistemi mogu biti isplativi na lokacijama koje su veoma udaljene od postojeće distributivne mreže [2]. Upotreba samostalnih sistema je posebno atraktivna u nerazvijenim zemljama, jer na primjer u Africi 600 miliona ljudi u današnjem trenutku nema pristup električnoj energiji. U razvijenim zemljama stepen elektrifikacije je mnogo veći, ali uprkos tome postoje slučajevi gdje je adekvatno primijeniti samostalne sisteme napajanja, kao npr. u udaljenim nacionalnim parkovima, odmoristima na auto-putevima itd.

Karakterističan primjer upotrebe samostalnih fotonaponskih sistema predstavlja napajanje baznih stanica mobilne telefonije. Ovakav zadatak ima smisla, jer se može ispostaviti da je bazne stanice pozicionirane na planinskim uzvišenjima, nekada jeftinije napajati iz samostalnog sistema, nego praviti dalekovod velike dužine. Ispostavlja se da je to zanimljiv problem, kako u pogledu dimenzionisanja sistema napajanja [3], tako i u pogledu optimalnog upravljanja potrošnjom u svrhu uštede energije [4]-[6].

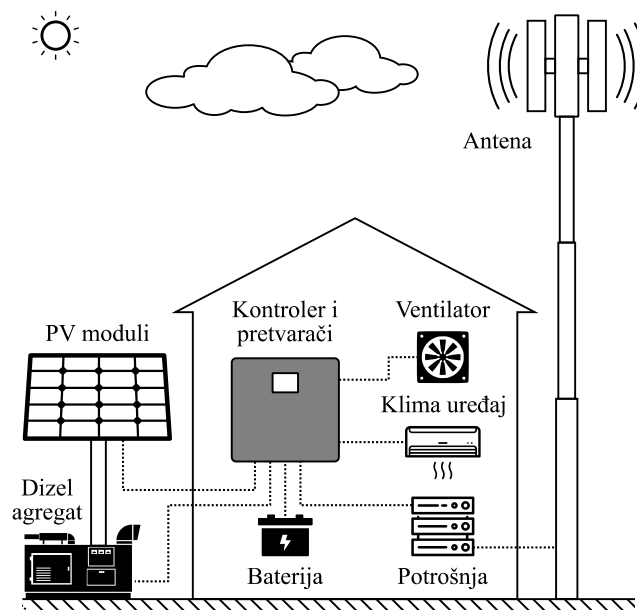
Kvalitetno dimenzionisanje sistema podrazumijeva optimalno određivanje snage obnovljivih izvora energije, kapaciteta baterije i snage generatora za rezervno napajanje, te izbor efikasnog načina upravljanja. U literaturi su predloženi različiti postupci za ovu svrhu, a tipično su bazirani na determinističkim [7] ili heurističkim principima [8]. Postoje i stohastički metodi, ali se u njima najčešće upotrebljavaju nesekvencijalne simulacione metode [9]. Navedenim metodima nije moguće sveobuhvatno testiranje rada sistema i praćenje važnih promjenljivih u vremenu, kao što su npr. promjena stanja napunjenosti baterije, broj ciklusa punjenja i

pražnjenja, temperatura unutar objekta sa telekomunikacionom opremom itd. Nasuprot tome, sekvencijalna *Monte Carlo* simulacija predstavlja numerički zahtjevniji, ali znatno moćniji metod, kojim se najbolje oponaša realnost i koji omogućava praćenje vremenske promjene veličina od interesa.

U ovom radu je razvijena platforma za simulaciju samostalnih fotonaponskih sistema na bazi sekvencijalne *Monte Carlo* metode. Ovakav alat može biti iskorišćen za tehnno-ekonomsko vrednovanje projekata napajanja baznih stanica mobilne telefonije, ali i napajanja drugih izolovanih potrošača.

II. OPIS I MODELOVANJE SISTEMA

Skica bazne stanice mobilne telefonije na kojoj su uočljivi osnovni funkcionalni elementi prikazana je na slici 1. Potrošnja se primarno napaja iz fotonaponskih modula, preko odgovarajućeg DC-DC pretvarača sa ugrađenom MPPT funkcijom. Kada su potrebe za potrošnjom zadovoljene, eventualni višak električne energije se koristi za punjenje baterije. Ukoliko raspoloživa energija iz fotonaponskih modula ipak nije dovoljna, nedostatak se pokriva iz baterije. U slučaju nepovoljnih meteoroloških uslova izraženih kroz višednevni manjak insolacije i pojavu pražnjenja baterije do minimalno dozvoljenog praga, koristi se dizel agregat kao rezervno napajanje.



Sl. 1. Osnovni elementi samostalnog sistema za napajanje bazne stanice.

Osnovnu potrošnju u baznoj stanici predstavlja telekomunikaciona oprema. Predviđeni napon napajanja je 48 V DC, tako da se elektronika može direktno vezivati na bateriju bez upotrebe invertora. Klima uređaj i motor ventilatora rade na 220 V AC, te je prema tome neophodan DC-AC pretvarač u režimu kada se napajanje vrši iz fotonaponskog sistema. Kada se uključi dizel agregat moguće je izvesti da se potrošači naizmjenične struje prespoje na sabirnice generatora, čime bi se izbjegla neefikasna dvostruka konverzija energije.

U sekundarnu, ali neophodnu potrošnju, ubrajamo uređaje za hlađenje. Kada su vanjske temperature visoke, za odvođenje toplote iz objekta koristi se klima uređaj. U slučajevima kada su vanjske temperature relativno niske (npr. tokom ljetnih noći ili tokom zime praktično stalno), moguće je koristiti ventilator za slobodno hlađenje, kao uređaj koji troši znatno manje energije [4].

A. Model fotonaponskog izvora

Snaga fotonaponskog izvora prvenstveno zavisi od iradijancije i temperature. Izračunavanje raspoložive DC snage P_{PV} obavljamo u skladu sa metodologijom američke laboratorije NREL [11].

B. Model dizel agregata

U ovom radu dizel agregat ćemo posmatrati kao generator konstantne snage P_D , koja je jednaka nominalnoj snazi $P_{D,nom}$.

C. Model baterije

Osnovne činjenice o kojima treba voditi računa kod modelovanja baterije su kapacitet baterije, brzina i efikasnost punjenja, te uticaj samopražnjenja. Kapacitet baterije kao mjera energije koja se može uskladištiti u bateriji izražava se u vat-časovima (Wh) ili, još češće, u amper-časovima (Ah). U funkciji temperature baterije T_{bat} , dostupni kapacitet baterije C'_{bat} dat je izrazom:

$$C'_{bat} = C_{bat} [1 + \delta_C (T_{bat} - 25)], \quad (1)$$

gdje je C_{bat} nominalni kapacitet baterije ostvarljiv pri nominalnim uslovima (pri $T = 25^\circ\text{C}$), a δ_C temperaturni koeficijent, koji najčešće iznosi oko $0,6\%/^\circ\text{C}$ [8].

Trenutno stanje napunjenosti baterije obilježeno je akronimom SOC (od engl. *state of charge*). Da bi se odredilo stanje napunjenosti u aktuelnom trenutku $SOC(h)$ potrebno je znati informaciju o napunjenosti baterije na početku posmatranog intervala $SOC(h-1)$, struju punjenja/pražnjenja I_{bat} i efikasnost konverzije η_{bat} . Takođe, u formuli će participirati i stepen samopražnjenja baterije σ , koji zavisi od napunjenosti i zdravlja baterije i čija preporučena vrijednost iznosi $0,2\%$ po danu [8]. Uz uvažavanje svih relevantnih činjenica, stanje napunjenosti baterije se računa na osnovu sljedećeg izraza:

$$SOC(h) = SOC(h-1) \times \left(1 - \frac{\sigma \times \Delta t}{24}\right) + \frac{I_{bat}(h) \times \Delta t \times \eta_{bat}}{C'_{bat}}. \quad (2)$$

Struja punjenja baterije se računa kao:

$$I_{bat}(h) = \frac{P_{PV}(h) + P_D(h) - P_P(h)}{U_{bat}(h)}, \quad (3)$$

gdje je P_P ukupna snaga svih priključenih potrošača, a U_{bat} napon baterije.

U slučajevima kada se dobija prevelika vrijednost struje, koja bi mogla da ošteti bateriju, struja se pomoću kontrolera punjenja ograničava na $I_{bat,max}$. Punjenje se završava kada SOC dostigne vrijednost 1, dok se pražnjenje stopira prije vrijednosti $SOC = 0$, pri preporučenoj vrijednosti SOC_{min} , da bi se izbjeglo neželjeno skraćenje životnog vijeka baterije.

D. Model potrošnje telekomunikacione opreme

Napon napajanja elektronske opreme je 48 V DC. Prosječna snaga potrošnje zavisi od složenosti stanice odnosno broja ugrađenih funkcija i tipično se kreće od oko pola kilovata do reda nekoliko kilovata. Pokazuje se da je potrošnja prilično konstantna u vremenu, te da ispoljava samo blage varijacije koje zavise od intenziteta telekomunikacionog saobraćaja [12]. Primjera radi, u jednodnevnom test mjerenju izvršenom na baznoj stanici kod Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci, utvrđeno je da prosječna snaga iznosi $2,55 \text{ kW}$, a relativna standardna devijacija $3,1\%$.

E. Model potrošnje klima uređaja

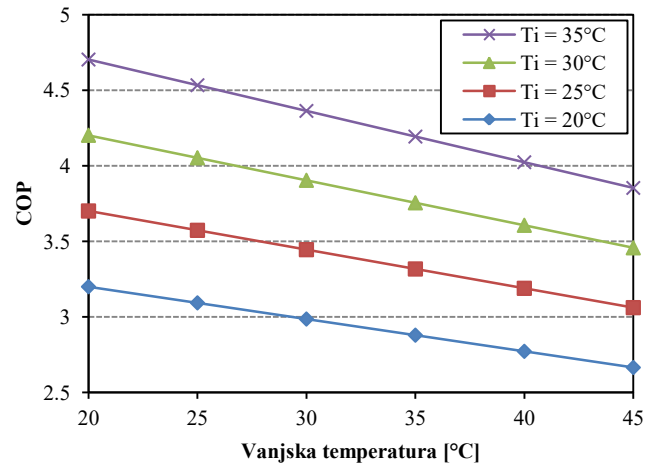
Klima uređaj je predviđen za rad na naizmjeničnom naponu od 220 V, a biće modelovan kao termostatski regulisan potrošač konstantne električne snage, čije vrijeme rada zavisi od termičkog bilansa, odnosno potrebe za hlađenjem. Učinak klima uređaja zavisi od režima, odnosno od toga u kojem odnosu su unutrašnja i vanjska temperatura. Količinu toplote koju klima uređaj odvede iz objekta određujemo na osnovu relacije:

$$Q_{KU} = COP \cdot P_{KU}, \quad (4)$$

gdje se koeficijent performansi (COP) procjenjuje po sljedećoj regresionoj formuli:

$$COP = a_0 + a_1 T_i + a_2 T_{amb} + a_3 T_i T_{amb}. \quad (5)$$

Vrijednosti konstanti u prethodnoj formuli su određene interpolacijom na osnovu realnih podataka (slika 2) i iznose $a_0 = 1,287$, $a_1 = 0,117$, $a_2 = -4,58 \cdot 10^{-3}$ i $a_3 = -8,4 \cdot 10^{-3}$ [6].



Sl. 2. Efikasnost klima uređaja je bolja što je veća razlika između unutrašnje temperature (T_i) i vanjske temperature (T_{amb}).

F. Model ventilatora za hlađenje

Kada je ambijentalna temperatura relativno niska, upotreba ventilatora umjesto tehnološki komplikovanijeg klima uređaja, predstavlja energetske efikasnije rješenje. Potrošnja ventilatora se svodi na potrošnju pogonskog elektromotora, a količina odvedene toplote iz prostorije Q_v proporcionalna je razlici unutrašnje i vanjske temperature:

$$Q_v = H_v \cdot v_v \cdot A_p \cdot (T_i - T_{amb}), \quad (6)$$

gdje su H_v zapreminski toplotni kapacitet vazduha, v_v brzina cirkulacije vazduha, a A_p površina prozora kroz koji se obavlja cirkulacija. Na osnovu istraživanja [17], u ovom radu biće smatrano da za ventilator od 500 W koeficijent proporcionalnosti $H_v \cdot v_v \cdot A_p$ iznosi 108 W/°C.

G. Model termičkog provođenja objekta

Transfer energije kroz zidove i krov objekta zavisi od razlike interne i eksterne temperature:

$$Q_{TP} = U \cdot A_Z \cdot (T_i - T_{amb}), \quad (7)$$

gdje je U koeficijent termičke provodnosti, a A_Z ukupna površina svih zidova i krova objekta. Očigledno da ova veličina može biti kako pozitivna tako i negativna, jer toplotna energija napušta objekat tokom noći i hladnih dana, a dovodi se spolja tokom vreljih ljetnih dana. Potrebno je napomenuti da je, zahvaljujući savremenim izolacionim materijalima, provođenje energije kroz zidove objekata baznih stanica prilično malo i da se može uzeti da iznosi oko 21 W/°C [17].

H. Model grijanja objekta Sunčevim zračenjem

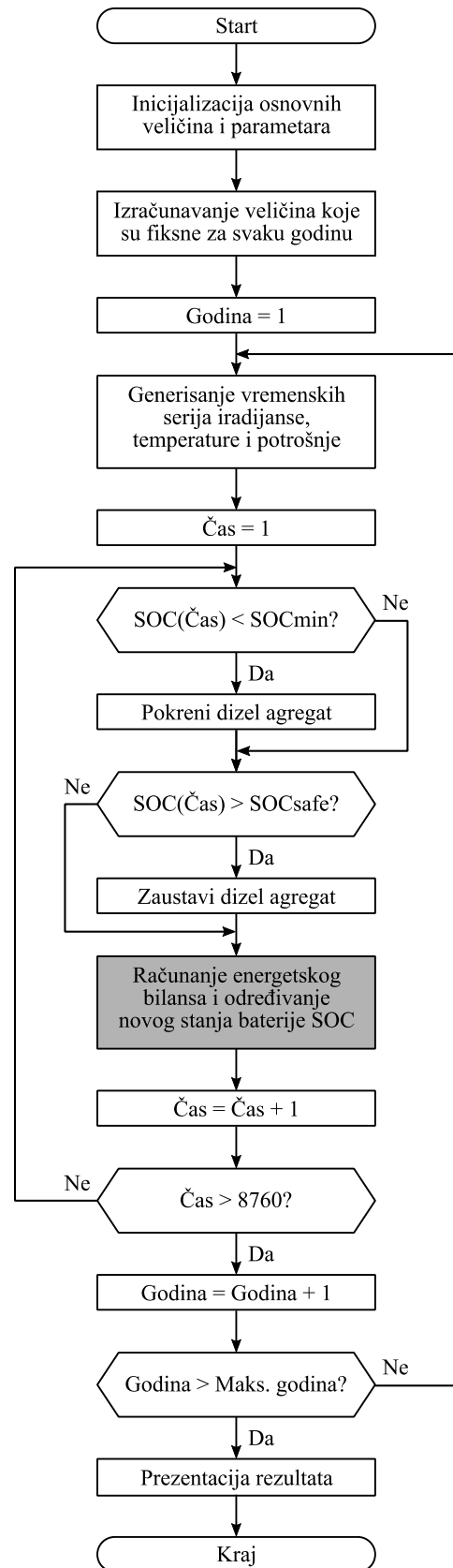
Kada su raspoloživi podaci o iradijansi i odgovarajućem položaju Sunčevog diska na nebu, relativno jednostavno je odrediti intenzitet zagrijavanja objekta usljed zračenja Sunca. Snaga koju objekat apsorbira od Sunca je:

$$Q_S = G \cdot A_S \cdot (1 - \rho), \quad (8)$$

gdje je G iradijansa mjerena u W/m², A_S projekcija površine objekta koja je izložena Suncu i ρ koeficijent refleksije zidova i krova objekta. Znajući da je moguće fotonaponske panele postaviti tako da u velikoj mjeri zaklanjaju objekat bazne stanice, u ovom radu će biti usvojeno $A_S = 0$, tj. efekat Sunčevog zračenja na termički bilans objekta će biti u potpunosti zanemaren.

III. ALGORITAM SEKVENCIJALNE MONTE CARLO SIMULACIJE

Rad sistema se testira primjenom sekvencijalne *Monte Carlo* simulacije. Iako je navedeni metod računarski najzahtjevniji, pomoću njega se dobija vjerna slika o ponašanju sistema u realnom okruženju. Važna karakteristika metoda je i očuvanje vremenskih odrednica pojedinih događaja (trenuci izlaska i zalaska Sunca, položaj Sunca na nebu u određeno doba dana), te autokorelacija i međusobna korelacija pojedinih promjenljivih, kao što su npr. iradijansa i temperatura. Korak simulacije je 1 čas. Za simulaciju aktiviranja uređaja za hlađenje ispostavlja se da je to gruba podjela, pa se kod termičkih proračuna prelazi na minutnu rezoluciju. Blok dijagram algoritma simulacije je prikazan na slici 3.



Sl. 3. Osnovni koraci simulacionog algoritma.

A. Generisanje vremenskih serija iradijancije

Procedura za generisanje časovnih vremenskih serija iradijancije, detaljnije je opisana u našem ranijem radu [9]. Ovdje navodimo samo osnovne korake:

- Učitavaju se prosječne vrijednosti dnevne insolacije koje su usrednjene na mjesečnom nivou.
- Generišu se dnevni indeksi vedrine K_T [13].
- Generišu se časovni indeksi vedrine k_t [14].
- Na osnovu indeksa vedrine računa se globalna insolacija na horizontalnu podlogu.
- Izdvaja se difuzna komponenta, a posredno i direktna komponenta zračenja na horizontalnu podlogu [15].
- Zračenje na horizontalnu podlogu transformiše se u zračenje na panel proizvoljne orijentacije [16].

B. Generisanje vremenskih serija temperature

S obzirom na činjenicu da performanse fotonaponskih modula do određene mjere zavise od temperature ambijenta, simulaciona procedura uključuje i generisanje vremenskih serija temperature. I ova procedura je opisana u radu [9], a osnovni koraci i principi su:

- Generiše se serija dnevnih prosjeka temperature. U ovoj proceduri uvažava se činjenica da je korelacija prosječne dnevne temperature sa iradijansom mala.
- Generišu se dnevni hod temperature na časovnom nivou, uzimajući u obzir korelaciju sa iradijansom, tako da je hod temperature veći tokom vedrih dana, a manji kada je oblačno.

C. Generisanje vremenskih serija potrošnje

Potrošnja telekomunikacione opreme P_{TO} u nekom času h biće modelovana na sljedeći način:

$$P_{TO} = P_{TO,sr} [1 + \sigma_{TO} \cdot N(0,1)], \quad (9)$$

gdje je $P_{TO,sr}$ srednja vrijednost snage potrošnje, σ_{TO} standardna devijacija, a $N(0,1)$ slučajni broj izvučen iz standardne normalne raspodjele.

D. Kontrolni algoritam za angažovanje dizel agregata

U ovom stadijumu istraživanja, odabrali smo krajnje jednostavnu logiku angažovanja dizel agregata. Naime, predviđeno je da se, kada stanje baterije opadne ispod podešenog donjeg praga (SOC_{min}), dizel agregat startuje kao ispomoć obnovljivom izvoru energije. Planirano je da agregat radi konstantno nominalnom snagom sve dok stanje napunjenosti baterije ne dostigne prag za sigurni nastavak rada (SOC_{safe}).

E. Kontrolni algoritam sistema hlađenja

U ovom radu je primijenjen jednostavni histerezisni algoritam prema kojem se angažuju uređaji za hlađenje. Osnovni principi upravljanja su:

- Kada temperatura u prostoriji pređe gornji prag (T_{Hon}) hlađenje se uključuje, a kada padne ispod donjeg praga (T_{Hoff}) hlađenje se isključuje.
- Kada vanjska temperatura padne ispod podešenog praga (T_{Von}) prelazi se u režim ventilatorskog hlađenja, a kada se vrati na vrijednost veću od gornjeg praga (T_{Voff}) za hlađenje će biti angažovan klima uređaj.

I ovdje je očigledno da se izborom pragova i dodatnim usavršavanjem upravljačkog algoritma otvara prostor za smanjenje potrošnje energije za hlađenje.

F. Računanje energetskog bilansa

Za računanje bilansa električne energije potrebno je prvo uraditi termički bilans, da bi se došlo do informacije o električnoj potrošnji uređaja za hlađenje. S obzirom na činjenicu da se bazne stanice najčešće realizuju u formi kontejnera sa jednom termičkom zonom, smatraćemo da je za termički opis sistema adekvatan model prvog reda:

$$m \cdot c \cdot dT_i = (Q_{TO} + Q_S - Q_H - Q_{TP}) dt, \quad (10)$$

gdje je Q_{TO} snaga disipacije telekomunikacione opreme, Q_S snaga grijanja objekta kao posljedica zračenja Sunca, Q_H snaga hlađenja koju po potrebi obezbjeđuje klima uređaj (Q_{KU}) ili ventilator (Q_V), a Q_{TP} snaga termičkog provođenja, odnosno snaga razmjene toplote sa okolinom kroz zidove i krov objekta. Navedena diferencijalna jednačina se rješava numerički, sa korakom od jednog minuta, a kao rezultat se dobija trend interne temperature objekta i časovna potrošnja klima uređaja i ventilatora ($P_{KU}(h) + P_V(h) = P_H(h)$).

Nakon računanja termičkog bilansa, proračun se nastavlja proračunom električnih snaga. Za svaki čas u simuliranoj godini, računa se debalans električne energije P_d po sljedećoj formuli:

$$P_d(h) = P_{PV}(h) + P_D(h) - P_{TO}(h) - P_H(h). \quad (11)$$

Iz snage debalansa se izračunava struja baterije

$$I_{bat} = P_d / U_{bat}, \quad (12)$$

gdje pozitivna snaga debalansa znači punjenje, a negativna pražnjenje baterije. Na potrebnim pozicijama se uvažavaju odgovarajući koeficijenti efikasnosti konverzije, u zavisnosti od konfiguracije i načina kako su pojedini elementi uvezani u sistem.

G. Analiza i prezentacija rezultata

Po završetku proračuna rezultate je moguće prezentovati kako u vidu hronoloških dijagrama za promjenljive od interesa tako i u vidu histograma sa kojih očitavamo vjerovatnoće pojave odgovarajućih scenarija.

IV. ILUSTRATIVNI PRIMJER

Svi navedeni simulacioni koraci su implementirani softverski i program je testiran na ilustrativnom primjeru napajanja bazne stanice u okolini grada Banja Luka.

A. Parametri simulacije

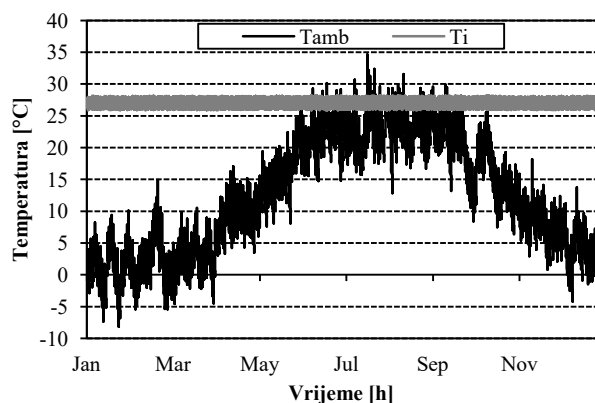
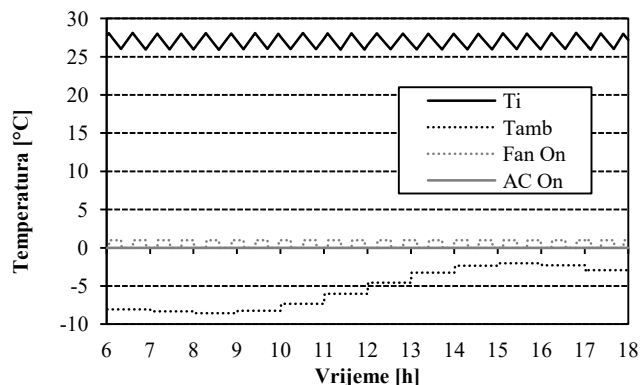
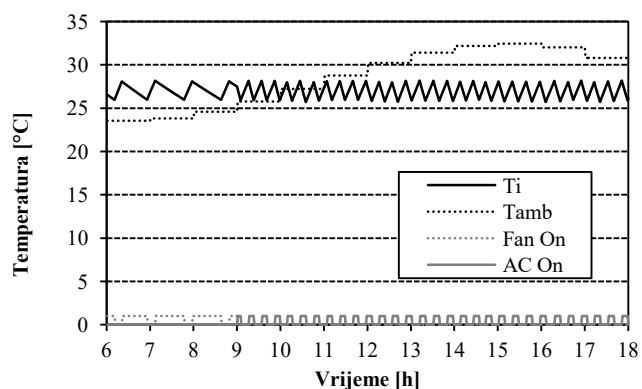
Posmatrana je bazna stanica sa prosječnom potrošnjom telekomunikacione opreme od 2 kW. Za hlađenje objekta predviđen je klima uređaj električne snage od 1,4 kW i ventilator od 500 W. Za napajanje se koriste fotonaponski moduli instalisane snage 30 kW i dizel agregat snage 5 kW. Softverski generatori vještačkih vremenskih serija iradijancije i temperature podešeni su prema meteorološkim statističkim podacima za Banju Luku. Monte Carlo simulacija je obavljena na vremenskom horizontu od 1000 godina. Ostali važniji parametri simulacije navedeni su u tabeli I.

TABELA I. OSNOVNI PARAMETRI SIMULACIJE

Karakteristika	Vrijednost
Instalisana snaga PV sistema	30 kW
Nagib modula Σ	50°
Azimutalna orijentacija ϕ_c	0° (orijentacija ka jugu)
Efikasnost DC-DC pretvarača	0,95
Efikasnost invertora	0,90
Efikasnost ispravljača	0,90
Instalisana snaga dizel agregata	5 kW
Kapacitet baterije	2000 Ah
Nominalni napon baterije	48 V
Efikasnost konverzije punj. i praznj. baterije	0,85
Stepen samopražnjenja baterije	0,8%
Snaga ventilatora za hlađenje	500 W
Električna snaga klima uređaja	1400 W
Prag za uključenje hlađenja T_{Hon}	28°C
Prag za isključenje hlađenja T_{Hoff}	26°C
Donji prag za ventilatorsko hlađenje T_{Von}	24°C
Gornji prag za ventilatorsko hlađenje T_{Voff}	25°C
Prosječna potrošnja telekom. opreme	2 kW
Stand. devijacija potrošnje telekom. opreme	0,1 kW
Min. dozvoljeno stanje baterije SOC_{min}	0,20
Stanje baterije za isključenje dizel agregata	0,80
Koeficijent toplotne provodnosti objekta (K)	21 W/°C
Termička vremenska konstanta objekta (T_c)	8 h
Prosječna godišnja ambijentalna temperatura	12,2°C

Na slici 4 prikazan je odnos ambijentalne temperature i temperature unutar objekta za jednu test godinu. Kakva god bila varijacija vanjske temperature, proizvodnje fotonaponskih panela i potrošnje telekomunikacione opreme, uređaji za hlađenje unutrašnju temperaturu održavaju između zadatih histerezisnih granica (koje su u ovom primjeru 26°C i 28°C).

Rezultati simulacije u detaljnijoj rezoluciji dati su na slikama 5 i 6. Slika 5 odnosi se na zimski dan u kojem temperatura okoline ne prelazi nulti podjeljak. Prema podešenim upravljačkim parametrima, hlađenje se isključivo obavlja ventilatorom, a njegovo uključivanje oko dva puta u toku jednog časa ispostavlja se kao adekvatno rješenje. Tokom ljetnih dana (slika 6), zbog viših temperatura okoline, ventilator za isti učinak mora da radi duže, a kada je napolju toplije od 25°C prelazi se na hlađenje pomoću klima uređaja.

Sl. 4. Temperatura: vanjska (T_{amb}) i unutrašnja (T_i).Sl. 5. Isječak iz simulacije (primjer za zimski dan 9. januar). Zbog niske ambijentalne temperature, ventilator (*fan*) je dovoljan za hlađenje i nema potrebe za upotrebom klima uređaja.Sl. 6. Isječak iz simulacije (primjer za ljetni dan 17. avgust). Ventilator (*fan*) se povremeno aktivira u noćnim i jutarnjim časovima, a klima uređaj (*AC*) u srednjem dijelu dana

Na slikama 5 i 6 se vidi da je period odabiranja ambijentalne temperature 1h. Time se čini određena greška, pa je u nastavku istraživanja moguće poraditi na tome da se temperatura unutar sata interpolira linearno ili nekim drugim interpolacionim metodom.

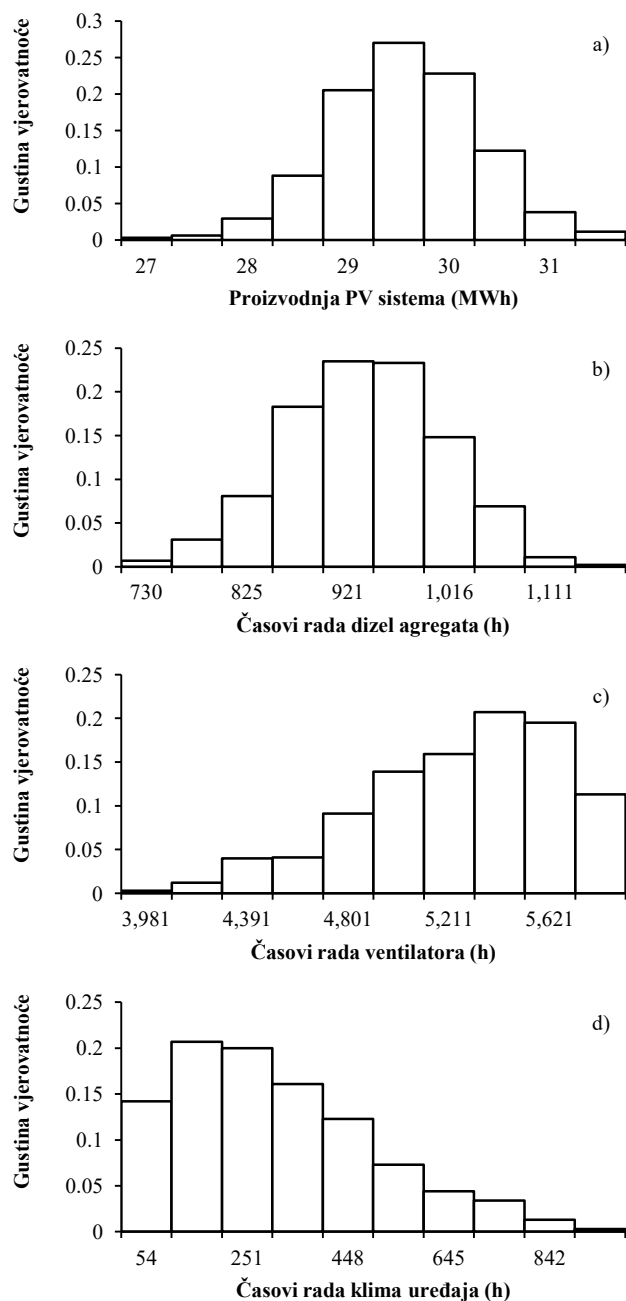
Na slici 7 prikazani su histogrami proizvodnje fotonaponskog sistema, te vremena rada dizel agregata, ventilatora i klima uređaja.

V. ZAKLJUČAK

U radu je opisano programsko okruženje za simulaciju napajanja baznih stanica mobilne telefonije samostalnim fotonaponskim sistemima. Sekvencijalnom *Monte Carlo* simulacijom moguće je hronološki pratiti ponašanje svih elemenata sistema u realističnim uslovima. Prikazani su ilustrativni rezultati na primjeru baziranom na jednostavnom principu upravljanja, gdje se vidi koliko solarne energije se iskoristi, koliko časova u toku godine je neophodno angažovati dizel agregat, koliko energije se utroši na hlađenje itd.

U nastavku istraživanja na ovu temu moguće je raditi u više pravaca. Kako u ovom radu nije primijenjena nikakva optimizacija, moguće je testirati nove algoritme upravljanja uređajima za hlađenje, sa ciljem poboljšanja energetske efikasnosti. Nadalje, potrebno je razmotriti da li su upotrijebljeni modeli adekvatni i da li ima smisla da se traga

za preciznijim i detaljnijim varijantama. Na kraju, moguće je testirati dodavanje vjetroagregata ili drugačijih izvora energije u hibridni miks, u namjeri da se poveća pouzdanost napajanja i smanji potrošnja fosilnih goriva.



Sl. 7. Empirijske funkcije gustine vjerovatnoće: (a) proizvodnje PV sistema, (b) broja časova dizel agregata, (c) broja časova rada ventilatora za hlađenje i (d) broja časova rada klima uređaja

LITERATURA

- [1] SolarPower Europe [SPE], "Global Market Outlook For Solar Power 2019-2023," SPE Technical Report, Brussels, 2019.
- [2] Y. Thiaux, T. T. Dang, L. Schmerber, B. Multon, H. B. Ahmed, S. Bacha, Q. T. Tran, "Demand-side management strategy in stand-alone hybrid photovoltaic systems with real-time simulation of stochastic

electricity consumption behavior," *Applied Energy*, vol. 253, article 113530, 2019.

- [3] K. Kusakana, H. J. Vermaak, "Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries," *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 419-425, 2013.
- [4] A. Spagnuolo, A. Petraglia, C. Vetromile, R. Formosi, C. Lubritto, "Monitoring and optimization of energy consumption of base transceiver stations," *Energy*, vol. 81, pp. 286-293, 2015.
- [5] R. Tu, X.-H. Liu, Z. Li, Y. Jiang, "Energy performance analysis on telecommunication base station," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 315-325, 2011.
- [6] J. Wang, Q. Zhang, Y. Yu, "An advanced control of hybrid cooling technology for telecommunication base stations," *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 172-184, 2016.
- [7] S. Semaoui, A. H. Arab, S. Bacha, B. Azoui, "Optimal Sizing of a Stand-alone Photovoltaic System with Energy Management in Isolated Areas," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 358-368, 2013.
- [8] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, Z. Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 354-367, 2008.
- [9] C. V. T. Cabral, D. O. Filho, A. S. A. C. Diniz, J. H. Martins, O. M. Toledo, L. V. B. M. Neto, "A stochastic method for stand-alone photovoltaic system sizing," *Solar Energy*, vol. 84, pp. 1628-1636, 2010.
- [10] Č. Zeljković, P. Mršić, B. Erceg, "Simulation-Based Energy Assessment of PV Systems Installed in an Urban Environment," 20th International Symposium Power Electronics Ee2019, Novi Sad, Serbia, October 23-26, 2019.
- [11] A. P. Dobos, PVWatts Version 5 Manual, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 2014.
- [12] J. Lorincz, T. Garma, G. Petrovic, "Measurements and modelling of base station power consumption under real traffic loads," *Sensors*, vol. 12, pp. 4281-4310, 2012.
- [13] R. J. Aguiar, M. Collares-Pereira, and J. P. Conde, "Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices," *Solar Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 269-279, January 1988.
- [14] R. Aguiar and M. Collares-Pereira, "TAG: a time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation," *Solar energy*, vol. 49, no. 3, pp. 167-174, September 1992.
- [15] B. Ridley, J. Boland, and P. Lauret, "Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 478-483, February 2010.
- [16] 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.
- [17] A. Petraglia, A. Spagnuolo, C. Vetromile, A. D'Onofrio, C. Lubritto, "Heat flows and energetic behavior of a telecommunication radio base station," *Energy*, vol. 89, pp. 75-83, 2015.

ABSTRACT

In this paper, a method for performance analysis of stand-alone photovoltaic systems based on sequential Monte Carlo simulation is theoretically described and programmatically implemented. The method is applied to the supply of mobile telephony base stations. The results provide information about the annual use of renewable energy, working hours of back-up diesel generator, energy needed for cooling etc. These data can serve in the techno-economic assessment of the selected base station power supply solution.

PERFORMANCE ANALYSIS OF STANDALONE PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR TELECOMMUNICATION BASE STATIONS

Čedomir Zeljković, Predrag Mršić, Bojan Erceg



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2019

14 - 15. novembar, Banja Luka

Sesija C

Sesija C

Predrag Mršić i Željko Đurišić

ODZIV MODERNIH VJETROAGREGATA NA PROPADE NAPONA U PRIKLJUČNOJ MREŽI38

Jovana Tuševljak i Željko Đurišić

OPTIMALNO POZICIONIRANJE PRIGUŠNICA U PRENOSNOJ MREŽI BOSNE I HERCEGOVINE44

Dejan Stevanović, Miona Andrejević Stošović, Marko Dimitrijević i Predrag Petković

GUBICI NA EE MREŽI USLED KORIŠĆENJA OPREME ZA RUDARENJE KRIPTOVALUTA49

Zdravko Milovanović, Valentina Janičić Milovanović, Snježana Milovanović i Momir Samardžić

**OCJENA ENERGETSKE EFIKASNOSTI TERMoeLEKTRANE - PRIMJER RITE UGLJEVIK
NOMINALNE SNAGE 300 MW53**

Zdravko Milovanović, Valentina Janičić Milovanović i Snježana Milovanović

**UPRAVLJANJE PROJEKTOM ENERGETSKE EFIKASNOSTI NA
TERMOENERGETSKIM POSTROJENJIMA59**

Zdravko Perić, Željko Despotović i Branislav Koprena

**OPTIMIZACIJA I VERIFIKACIJA SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA U
TS 110/20 kV LAKTAŠI 267**

Odziv modernih vjetroagregata na propade napona u priključnoj mreži

Predrag Mršić^{1,2}, Željko Đurišić¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

² Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, BiH
predrag.mrsic@etf.unibl.org, djurisic@etf.bg.ac.rs

Sažetak — Posljednjih godina instalirani kapacitet vjetroelektrana u svijetu se rapidno povećao. Rapidno povećanje broja vjetroelektrana dovelo je do promjena dinamičkih karakteristika sistema. Da bi se održala tranzijentna stabilnost sistema, vjetroelektrane velikih snaga moraju ostati povezane na elektroenergetsku mrežu za vrijeme propada napona. U ovom radu su analizirani odzivi vjetroagregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i vjetroagregata sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora, na propade napona u priključnoj mreži.

Ključne riječi — energetska mreža; mrežni kodeks; propad napona; vjetroagregat

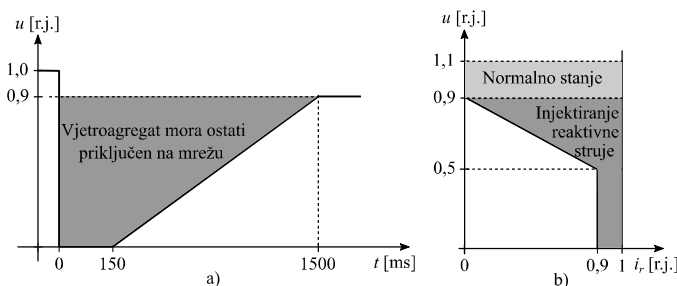
I. UVOD

Globalni ekološki problemi i sve veće potrebe za električnom energijom doveli su do vrtoglavo razvoja obnovljivih izvora energije. Najveći trend razvoja u oblasti obnovljivih izvora energije danas ima vjetroenergetika. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana na kraju 2018. godine u svijetu je iznosila oko 600 GW. Vodeća zemlja po broju instaliranih vjetroelektrana u svijetu je Kina koja je u 2018. godine instalirala 21,2 GW vjetroelektrana na kopnu i 1,8 GW na moru, čime je ukupna instalirana snaga premašila 200 GW. Evropska unija (EU) svake godine izgradi oko 10 GW novih vjetroelektrana, tako da je na kraju 2018. godine ukupna instalirana snaga vjetroelektrana u EU iznosila oko 180 GW, od čega je oko 20 GW vjetroelektrana na moru. Vodeće zemlje po broju instaliranih kapaciteta u EU su Njemačka (59,3 GW), Španija (23,5 GW) i Velika Britanija (21 GW) [1], [2].

Rapidno povećanje broja vjetroelektrana priključenih na elektroenergetski sistem dovelo je do promjene dinamičkih karakteristika sistema. Da bi se održala tranzijentna stabilnost sistema od velikih vjetroelektrana priključenih na prenosnu mrežu zahtijeva se da ostanu povezane na mrežu tokom određenog perioda za vrijeme propada napona. U većini zemalja je to uređeno putem mrežnog kodeksa (engl. *grid code*) [3]. Krive koje definišu oblast u kojoj se može nalaziti napon kada vjetroagregat mora ostati povezan na mrežu zavise od države do države. U određenim zemljama se zahtijeva da vjetroagregat ostane povezan na mrežu i prilikom kratkotrajnog pada napona na nulu. Tipična kriva koja definiše oblast kada vjetroagregat mora ostati povezan na mrežu je prikazana na Sl. 1a. Vjetroagregat mora ostati povezan na mrežu 150 ms ako dođe do potpunog gubitka napona, a najduže treba ostati 1,5 s u slučaju propada napona na 90% nominalne vrijednosti. Takođe, tokom rada sa naponom koji je niži od 90%

nominalnog, vjetroagregat treba da u mrežu isporučuje reaktivnu snagu kako bi se popravile naponske prilike. Reaktivna snaga, odnosno reaktivna struja koja se isporučuje u mrežu zavisi od napona u toku poremećaja, Sl. 1b. Smanjenje napona na vrijednost veću od 90% nominalnog napona smatra se normalnim radnim režimom, te se za te vrijednosti napona ne zahtijeva da vjetroagregat generiše reaktivnu snagu. Nakon isključenja kvara i povratka napona na nominalno radno stanje vjetroagregat može ponovo početi da isporučuje aktivnu snagu u mrežu [3], [4].

U nastavku rada će biti analiziran rad modernih vjetroagregata pri propadima napona u priključnoj mreži. Tipovi vjetroagregata su pobrojani i ukratko opisani u drugom dijelu, dok su u trećem dijelu analizirani odzivi vjetroagregata na propade napona u priključnoj mreži.



Sl. 1. Krive koje definišu rad vjetroagregata pri propadu napona u mreži, kada mora a) ostati povezan na mrežu, b) isporučivati reaktivnu snagu [4].

II. TIPOVI VJETROAGREGATA

Širom svijeta danas se koriste vjetroagregati različitih tehnologija. Razlikuju se po cijeni, kompleksnosti, efikasnosti i opremi koja je ugrađena. Tipična vjetroturbina ima horizontalnu osovinu sa glavčinom na koju su montirane najčešće tri lopatice i može da prati smjer duvanja vjetra. Kao generator se često koristi indukciona mašina koja može imati fiksnu ili promjenljivu brzinu obrtanja. Pored indukcionog generatora može se sresti i sinhroni generator sa i bez stalnih magneta na rotoru i različitog broja pari polova, odnosno brzine obrtanja. Izbor generatora obično utiče na izbor pretvarača i na način toka energije. Tu se sreću sistemi bez pretvarača, sa pretvaračima preko kojih se dio energije prenosi u mrežu i pretvarači preko kojih se cjelokupna električna energija koju proizvodi vjetrogenerator prenosi u mrežu.

Prema kriterijumu kontrole brzine obrtanja vjetroturbine razlikujemo četiri tipa vjetroagregata:

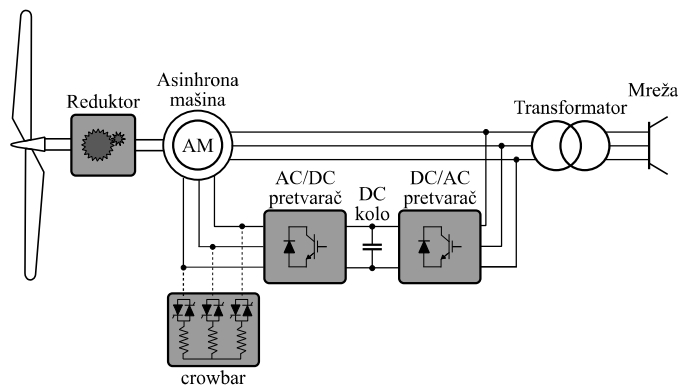
- Tip A: Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa kaveznim rotorom (engl. *Fixed-Speed Wind Turbines*),
- Tip B: Vjetroagregati sa asinhronim mašinom sa namotanim rotorom i promjenljivim otpornikom u rotorskom kolu (engl. *Variable-Slip Wind Turbines*),
- Tip C: Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa (engl. *Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines*) i
- Tip D: Vjetroagregati sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora koji je dimenzionisan na punu snagu generatora (engl. *Full Converter Wind Turbines*) [5]–[7].

U prvim vjetroagregatima su korišćene asinhronne mašine koje rade sa konstantnom brzinom obrtanja sa jednom ili dvije brzine (Tip A). Brzina se jako malo mijenja oko sinhronne zbog male promjene klizanja (do 3%). Da bi se omogućio rad vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja vjetroturbine razvijeni su koncepti sa asinhronim mašinama sa promjenljivim otpornikom u kolu rotora (Tip B). Oko 2000. godine za vjetroturbine velikih snaga su sve češće korišćeni vjetroagregati sa dva električna pristupa i pretvaračem u kolu rotora (Tip C). U isto vrijeme razvijeni su i vjetroagregati sa pretvaračem u kolu statora. U tim izvedbama se kao generator može koristiti asinhrona ili sinhrona mašina sa promjenljivom brzinom obrtanja, budući da se sva energija u mrežu isporučuje preko pretvarača (Tip D) [8].

U ovom radu će se analizirati rad vjetroagregata tipa C i D pri propadima napona u priključnoj mreži, pa će u nastavku teksta biti detaljnije opisan način rada ovih vjetroagregata.

A. Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i pretvaračem u rotorskom kolu

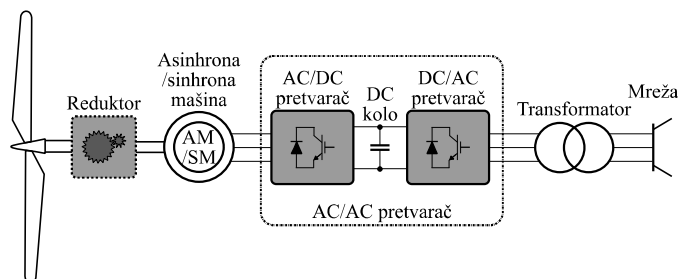
Koncept ovog vjetroagregata je prikazan na Sl. 2. On spada u kategoriju vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja. Statorski namot asinhronne mašine se direktno priključuje na mrežu, a rotorski preko AC/AC pretvarača. AC/AC pretvarač se realizuje od AC/DC i DC/AC pretvarača sa zajedničkim DC kolom. AC/DC pretvarač na strani rotora asinhronne mašine upravlja momentom vjetrogeneratora, odnosno promjenom brzine obrtanja u cilju maksimalne apsorpcije kinetičke energije vjetra i vrši regulaciju reaktivne snage. DC/AC pretvarač povezuje DC kolo sa elektroenergetskom mrežom. Negova uloga je da održava napon DC kola na željenoj vrijednosti promjenom smjera aktivne snage u zavisnosti od radnog režima vjetroagregata. Glavni nedostatak vjetroagregata sa asinhronim mašinama sa dva električna pristupa je rad vjetroagregata pri kvarovima u mreži. Kvarovi u mreži uzrokuju pad napona na priključcima vjetroagregata, koji dovodi do porasta struje u statorskom kolu. Zbog magnetske sprege statora i rotora povišena struja teče i kroz namotaje rotora, te kroz pretvarač. Ta struja, ako se ne ograniči, može oštetiti pretvarač. Ograničenje struje rotora je moguće izvesti ograničavajući maksimalnu struju pretvarača, ali to dovodi do visokih napona DC kola koje opet može dovesti do uništenja pretvarača. Drugi način da se ograniči struja kroz pretvarač i spriječi njegovo uništenje je da se rotorski namotaj kratko spoji preko otpornika (engl. *crowbar*).



Sl. 2. Elektromehanička konverzija vjetra u vjetroagregatu sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i pretvaračem u kolu rotora.

B. Vjetroagregati sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora

Ovaj koncept vjetroagregata omogućava pun opseg promjene brzine obrtanja (engl. *variable speed system*), od 0 do 100% nominalne brzine vjetrogeneratora. Principijelna šema koncepta je prikazana na Sl. 3. Sistem se zasniva na upotrebi AC/AC pretvarača koji je dimenzionisan na punu snagu vjetrogeneratora. AC/AC pretvarač povezuje vjetrogenerator sa elektroenergetskom mrežom. Na ovaj način generator je potpuno frekvencijski raspregnut od mreže. Stoga, kao generator se može koristiti asinhrona ili sinhrona mašina. Obično se koristi asinhrona mašina sa kaveznim rotorom, sinhrona mašina sa namotanim rotorom, sa stalnim magnetima i sinhrona mašina sa velikim brojem pari polova na statoru, koja opet može imati namotan rotor ili rotor sa stalnim magnetima. Pored frekvencijskog rasprezanja vjetroagregata i mreže, postojanje AC/AC pretvarača omogućava raspregnuto upravljanje aktivnom i reaktivnom snagom. Danas se najčešće koristi *back to back* pretvarač koji se sastoji od AC/DC i DC/AC pretvarača koji su povezani na isto DC kolo. DC kolo omogućava razdvajanje upravljačkih krugova ova dva pretvarača. Pretvaračem na strani statora asinhronne/sinhronne mašine se upravlja reaktivnom snagom i brzinom obrtanja vratila vjetroagregata kako bi se ostvarila maksimalna efikasnost elektromehaničke konverzije energije vjetra. Dok se pretvaračem na strani mreže upravlja aktivnim i reaktivnim snagama koje se injektiraju u mrežu [6].



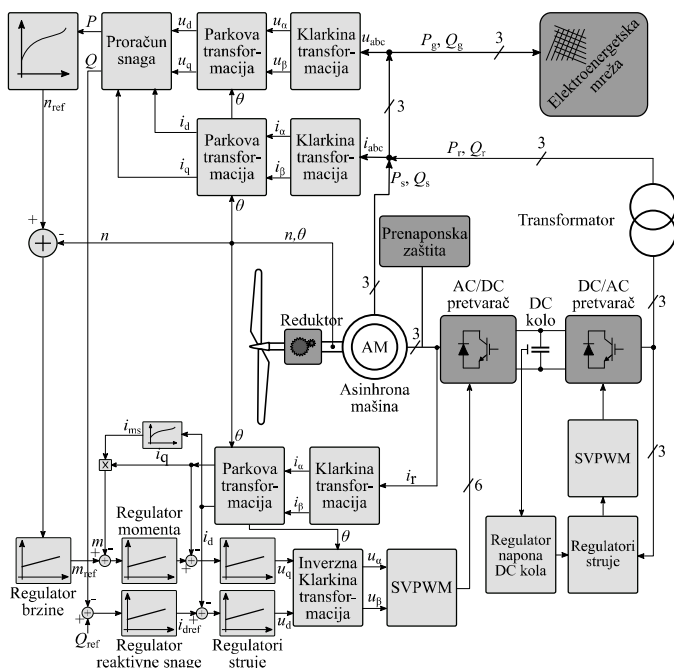
Sl. 3. Vjetroagregat sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora.

III. ODZIVI VJETROAGREGATA PRI PROPADIMA NAPONA

U ovom dijelu će biti ukratko opisan način rada i analiziran odziv vjetroagregata na propade napona u priključnoj mreži.

A. Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i pretvaračem u rotorskom kolu

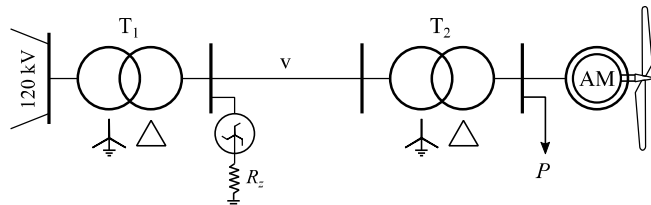
Asinhrona mašina sa dva električna pristupa se može magnetisati sa strane statora i/ili sa strane rotora. Injektiviranjem struje rotora odgovarajućeg intenziteta i faze može se postići željena reaktivna struja statora, čime se može mašina dovesti u željeni režim rada, normalni, induktivni ili kapacitivni. Tipična šema upravljanja asinhronom mašinom sa dva električna pristupa je prikazana na Sl. 4. Proračun aktivne i reaktivne snage prikazan je u gornjem lijevom dijelu šeme. Snage se proračunavaju na osnovu napona i struje u dq koordinatnom sistemu. Dakle, prije proračuna snaga izvršena je transformacija struja i napona u dq koordinatni sistem. dq koordinatni sistem se orijentira tako da se omogući nezavisno upravljanje strujama po d i q osi. Na osnovu aktivne snage i karakteristike turbine određuje se referentna brzina obrtanja. Razlika zadate i trenutne brzine se vodi na regulator brzine na čijem izlazu se dobija referentna vrijednost momenta. Razlika momenta, zadanog i izračunatog se vodi na regulator momenta, na čijem izlazu se dobija referentna struja po q osi. Za razliku od aktivne snage, koju definiše brzina vjetra, reaktivna snaga se može proizvoljno zadati. Razlika referentne i izmerene reaktivne snage se vodi na regulator snage. Na izlazu regulatora se dobija referentna struja po d osi. Referentni naponi po d i q osi, na osnovu kojih se računaju faktori popune upravljačkih signala za AC/DC pretvarač, dobijaju se na izlazu regulatora struja. DC/AC pretvaračem u kolu rotora se upravlja tako da se napon DC kola održava na konstantnoj vrijednosti, a reaktivna snaga na nuli. Reaktivnom snagom vjetroagregata se upravlja pretvaračem na strani rotora, dok se pretvaračem na strani mreže omogućava samo razmjena aktivne snage tako da se napon DC kola održava na konstantnoj vrijednosti [9].



Sl. 4. Šema upravljanja vjetroagregatom sa dva električna pristupa [9].

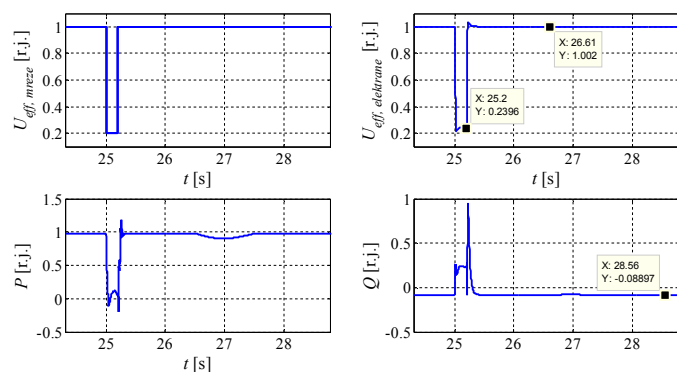
Za snimanje odziva vjetroagregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa koristiće se model vjetroelektrane snage 9 MW koji je ugrađen u programski paket MATLAB®.

Vjetroelektrana se sastoji od šest vjetroagregata pojedinačne snage 1,5 MW. Nominalni napon generatora je 575 V. Preko dva transformatora T_1 (120/25 kV/kV) i T_2 (25/0,575 kV/kV) i voda v (dužine 30 km) vjetroelektrana je povezana na elektroenergetsku mrežu. Tokom simulacije brzina vjetra je konstantna i iznosi 14 m/s. Pri normalnom naponu mreže razmjena reaktivne snage sa mrežom je jednaka nuli [10]. Skica vjetroelektrane prikazana je na Sl. 5.



Sl. 5. Skica vjetroelektrane priključene na prenosnu elektroenergetsku mrežu.

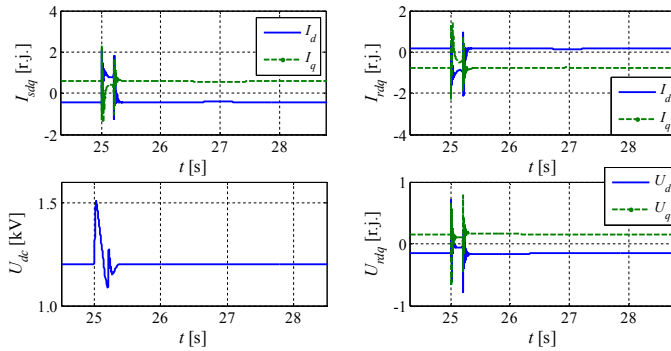
Odziv brzine, aktivne i reaktivne snage pri trofaznom propadu napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti i trajanja 0,2 s prikazan je na Sl. 6. Tokom normalnog radnog režima ($t < 25$ s) vjetroagregat injektira u mrežu nominalnu aktivnu snagu, dok je reaktivna snaga nešto manja od nule zbog napona na priključcima vjetroagregata koji je nešto veći od 1 r.j. Nastankom kvara u priključnoj mreži i propadom napona na 0,2 r.j. vjetroagregat prestaje da injektira aktivnu snagu u mrežu, a aktivira se proizvodnja reaktivne snage kako bi se popravile naponske prilike u mreži. Efekat injektiranja reaktivne snage od strane vjetroagregata se mogu vidjeti na dijagramima gdje je prikazana efektivna vrijednost napona na priključcima vjetroagregata. Naime, napon u 120 kV mreži (na Sl. 6 označen sa $U_{eff, mreže}$) je pao na 0,2 r.j. dok je napon na priključcima vjetroelektrane (na Sl. 6 označen sa $U_{eff, elektrane}$) pao na vrijednost 0,239 r.j. Blagi propad injektiranja aktivne snage u mrežu u okolini $t = 27$ s će biti nešto kasnije komentaran.



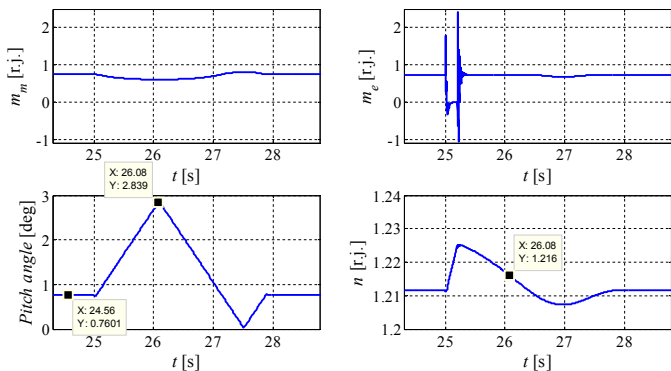
Sl. 6. Odziv aktivne i reaktivne snage vjetroagregata tipa C na propad napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti i trajanja 0,2 s.

Promjenom snaga injektiranja u mrežu mijenjaju se struje u dq koordinatnom sistemu. Prema upravljačkoj šemi datoj na Sl. 4, strujom po d osi se upravlja reaktivnom snagom, a strujom po q osi momentom. Promjena struja statora i rotora, napona DC kola i napona na rotoru prikazana je na Sl. 7. Prije nastanka kvara u priključnoj mreži, struja statora (I_{sdq}) po d osi je negativna iz razloga potrošnje reaktivne snage, a struja po q osi je pozitivna jer se injektira aktivna snaga u mrežu. Nastankom kvara, struja po d osi mijenja smjer jer i vjetro-

agregat prelazi iz potrošnje u proizvodnju reaktivne snage, a struja po q osi opada jer aktivna snaga teži nuli. Budući da se regulacija snaga realizuje pretvaračem u rotorskom kolu struje (I_{rdq}) i naponi (U_{rdq}) rotorskog kola mijenjaju svoje vrijednosti u odnosu na stanje prije poremećaja. Struja po d osi mijenja smjer kako bi se promijenio tok reaktivne snage, a struja po q osi teži nuli. Nastankom kvara, usljed velikih skokova struja rotora i nepostojanja *crowbar*-a napon DC kola se skokovito mijenja sa 1,2 kV na 1,5 kV. Takođe, propadom napona na priključcima vjetroagregata mijenja se i mehanički momenat mašine. Promjena momenata vjetroagregata i turbine, ugla lopatica vjetroturbine i brzine obrtanja je prikazana na Sl. 8.



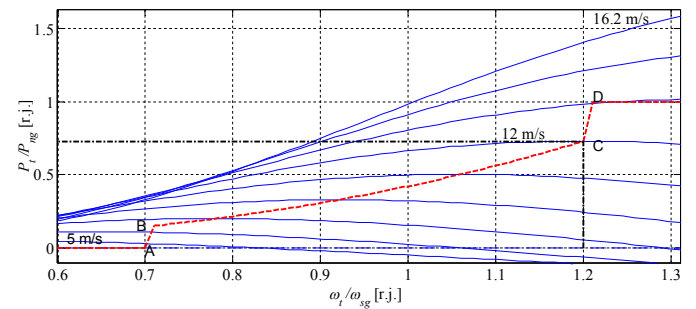
Sl. 7. Odziv struja i napona po d i q osi i napona DC kola vjetroagregata tipa C na propad napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti.



Sl. 8. Odziv brzine i momenta turbine, te promjena ugla lopatica vjetroturbine vjetroagregata tipa C na propad napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti i trajanja 0,2 s.

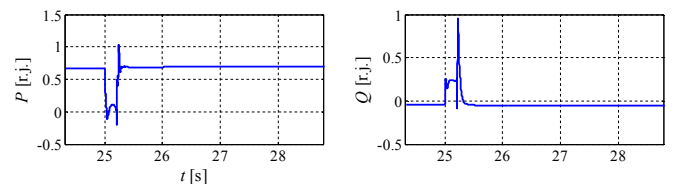
Brzina vjetra tokom simulacije je 14 m/s. Ta brzina vjetra je nešto veća od brzine pri kojoj vjetroagregat dostiže nominalnu snagu, te je ugao lopatica 0,76°. Pri propadu napona momenat vjetroagregata (m_e) pada na nulu, dok i dalje postoji momenat turbine (m_m). Usljed razlike momenata vratilo mašine počinje da ubrzava, ali i regulator ugla lopatica reaguje povećavanjem ugla lopatica kako bi se smanjio momenat turbine. Međutim, zbog razlike u brzini odziva električnih i mehaničkih prelaznih procesa vratilo vjetroagregata ubrza do 1,225 r.j. To je prvenstveno ograničeno trajanjem propada napona i inercijom sistema. Povratkom napona u priključnoj mreži na nominalnu vrijednost, mehanički momenat vjetroagregata postaje veći od momenta turbine, te vratilo počinje da usporava. Pri tome, brzina vratila je i dalje veća od brzine pri kojoj turbina dostiže nominalnu snagu, Sl. 9, pa se nastavlja porast ugla lopatica vjetroturbine. Tek kada brzina vratila mašine, a ujedno i brzina obrtanja turbine padne ispod 1,21 r.j,

što odgovara nominalnoj snazi turbine, ugao lopatica vjetroturbine prestaje da raste i počinje da opada. U trenutku dostizanja maksimalnog ugla lopatica vjetroturbine, momenat vjetroturbine dostiže minimalnu vrijednost, a sa smanjenjem ugla lopatica počinje da raste. Zbog različitih brzina odziva promjene ugla lopatica vjetroturbine i promjene brzine vratila, brzina vratila se smanjuje ispod brzine za koju turbina dostiže nominalnu snagu. Kada se ugao lopatica vrati na vrijednost prije poremećaja, brzina turbine je manja od brzine za koju se ima nominalna snaga, pa ugao nastavlja i dalje da pada. Tada momenat turbine postaje veći od momenta vjetroagregata i vratilo počinje da ubrzava, da bi poslije određenog vremena dostiglo brzinu pri nominalnoj snazi. Zbog propada brzine obrtanja ispod nominalne dolazi do smanjenja momenta i snage ispod nominalne vrijednosti, te fluktuacija u struji.



Sl. 9. Karakteristike snage vjetroturbine za različite brzine vjetra u funkciji brzine obrtanja vjetroturbine (plava) i referentna karakteristika (crvena).

Na Sl. 9 isprekidanom linijom je prikazana kriva snage u funkciji brzine obrtanja. Dio od B do C je dobijen spajanjem tačaka pri kojima se ima maksimalna efikasnost elektromehaničke konverzije. Ako bi brzina vjetra bila manja od 12 m/s regulator ugla lopatica vjetroturbine bi bio isključen, pa bi pri propadu napona momenat turbine ostao nepromijenjen. Kao posljedica ovoga ne dolazi do fluktuacije struja i snaga nekoliko sekundi nakon završetka propada napona, Sl. 10.

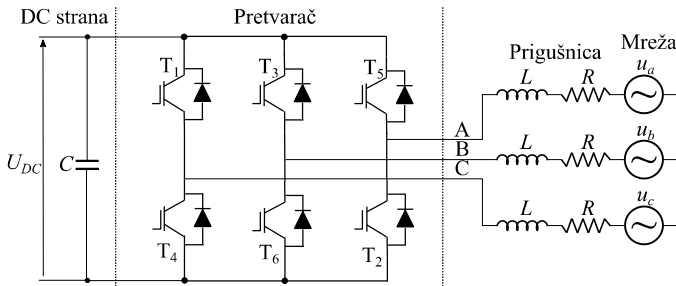


Sl. 10. Odziv aktivne i reaktivne snage vjetroagregata tipa C na propad napona na 20% nominalne vrijednosti i trajanja 0,2 s pri brzini vjetra od 12 m/s.

B. Vjetroagregati sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora

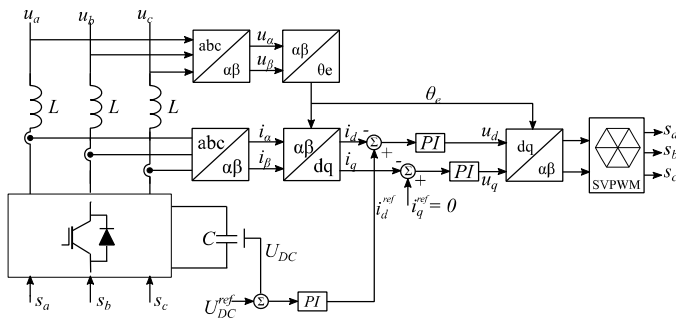
Ako pretpostavimo da je brzina vjetroturbine konstantna tokom poremećaja u priključnoj mreži, bez obzira na to koji vjetrogenerator se koristi, može se smatrati da se kondenzator u DC kolu puni određenom strujom, koja treba da odgovara konstantnoj snazi. Stoga, za analizu odziva vjetroagregata pri propadu napona u priključnoj mreži može se posmatrati samo DC/AC pretvarač (pretvarač na strani mreže). U određenim radovima, za analize odziva vjetroagregata, pri poremećajima u mreži, smatra se da je napon DC kola konstantan. U tom slučaju se smatra sa postojbi dodatni otpornik u DC kolu pomoću koga se napon održava na konstantnoj vrijednosti [11]–[13].

Osnovna šema energetskog dijela DC/AC pretvarača prikazana je na Sl. 11. Induktivnost (L) i otpornost (R) predstavljaju parametre prigušnice koja povezuje elektroenergetsku mrežu sa ulazom pretvarača. Struja na ulazu pretvarača kontrolisana je padom napona na prigušnici koja povezuje dva naponska izvora (elektroenergetsku mrežu i pretvarač). To znači da je pad napona na prigušnici jednak razlici napona na pretvaraču i napona mreže. Ako posmatramo DC/AC pretvarač kao jednu cjelinu čiji je zadatak da održava napon na kondenzatoru na konstantnoj vrijednosti, model se može izvesti na dva načina, naravno to ne utiče na rad pretvarača nego samo na referentni smjer snage, da je referentni smjer snage i struje ka pretvaraču ili od njega. U ovom radu će se izvesti model tako da je referentni smjer struje ka pretvaraču.



Sl. 11. Energetska šema DC/AC pretvarača.

Pri modelovanju pretvarača orijentacija sinhrono rotirajućeg koordinatnog sistema će se vršiti prema vektoru napona mreže, pa je skica upravljačkih signala prikazana samo za tu tehniku upravljanja, Sl. 12. Na ulazu pretvarača mjere se fazni naponi iz kojih se računa položaj polifazora napona koji se koristi za orijentaciju sinhrono rotirajućeg koordinatnog sistema. Zatim, mjeri se struja kroz prigušnicu, preslikava u sinhrono rotirajući koordinatni sistem i poredi se zadatom strujom. Referentna vrijednost struje po d osi se dobija na izlazu PI regulatora za napon, a po q osi se proizvoljno zadaje (obično je jednaka nuli da bi pretvarač radio sa jediničnim faktorom snage). Na izlazu strujnih regulatora dobija se napon koji se transformiše u stacionarni $\alpha\beta$ koordinatni sistem i vodi na blok za generisanje upravljačkih signala za tranzistore.



Sl. 12. Šema upravljačkih signala DC/AC pretvarača.

Model pretvarača u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu je dat sljedećim jednačinama:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$C \frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} S_d & S_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdje su S_d i S_q funkcije koje zavise od stanja prekidača. Snaga pretvarača u dq koordinatnom sistemu se je:

$$\begin{aligned} P_{dq} &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{3}{2} (u_d + ju_q) (i_d - ji_q) \right\} = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q_{dq} &= \operatorname{Im} \left\{ \frac{3}{2} (u_d + ju_q) (i_d - ji_q) \right\} = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \end{aligned} \quad (3)$$

Uvrštavanjem $u_q = 0$ zbog toga što je rotirajući koordinatni sistem postavljen tako da je napon koncentrisan u d osu i ako struju i_q održavamo na nuli, što možemo ostvariti upravljanjem, dobijamo da nam pretvarač radi sa jediničnim faktorom snage.

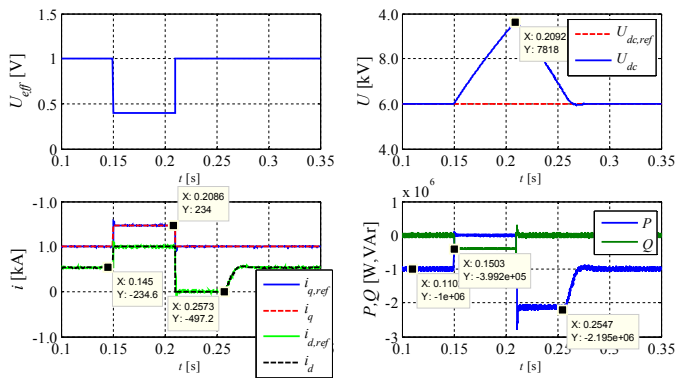
Posmatrajući šemu upravljačkih signala pretvarača mogu se uočiti dvije upravljačke petlje. Prva, unutrašnja petlja je petlja koja reguliše struje po d i q osi, a druga nadređena petlja je petlja za regulaciju napona na kondenzatoru. Dakle, da bi se omogućio rad pretvarača potrebno je projektovati dva tipa PI regulatora. Regulatori su projektovani tako da se obezbijedi aperioidičan odziv. Odziv pretvarača na propad napona odgovara odzivu vjetroagregata ovog tipa pri propadu napona. Pri ovoj analizi smatra se da se brzina vjetra ne mijenja tokom poremećaja u elektroenergetskoj mreži, te da je struja koja se injektira u DC kolo sa strane AC/DC pretvarača takva da je snaga konstantna. Pri propadu napona od vjetroagregata se traži da se ponaša u skladu sa određenim uslovima: da ostanu konektovani na mreži određeni period nakon kvara u zavisnosti od napona tokom kvara i da injektiraju reaktivnu snagu u mrežu. Za karakteristiku injektiranja reaktivne snage u mrežu tokom propada napona koristiće se kriva data u [11]. Reaktivna struja se linearno povećava od nule pri propadu napona na 90% nominalne vrijednosti sve do propada napona na 50% nominalne vrijednosti kada dostiže nominalnu struju pretvarača. Za propade napona na vrijednosti manje od 50% nominalnog napona u mrežu se isporučuje reaktivna struja koja je jednaka nominalnoj struji pretvarača.

Odziv vjetroagregata snage 1 MW, pri propadu napona na 40% nominalne vrijednosti prikazan je na Sl. 13. U normalnom radnom stanju vjetroagregat injektira u mrežu samo aktivnu snagu, dok je reaktivna jednaka nuli. Pri propadu napona na 40% nominalne vrijednosti, vjetroagregat u mrežu injektira samo reaktivnu struju, prema tome aktivna snaga pada na nulu. Injektirajući reaktivnu struju koja po amplitudi odgovara nominalnoj struji, u mrežu se injektira reaktivna snaga dosta manja od nominalne, razlog za to leži u činjenici da je napon mreže i odgovarajući napon po d osi niži od nominalnog. Pa prema (3), ako je struja po q osi nominalna i ako je napon po d snižen na 40% nominalne vrijednosti u mrežu se injektira:

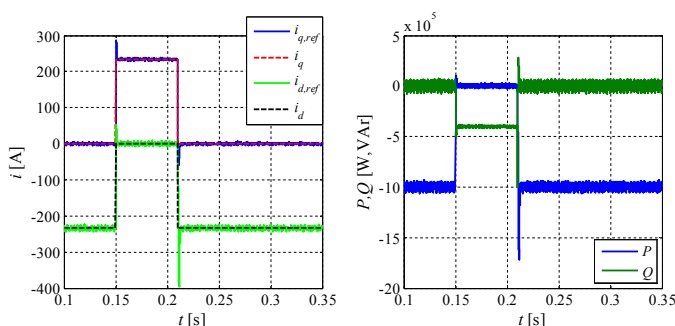
$$Q_{dq} = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) = -\frac{3}{2} 0,4 \cdot u_d i_q. \quad (5)$$

Dakle, u mrežu se injektira 40% snage koja bi se mogla injektirati, ako bi aktivna snaga bila na nuli, tokom nominalnog napona na priključcima. Kontrola snage je ostvarena

kontrolom struja u dq koordinatnom sistemu, pa su na slici prikazane referentne vrijednosti i odzivi struja. Nastankom kvara, aktivna snaga pada na nulu, i blokira se regulator napona na kondenzatoru. To dovodi do pojave da napon linearno raste. O ovome treba voditi računa, posebno za propade napona koji traju duže vremena i kod kojih se u mrežu ne injektira aktivna snaga. Usljed povišenog napona na kondenzatoru, povratkom nominalnog napona na priključke vjetroatregata, regulator napona ulazi u zasićenje, te referentna struja po d osi raste do maksimalne vrijednosti (ograničena je ograničenjem struje regulatora) što dovodi do toga da pretvarač u mrežu injektira aktivnu snagu veću od nominalne. Snižanjem napona na kondenzatoru na nominalnu vrijednost, aktivna snaga se vraća na nominalnu vrijednost. U drugom slučaju ako se pretpostavi da je napon na kondenzatoru konstantan, kakav je slučaj kod vjetroatregata sa sinhronom mašinom, nema porasta aktivne snage preko nominalne povratkom nominalnog napona na priključke vjetroatregata. Odziv vjetroatregata u ovom slučaju takođe, za propad napona na priključcima na 40% nominalne vrijednosti prikazan je na Sl. 14. U suštini odziv je jako sličan prethodnom slučaju, smo u odnosu na prethodni slučaj nema porasta struje po d osi, odnosno porasta aktivne snage nakon povratka nominalnog napona napajanja.



Sl. 13. Odziv vjetroatregata tipa D pri propadu napona u priključnoj mreži na 40% nominalne vrijednosti i trajanja 0,06 s.



Sl. 14. Odziv vjetroatregata tipa D pri propadu napona u priključnoj mreži na 40% nominalne vrijednosti i trajanja 0,06 s pod pretpostavkom da je napon na kondenzatoru konstantan.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran odziv vjetroatregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i vjetroatregata sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora koji je dimenzionisan na punu snagu generatora na

propade napona u priključnoj mreži. Za analizu odziva vjetroatregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa korišćen je model kompletnog sistema, dok je za analizu odziva vjetroatregata sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora napravljen model samo pretvarača na strani mreže. Analiziran je odziv vjetroatregata pri propadu napona na 20%, odnosno 40% nominalne vrijednosti za vjetroatregat sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora. Pri posmatranim propadima napona aktivna snaga oba vjetroatregata pada na nulu, a u mrežu se injektira reaktivna struja kako bi se popravile naponske prilike. Povratkom napona na stanje prije poremećaja, snage vjetroatregata se vraćaju na prvobitne vrijednosti.

LITERATURA

- [1] Global Wind Energy Council, Global Wind Report 2018, April 2019.
- [2] Wind Europe Business Intelligence, Wind energy in Europe in 2018 - Trends and statistics, 2019.
- [3] M. Tsili, and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms," IET Renew. Power Gener., vol. 3, no. 3, pp. 308-332, March 2009.
- [4] H. Yi-Liang, W. Yuan-Kang, C. Chiu-Kuo, W. Chih-Hua, C. Wei-Tai, and C. Liang-Il, "A Review of the Low-Voltage Ride-Through Capability of Wind Power Generators," Energy Procedia, vol. 141 pp. 378-382, December 2017.
- [5] S. Chakrabort, M.G. Simões, W.E. Kramer, Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems - A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer-Verlag London 2013.
- [6] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [7] Z. Chen, "Generators of Modern Wind Turbines," Proc. of the International Conference and Exhibition of Renewable Energy, 2008.
- [8] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2011.
- [9] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion System, Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2014.
- [10] MATLAB Documentation, "Wind Farm - DFIG Detailed Model," dostupno na: www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-dfig-detailed-model.html.
- [11] S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, A. Martinez-Velasco, C. Silva, J. Pontt, J. Rodriguez, "Control strategies based on symmetrical components for grid-connected converters under voltage dips," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 6, pp. 2162-2173, Jun 2009.
- [12] J. F. Conroy, R. Watson, "Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator," IET Renew. Power Gener., vol. 1, no. 3, pp. 182-189, September 2007.
- [13] M. Fatu, C. Lascu, G. D. Andreescu, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, I. Boldea, "Voltage sags ride-through of motion sensorless controlled PMSG for wind turbines," Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, vol. 1, pp. 171-178, September 2007.

ABSTRACT

In recent years, global wind energy capacity has increased rapidly. The increasing wind power penetration gradually changes the dynamic characteristics of power systems. To maintain the transient stability of a power system, large scale wind power plants must stay connected to the grid during voltage sags. In this paper, dynamic responses of doubly-fed induction generator wind turbines and full converter wind turbines to voltage sags are analyzed.

DYNAMIC RESPONSE OF MODERN WIND TURBINE GENERATORS TO VOLTAGE SAGS

Predrag Mršić, Željko Đurišić

Optimalno pozicioniranje prigušnica u prenosnoj mreži Bosne i Hercegovine

Jovana Tuševljak¹, Željko Đurišić²

¹“Elektroprenos-Elektroprijenos BiH” a.d. Banja Luka, Bosna i Hercegovina

²Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

jovana.tusevljak@elprenos.ba, djurisic@etf.rs

Sažetak— Podopterećena prenosna mreža, odnosno vodovi opterećeni ispod prirodne snage, što je česta pojava na 400 kV i 220 kV vodovima u Bosni i Hercegovini ali i susjednim sistemima, značajan su izvor reaktivne snage sa posljedicom povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrijednosti, što se u najvećem broju slučajeva ne može uspješno kompenzovati bez dodatnih kompenzacionih uređaja ili rada generatora u potpobudi.

Rad generatora u potpobudi često nije prihvatljiv zbog problema stabilnosti i efekta pregrijavanja dijelova rotorskog gvožđa kod starijih generatora. Otočne prigušnice su elementi koji omogućavaju apsorpciju reaktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu i njihovo pozicioniranje može biti optimizovano tako da pružaju najbolji efekat.

U ovom radu analizirane su naponske prilike i tokovi reaktivne snage unutar elektroenergetskog sistema Bosne i Hercegovine, te je dat prijedlog optimalnog pozicioniranja otočnih prigušnica u cilju eliminisanja pojave visokih napona u prenosnoj mreži i postizanja željenog naponskog profila. U analize su uključene i vjetroelektrane čija je izgradnja u toku ili planirana u skoroj budućnosti, a koje dodatno mijenjaju tokove snaga u sistemu i mogu bitno uticati na napone u priključnoj mreži.

Ključne riječi— Podopterećena prenosna mreža, otočne prigušnice, naponske prilike, reaktivne snage.

I. UVOD

Jedan od glavnih faktora koji utiču na stabilan rad elektroenergetskog sistema je održavanje napona u dozvoljenim granicama. Naponi iznad dozvoljenih granica nepovoljno utiču na izolacione karakteristike opreme smanjujući vijek trajanja izolacije, a pored dielektričnih naprezanja, povećanje napona može izazvati dodatne gubitke usljed korone, kao i povećane gubitke u gvožđu transformatora. Naponi ispod graničnih vrijednosti povećavaju gubitke su opasnost od naponskog sloma i prekida napajanja potrošača.

Podopterećena prenosna mreža, odnosno vodovi opterećeni ispod prirodne snage, što je česta pojava na 400 kV i 220 kV vodovima u Bosni i Hercegovini, ali i susjednim elektroenergetskim sistemima, su značajan izvor reaktivne snage sa posljedicom povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrijednosti [1]. Ovo povećanje napona se u najvećem broju slučajeva ne može kompenzovati bez dodatnih kompenzacionih uređaja ili rada generatora u potpobudi. U

tabeli I [1] su navedene prirodne snage i proizvodnja reaktivne snage za tipične nadzemne vodove naponskog nivoa 110 kV, 220 kV i 400 kV. Proizvodnja reaktivne snage se odnosi na nominalne naponske uslove kada je vod u praznom hodu.

TABELA I. PRIRODNE SNAGE I PROIZVODNJA REAKTIVNE ENERGIJE ZA TIPIČNE NADZEMNE VODOVE U PRENOSNOJ MREŽI BiH

Naponski nivo [kV]	Tip provodnika i poprečni presjek [mm ² /mm ²]	Maksimalna snaga [MVA]	Prirodna snaga [MW]	Proizvodnja Q [Mvar/km]
110	AlFe 240/40	122	30	0,05
220	AlFe 360/57	300	130	0,14
400	AlFe 2x490/65	1328	550	0,6

Naponsko-reaktivne prilike na prenosnim mrežama uzrokovane su režimima rada generatora, vodovima i kablovima, rotacionim kompenzatorima i savremenim statičkim VAR kompenzatorima. Dok su generatori i kompenzatori regulacioni elementi sa kontinuiranom regulacijom i mogu po potrebi biti izvori i potrošači reaktivne snage, visokonaponski vodovi nisu regulacioni elementi, ali mogu biti značajni proizvođači, odnosno potrošači reaktivne snage, što zavisi samo od njihovog opterećenja. Rad generatora u potpobudi često nije prihvatljiv zbog problema stabilnosti i efekta pregrijavanja dijelova rotorskog gvožđa. Otočne prigušnice su elementi koji omogućavaju apsorpciju reaktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu i njihovo pozicioniranje može biti optimizovano tako da pružaju najbolji efekat.

Cilj ovog rada je analiza mogućnosti regulacije napona prenosne mreže Bosne i Hercegovine ugradnjom otočnih kompenzacionih prigušnica i prijedlog njihove optimalne snage i alokacije u prenosnoj mreži. Primjena paralelno priključenih prigušnica već dugi niz godina aktuelna je u svim susjednim elektroenergetskim sistemima, koji imaju slabo opterećene dugačke vodove visokog napona.

II. OTOČNE PRIGUŠNICE

Otočne prigušnice su elementi koji omogućavaju apsorpciju reaktivne snage u elektroenergetskom sistemu. Prigušnice se koriste za kompenzaciju/apsorpciju viškova

reaktivne snage u pojedinim čvorištima mreže, pri čemu se održava željeni naponski profil u EES-u. Grade se kao monofazne ili trofazne jedinice, a s obzirom na regulaciju snage, mogu biti prigušnice fiksne snage ili regulacione prigušnice (prigušnice promjenjive snage).

Fiksne prigušnice su pogodnije za konstantna opterećenja i slabo promjenjive uslove u mreži [2]. Promjenjive prigušnice su fleksibilne na promjene u mreži, mogu se prilagoditi zatom opterećenju i uslovima u mreži.

Na mrežu koju treba kompenzovati priključuju se direktno (na sabirnice visokonaponskih postrojenja preko sklopni aparata) ili preko tercijera mrežnih transformatora. U periodima visokih opterećenja u EES-u i povećanog prenosa dugačkim visokonaponskim vodovima, prigušnice je najčešće potrebno isključiti s mreže.

III. OPTIMALNO POZICIONIRANJE PRIGUŠNICA U PRENOSNOJ MREŽI BIH

Na simulacionom modelu prenosnog sistema Bosne i Hercegovine analizirane su naponske prilike u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži za realno stanje minimalnog opterećenja sistema, koje predstavlja kritični režim u pogledu visokih napona. Model predstavlja trenutno stanje kompletnog elektroenergetskog sistema BiH za režim ljetnog minimuma. Pored toga, modelovana je i novoizgrađena vjetroelektrana Mesihovina i perspektivna vjetroelektrana Trusina, koje će dodatno promijeniti tokove snaga u sistemu i uticati na napone u okolnoj prenosnoj mreži.

Za režim minimalnog opterećenja EES-a vrijednosti napona na pojedinim sabirnicama 400 kV i 220 kV prevazilaze vrijednosti napona definisane Mrežnim kodeksom, tabela II [3].

TABELA II. OPSEG NAPONA U NORMALNOM POGONU U PRENOSNOJ MREŽI

Nazivni napon [kV]	Naponski opseg	Naponski opseg (j.v.)
400	360-420	0,9-1,05
220	198-245	0,9-1,114
110	99-123	0,9-1,118

Kako bi se smanjile vrijednosti napona u periodima niskog opterećenja, razrađena su različita varijantna rješenja sa prijedlozima lokacija za ugradnju otočnih prigušnica.

Da bi se postiglo značajno poboljšanje napona, prigušnice se trebaju postaviti u one čvorove koji imaju probleme s naponom, [5]. Da bi se identifikovali takvi čvorovi i procijenio stepen problema sa naponom, svaki čvor se može opisati tzv. indeksom napona, koji se definiše na sljedeći način:

$$V_{index\ i} = \begin{cases} 1 - \frac{V_{max} - V_i}{V_{max} - 1}, & V_i > 1 \\ 1 - \frac{V_i - V_{min}}{1 - V_{min}}, & V_i \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

gdje je:

V_{max} - maksimalni dozvoljeni napon mreže, definisan u tabeli II,

V_{min} - minimalni dozvoljeni napon mreže, definisan u tabeli II,

V_i - napon čvora i .

Pomoću indeksa napona može se procijeniti ozbiljnost narušenosti naponskih granica svakog čvora. Kada napon čvora više odstupa od dozvoljenog opsega, indeks napona tog čvora je veći, i za probleme podnapona i prenapona. Kada vrijednost napona čvora prevaziđe dozvoljenu vrijednost, indeks napona će dati rezultat veći od 1.

Na osnovu ove analize, proračunati su indeksi napona svih čvorova prenosne mreže 400 kV i 220 kV za bazni kritični slučaj minimalnog opterećenja mreže. Pretpostavljeno je da u ljetnom režimu date vjetroelektrane proizvode 30% instalisane snage. Generatori u termoelektranama Tuzla, Ugljevik i Kakanj i hidroelektranama Višegrad, Bočac, Jablanica, Jajce u okviru proračuna rade u induktivnom režimu da bi dostigli zadati napon na pragu prenosa.

Najkritičniji rezultati, odnosno čvorovi sa najvećim indeksom napona su prikazani u tabeli III.

TABELA III. ČVORovi SA NAJVEĆIM INDEKSIMA NAPONA ZA REALNO STANJE MINIMALNOG OPTEREĆENJA SISTEMA

Čvor	Maksimalni dozvoljeni napon [kV]	Napon čvora [kV]	Indeks napona prema izrazu (1)
TS Banja Luka 6	420	430,32	1,024
TS Sarajevo 20	420	429,51	1,023
RP Trebinje	420	431,86	1,028
TS Ugljevik	420	428,4	1,02
TS Sarajevo 10	420	429,48	1,022
HE Višegrad	420	426,29	1,015
TS Gacko	420	427,1	1,016
RP Stanari	420	428,92	1,021
TS Visegrad	420	426,4	1,015
TS Tuzla 4	420	427,88	1,019
TS Mostar 4	420	428,58	1,020
TS Sarajevo 20	245	247,22	1,009
TS Višegrad	245	245,3	1,001

Na osnovu prikazanih naponskih prilika u tabeli III, može se zaključiti da su zbog visokih napona ugrožene skoro sve TS u sjevernom (TS Tuzla, TS Banja Luka 6), središnjem (TS Sarajevo 10 i TS Sarajevo 20) i južnom (TS Mostar 4, TS Trebinje) dijelu prenosne mreže BiH. To znači da problem visokih napona nije usko lokalizovan i uzrokovan generisanjem reaktivne snage jednog slabo opterećenog voda 400 kV, već je proširen po čitavom EES-u, pa i rješenje tog problema treba tražiti na sistemskom, a ne na lokalnom nivou, [4]. Analizirajući pojedinačne naponske nivoe moguće je primijetiti da su najugroženija čvorišta 400 kV mreže, zatim slijede čvorišta 220 kV mreže. To upućuje na osnovni uzrok problema, odnosno slabo opterećene 400 kV vodove koji generišu visoke iznose reaktivne snage.

Pozicioniranje otočnih prigušnica u mreži potrebno je optimizovati kako bi pružale najbolji efekat. Na osnovu prikazanih čvorova sa najvećim indeksima napona iz tabele III, odabirano je pet najugroženijih čvorova 400 kV, koji predstavljaju potencijalne lokacije za ugradnju prigušnica, uzimajući u obzir i njihov geografski raspored: TS Banja Luka 6, RP Stanari, TS Tuzla 4, TS Sarajevo 20 i TS Mostar 4. Nakon što su odabrane potencijalne lokacije za ugradnju prigušnica, razrađena su varijantna rješenja sa različitim kombinacijama snaga prigušnica i lokacija njihove ugradnje, a potom je svako varijantno rješenje analizirano u programskom paketu PSS-E. Analiza i odabir najpogodnije varijante su izvršeni prema kriterijumu najvećeg faktora rasterećenja napona, pri čemu mora biti zadovoljen uslov da naponi u svim čvorovima budu ispod maksimalno dozvoljenih gornjih granica propisanih Mrežnim kodeksom, tabela II.

Faktor rasterećenja napona predstavlja srednje relativno sniženje napona u odnosu na bazni slučaj i definiše se kao:

$$FR = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_{iB}) / V_n}{n} \cdot 100, \quad (2)$$

gdje je:

V_i – napon čvora i za određenu varijantu ugradnje prigušnice,

V_{iB} – napon čvora i u baznom slučaju minimalnog opterećenja mreže,

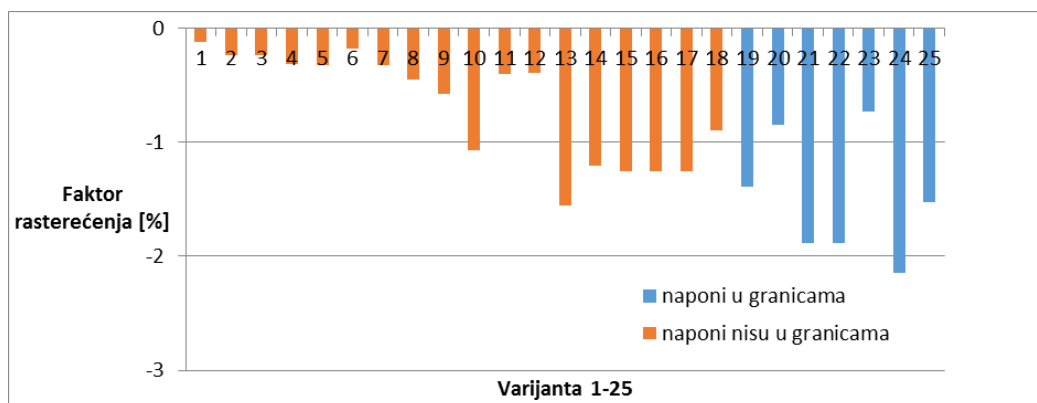
V_n – nominalni napon čvora,

n – ukupan broj čvorova za koje naponi u baznom slučaju minimalnog opterećenja u mreži prevazilaze granice definisane Mrežnim kodeksom.

Prikaz različitih analiziranih varijanti rješenja je dat u tabeli IV i na sl. 1.

TABELA IV. VARIJANTNA RJEŠENJA UGRADNJE PRIGUŠNICA I ODGOVARAJUĆI FAKTORI RASTEREĆENJA NAPONA

Varijanta broj	Qinst [Mvar]	Lokacija TS	Faktor rasterećenja napona [%]
1	20	Banja Luka 6	0,122
2	20	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	0,232
3	20	Banja Luka 6, Sarajevo 20 i Trebinje,	0,232
4	20	Banja Luka 6, Sarajevo 20, Trebinje i Tuzla 4	0,315
5	50	Banja Luka 6	0,320
6	50	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	0,180
7	50	Banja Luka 6, Sarajevo 20 i Trebinje	0,326
8	50	Banja Luka 6, Sarajevo 20, Trebinje i Tuzla 4	0,446
9	50	svih 5 kritičnih čvorova	0,574
10	60	svih 5 kritičnih čvorova	1,067
11	80	Sarajevo i Trebinje	0,404
12	80	Mostar i Tuzla	0,387
13	80	svih 5 kritičnih čvorova	1,558
14	100	Banja Luka 6 i Mostar 4	1,204
15	100	Banja Luka 6 i Trebinje	1,249
16	100	Banja Luka 6, Mostar i Tuzla 4	1,258
17	100	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	1,258
18	100	Banja Luka 6 i Tuzla 4	0,891
19	150	Banja Luka 6 i Mostar 4	1,385
20	150	Sarajevo 20 i Mostar 4	0,850
21	150	Sarajevo 20 i Tuzla 4	1,888
22	150	Banja Luka 6 i Trebinje	1,888
23	150	Mostar 4 i Tuzla 4	0,728
24	150	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	2,148
25	150	Banja Luka 6 i Tuzla 4	1,523



Sl. 1. Faktori rasterećenja za različita varijantna rješenja (25) ugradnje prigušnica, opisana u tabeli IV

Na osnovu prikazanih rezultata, vidi se da za analizirane varijante ugradnje prigušnica 1-18 naponi u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži nisu unutar dozvoljenih granica definisanih Mrežnim kodeksom. Može se zaključiti da je prema kriterijumu maksimalnog ukupnog rasterećenja napona na svim unaprijed definisanim kritičnim čvorovima, optimalno rješenje ugradnja dvije prigušnice od po 150 Mvar, prve u TS Banja Luka 6 i druge u TS Sarajevo 20. U ovom slučaju je ukupno relativno smanjenje napona u odnosu na bazni slučaj 2,148%, a pri tome su svi naponi u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži ispod gornje granice definisane Mrežnim kodeksom.

Naponi u kritičnim čvorovima za bazni slučaj minimalnog opterećenja sistema i nakon ugradnje dvije prigušnice po 150 Mvar u TS Banja Luka 6 i TS Sarajevo 20 su prikazani u tabeli V.

TABELA V. NAPONI NA KRITIČNIM ČVOROVIMA PRIJE I NAKON UGRADNJE PRIGUŠNICE 150 MVAR U TS BANJA LUKA 6 I TS SARAJEVO 20

Čvor	Napon čvora [kV] za bazni slučaj minimalnog opterećenja u sistemu	Napon čvora [kV] nakon ugradnje prigušnice 150 Mvar u TS Banja Luka 6 i TS Sarajevo 20
TS Banja Luka 6	430,32	413,8
TS Sarajevo 20	429,51	415,72
RP Trebinje	431,86	419,19
TS Ugljevik	428,4	419,22
TS Sarajevo 10	429,48	418,56
HE Višegrad	426,29	419,6
TS Gacko	427,1	419,7
RP Stanari	428,92	417,89
TS Visegrad	426,4	418,61
TS Tuzla 4	427,88	419,08
TS Mostar 4	428,58	418,02
TS Sarajevo 20	247,22	240,9
TS Višegrad	245,3	242,91

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirane naponske prilike u prenosnoj mreži Bosne i Hercegovine za režim minimalnog opterećenja, koji je kritičan sa aspekta napona. Analizirano je trenutno stanje sa modelovanim vjetroelektranama Trusina i Mesihovina. U baznom slučaju prenosne mreže bez ojačanja za režim ljetnog minimuma naponi u većini čvorišta 400 kV mreže su povišeni.

Na osnovu analize naponskih prilika u baznom slučaju i proračunatog indeksa napona za kritične tačke u mreži, kreirana su varijantna rješenja za regulaciju napona kompenzacijom reaktivne snage pomoću jedne ili više prigušnica. Za analiziranih 25 varijanti određen je faktor rasterećenja napona prema kriterijumu ukupnog relativnog sniženja napona u odnosu na bazni slučaj, uz uslov da naponi u svim čvorovima budu ispod maksimalno dozvoljenih vrijednosti propisanih Mrežnim kodeksom za odgovarajući naponski nivo. Ovaj kriterijum izdvaja varijantu za ugradnju prigušnica kapaciteta 150 Mvar-a u TS Banja Luka 6 i u TS Sarajevo, pri čemu je ukupno relativno smanjenje napona u odnosu na bazni slučaj 2,148%.

Treba napomenuti da je analiziran samo kritični režim minimalnog opterećenja, te da je svakako potrebno analizirati tipično trajanje ovakvih i drugih kritičnih naponskih prilika na godišnjem nivou i na osnovu toga odrediti optimalne lokacije i kapacitet kompenzacionih prigušnica.

Kako se sezonske varijacije bitno odražavaju na prilike u mreži stvarajući značajne razlike između režima maksimalnog i minimalnog opterećenja, preporučuje se ugradnja regulacionih prigušnica, koje se mogu prilagoditi uslovima opterećenja, jer je jasno da ovakve naponske prilike zavise od opterećenja u mreži i nisu konzistentne tokom godine.

Vjetroelektrane čija se proizvodnja mora prihvatiti kada je dostupna zbog feed-in tarife se smatraju otežavajućim faktorom, ali je potrebno razmotriti njihovo učešće u regulaciji napona gdje mogu ponuditi usluge kompenzacije radom u kapacitivnom režimu.

Kako je jedan od glavnih faktora koji utiču na stabilan rad elektroenergetskog sistema održavanje napona u dozvoljenim granicama, ugradnja prigušnica itekako utiče na poboljšanje efikasnosti prenosne mreže i kvalitet napona u pojedinim njenim čvorištima, u toj mjeri da su svi naponi u granicama definisanim Mrežnim kodeksom. Osim ugrožavanja opreme, previsoki naponi generalno mogu dovesti do povećanja gubitaka u 400 kV mreži usljed pojave opšte korone, takođe i povećanih gubitaka u gvožđu interkonektivnih transformatora.

Investicija u mehanički uklopive prigušnice na dvije predložene lokacije se procjenjuje na oko 7 miliona KM. Preliminarna ekonomska analiza ukazuje na ekonomsku opravdanost u početnom periodu ugradnje mehanički ukloplivih prigušnica, ali uz smanjenu dobit od ugradnje u budućnosti zavisno o ostvarenju ostalih uticajnih faktora, kao što su: mogućnost i motivacija rada generatora u kapacitivnom području, izgradnja novih termoblokova i njihov priključak na 400 kV mrežu, ugradnja prigušnice u EES RH, porast opterećenja konzuma u BiH, te povećanje tranzita 400 kV mrežom prvenstveno kao posljedica HVDC veze Crna Gora – Italija. Ostvarenje bilo kojeg od tih faktora smanjilo bi profitabilnost izgradnje kompenzacijskog postrojenja u BiH.

LITERATURA

- [1] Nezavisni operator sistema, Identifikacija nedozvoljenih napona na prenosnoj mreži BiH, Sarajevo, oktobar 2010,
- [2] Siemens AG, Variable Shunt Reactors, 2018,
- [3] Nezavisni operator sistema, Mrežni kodeks, januar 2019,
- [4] Energetski institut Hrvoje Požar, Tehnoekonomski aspekti regulacije napona kao pomocne (sistemske) usluge – identifikacija i sanacija nedozvoljenih napona na prenosnoj mreži BiH, Zagreb, maj 2012,
- [5] Muhammad Nurdin, Fathin Saifur Rahman, Rizky Rahmani, Nanang Hariyanto, , Placement of Shunt VAR Compensator Based on Sensitivity Analysis, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 6, Jun 2014.

ABSTRACT

Underloaded transmission network (lines loaded below the natural power, which often occurs on 400 kV and 220 kV lines in Bosnia and Herzegovina and adjacent systems) is a

significant source of reactive power with a consequence of increasing the voltage above the maximum permissible values. In most cases, this cannot be successfully compensated without additional compensating devices or with the underexcited generators.

The underexcited regime of generators is often unacceptable due to the stability problems and the effect of overheating rotor parts in older generators. Shunt reactors are elements that enable absorption of reactive power in the power system and their positioning can be optimized to provide the best effect.

This paper analyzes voltage conditions and reactive power flows within Bosnia and Herzegovina's power system and provides a proposal for optimum positioning of shunt reactors

in order to eliminate high voltage phenomena in the transmission network and to achieve the desired voltage profile. The analysis includes wind farms which are under construction or perspective wind farms, which additionally modify the power flows in the system and can significantly affect the voltages in the connection network.

OPTIMAL POSITIONING OF SHUNT REACTORS IN TRANSMISSION NETWORK OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

Jovana Tuševljak, Željko Đurišić

Gubici na EE mreži usled korišćenja opreme za rudarenje kriptovaluta

Dejan Stevanović¹, Miona Andrejević Stošović², Marko Dimitrijević², Predrag Petković²

¹Inovacioni centar naprednih tehnologija (ICNT), Niš, Srbija

²Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Niš, Srbija

dejan.stevanovic@icnt.rs, {miona.andrejevic, marko.dimitrijevic, predrag.petkovic}@elfak.ni.ac.rs

Sažetak— U ovom radu biće predstavljen jedan od novijih vidova potrošnje električne energije. Naime, kao potrošač biće razmotrena oprema za rudarenje kriptovaluta. Sve veći broj potrošača ovog tipa dovodi do povećanja ukupnog broja nelinearnih potrošača u elektroenergetskoj mreži, tako da aktivna snaga/energija više ne predstavlja dominantan deo ukupno isporučene snage/energije. Usled činjenice da distributeri električne energije ne mere ostale komponente snage, oni beleže značajni nivo gubitaka. U ovom radu akcenat će biti na gubicima koji se javljaju u elektroenergetskom sistemu usled korišćenja opreme za rudarenje.

Ključne reči—harmonici; elektronsko brojilo; gubici elektroenergetskog sistema; kriptovaluta.

I. UVOD

Razvoj elektronike omogućio je proizvodnju pametnih, energetski efikasnih uređaja i opreme. Njihova primena kako u industriji, tako i u domaćinstvima doprinela je značajnoj uštedi u potrošnji električne energije, a samim tim i smanjenju emisije CO₂. Na prvi pogled, napravljen je značajan napredak bez negativnih posledica. Nažalost, to nije potpuno tačno. Naime, savremeni električni uređaji uglavnom koriste jednosmerni (DC) napon za napajanje. Proces konverzije naizmeničnog u jednosmerni napon obavlja se pomoću AC/DC pretvarača. Samim tim, AC/DC pretvarači su postali najbrojnija opterećenja na mreži. Nažalost, njihova nelinearna priroda utiče na pojavu viših harmonika u elektroenergetskoj mreži. Viši harmonici u elektroenergetskoj mreži izazivaju brojna neželjena dejstva, [1]-[3]. Najznačajnija posledica harmonika su gubici koji se javljaju u samom elektroenergetskom sistemu [4], [5].

Konstantan rast broja priključenih nelinearnih potrošača na mreži doveo je do toga da referentne međunarodne organizacije propišu standarde kojima se ograničava maksimalna dozvoljena vrednost harmonika. Najpoznatiji standardi iz ove oblasti su: IEEE 519-1992, standardi IEC serije 61000 i EN 50160. Ovim standardima propisane su samo maksimalne dozvoljene vrednosti harmonika, ali nije definisano šta se dešava u slučaju da ih potrošač premaši. U tom slučaju bila bi moguća dva pristupa: isključenje takvog potrošača sa mreže, ili uvođenje dodatnih penala. Autori ovog teksta smatraju da je drugi pristup prikladniji. Implementacija ovog rešenja je moguća samo u slučaju da postoji sistem za

detekciju nelinearnih potrošača na mreži. Jedan takav sistem je opisan u [6].

Poslednjih nekoliko godina jedan od najvećih nelinearnih potrošača predstavlja oprema za rudarenje kriptovaluta. Oprema koja se koristi za rudarenje digitalne valute već sada čini 0,15% svetske potrošnje energije, što uveliko prevazilazi godišnju potrošnju Irske ili većine afričkih zemalja [7]. Da bi se bolje stekao uvid u potrošnju ove opreme, aktuelan je podatak da ona potroši 29 puta više energije od svih Tesla automobila koji se trenutno koriste [8].

U ovom radu pokušaćemo da predstavimo nivo gubitaka koji se javljaju u elektroenergetskom sistemu usled rudarenja kriptovaluta i neodgovarajuće politike naplate. Rad se sastoji od četiri poglavlja. U narednom poglavlju daćemo pregled osnovnih veličina koje se koriste pri merenju parametara elektroenergetskog sistema, a zatim će biti predstavljen metod za eliminaciju gubitaka u elektroenergetskom sistemu, dok su rezultati merenja prikazani u poglavlju 3. Zaključak je dat u poglavlju 4.

II. MERENJE PARAMETARA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Usled postojanja harmonika u elektroenergetskom sistemu prilikom računanja veličina kao što su: efektivna vrednost napona/struje, aktivna, reaktivna i prividna snaga, mora se uzeti u obzir i efekat harmonika. Trenutna vrednost signala koji sadrži harmonike može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$x(t) = \sum_{h=1}^M X_h \sin(\omega_h t + \alpha_h), \quad (1)$$

gde je h red harmonika, M harmonik najvišeg reda, dok X_h , ω_h i α_h , predstavljaju amplitudu, frekvenciju i fazu h -tog harmonika. Efektivna vrednost signala iskazana izrazom (1), računa se kao:

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{h=1}^M X_h^2} \quad (2)$$

Proizvod efektivne vrednosti napona i struje istog harmonika predstavlja prividnu snagu tog harmonika. Ukupna aktivna snaga se definiše kao:

$$P = \sum_{h=1}^M V_{\text{RMS}_h} I_{\text{RMS}_h} \cos(\theta_h) = P_1 + P_H, \quad (3)$$

gde θ_h predstavlja fazni ugao između napona i struje. Ukupna aktivna snaga može se predstaviti kao suma snaga osnovnog harmonika P_1 i snaga svih viših harmonika P_H ($h=2, \dots, M$).

Prema Budeanu [3], [9], [10], reaktivna snaga se računa kao:

$$Q = \sum_{h=1}^M V_{RMS_h} I_{RMS_h} \sin(\theta_h) = Q_1 + Q_H. \quad (4)$$

Slično kao i u (3), Q_1 i Q_H označavaju reaktivnu snagu osnovne komponente i reaktivnu snagu svih viših harmonika, respektivno. Uprkos osporavanju pojedinih naučnika, ova definicija je široko prihvaćena u naučnoj javnosti [11], [12]. Više informacija o različitim načinima računanja reaktivne snage može se naći u [13].

Proizvod efektivne vrednosti napona i struje predstavlja prividnu snagu:

$$S = I_{RMS} \cdot V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^M V_{RMS_h}^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^M I_{RMS_h}^2}. \quad (5)$$

Usled primene sve većeg broja nelinearnih potrošača aktivna snaga/energija ne predstavlja dominantnu komponentu isporučene snage. Deo snage koja se javlja usled prisustva viših harmonika praktično je isporučena potrošaču, ali je nevidljiva sa stanovišta distributera. Među prvima koji su uočili problem i koji su krenuli sa konkretnim rešavanjem bili su stručnjaci Enel S.p.A. (Ente Nazionale per l'Energia elettrica) grupacije (www.enel.com) koja predstavlja najznačajnijeg distributera u Italiji, i drugog prema instaliranoj snazi u Evropi. Oni su došli do zaključka da usled promene karaktera potrošača dolazi do pojave gubitaka u elektroenergetskom sistemu. Zato su odlučili da zamene stara elektro-mehanička brojila novim elektronskim koja imaju mogućnost da, osim aktivne, mere i reaktivnu snagu. Instalacija ovih brojila krenula je 2001. godine i do sada je 99% brojila na teritoriji Italije zamenjeno. Na ovaj način gubici su delimično smanjeni, ali nisu eliminisani. U prethodno objavljenim radovima smo dokazali da je osim merenja aktivne i reaktivne snage potrebno meriti i snagu izobličenja [4], [5].

Naime, kada se primene jednačine za izračunavanje aktivne i reaktivne snage (3), (4), a prividna snaga se izračuna na osnovu (5), dobija se, da je u prisustvu harmonika:

$$S^2 > P^2 + Q^2. \quad (6)$$

S obzirom da za prostoperiodične sisteme važi da je $S^2 = P^2 + Q^2$, jasno je da razlika potiče od prisustva viših harmonika, odnosno da je ona posledica izobličenja napona i struje u sistemu. Prateći ukupnu logiku u definisanju aktivne i reaktivne snage, Budeanu je još 1927. godine uveo pojam *snage izobličenja*, koji je posledica prisustva harmonika u mreži. Korigovao je izraz za prividnu snagu:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (7)$$

gde je sa D označio *snagu izobličenja*. Suština ove korekcije sadržana je kroz činjenicu da je u odsustvu harmonika $D=0$, tako da važi $S^2 = P^2 + Q^2$. Očigledno da ova poznata definicija postaje specijalni slučaj primene (7). Odavde sledi da je snagu izobličenja moguće izračunati kao:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (8)$$

Računanjem snage izobličenja na osnovu (8), i uzimanjem u obzir te veličine prilikom kreiranja računa o utrošenoj

električnoj energiji, distributeri bi znatno smanjili nivo gubitaka koji postoje u samom sistemu. Prilikom tarifiranja neophodno je voditi računa o dozvoljenom pragu snage izobličenja kod uređaja koji ispunjavaju standard IEEE 519-1995 I IEC/EN61000-3-2. Međutim, treba poštediti korisnike plaćanja snage izobličenja koja se javlja na linearnim potrošačima pobuđenim nelinearnim naponom. Naime, aktuelni standard obavezuje distributere da obezbede napon sa ukupnim izobličenjem manjim od 5%. Takođe, treba imati u vidu da izračunavanje D primenom (8) zavisi od tačnosti merenja Q . Različiti izrazi za definiciju reaktivne snage Q i manja zahtevana klasa tačnosti ne bi smeli značajno da ugroze ni jednu stranu u tarifnom sistemu.

Sve ovo ukazuje na potrebu da se uvede neka dozvoljena granična vrednost snage izobličenja koja se ne bi obračunavala prilikom kreiranja konačnog računa o utrošenoj električnoj energiji. Istovremeno, to znači da bi za taj iznos trebalo umanjiti izmerenu vrednost snage izobličenja. Predlažemo korekciju koja se može iskazati uz pomoć obrasca:

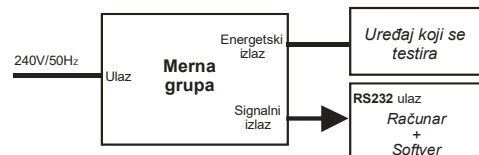
$$D_p = D - \gamma \cdot S \quad (9)$$

gde D i S predstavljaju vrednost izmerene snage izobličenja i prividne snage respektivno, a γ označava konstantu koju treba definisati. Odluku o veličini konstante γ kojom će se korigovati izmerene vrednosti doneli bi eksperti u dogovoru sa distributerima električne energije. Predloženo je u [5], [13] da vrednost ovog koeficijenta bude 0,1. Do pomenute vrednosti došlo se nakon razmatranja dozvoljene vrednosti harmonika napona/struje na mestu priključka koju propisuje standard IEEE 519-1995. Ovaj standard je posmatran kao referentni, umesto IEC61000-3-2 koji se pretežno primenjuje na teritoriji Evrope, iz veoma pragmatičnog razloga. Naime, standard IEC61000-3-2 reguliše karakteristike elektronskih uređaja, dok standard IEEE 519-1995 definiše dozvoljene vrednosti harmonika napona/struje na mestu gde se potrošač priključuje na EE mrežu, odnosno na mestu priključenja elektronskog brojila. Važno je napomenuti da su ovi standardi kompatibilni, tako da ispunjenje standarda IEC61000-3-2 garantuje i ispunjenje uslova propisanih standardom IEEE 519-1995.

U sledećem poglavlju biće prikazani rezultati merenja koji su obavljeni uz pomoć standardnog elektronskog brojila koje je proizvela firma EWG iz Niša [14], gde je kao potrošač korišćena oprema za rudarenje kriptovaluta.

III. REZULTATI MERENJA

Glavna prednost predloženog metoda je njegova jednostavna implementacija. Uglavnom sva savremena elektronska brojila mere aktivnu, reaktivnu i prividnu snagu, tako da se mogu veoma lako nadograditi da mere i snagu izobličenja. Na Sl. 1 je prikazano realizovano testno okruženje.



Sl. 1. Blok shema testnog okruženja

Kao merni instrument korišćena je komercijalna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62053-22 [15]. Brojilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa njihovim definicijama koje su date jednačinama (3), (4) i (5). U trenutno raspoloživoj varijanti merna grupa nema mogućnost računanja snage izobličenja, ali registruje S , P i Q . Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računar preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (8) u računaru se izračunava vrednost snage izobličenja.

Glavne komponente opreme za rudarenje su izvor napajanja i grafičke kartice. Na tržištu postoji veliki broj proizvođača grafičkih procesora (GPU), ali najpoznatiji su AMD i NVIDIA, pa se ovi procesori i najviše koriste kod grafičkih kartica. Iako različiti proizvođači grafičkih kartica koriste iste GPU, grafičke kartice se ne ponašaju isto sa stanovišta potrošnje električne energije i brzine rudarenja (hash rate). Najkorišćenije grafičke kartice u 2019. godini su AMD RX580 i NVIDIA GTX1070 [16]. Druga najvažnija komponenta opreme za rudarenje je izvor napajanja (power supply unit – PSU). Ove jedinice moraju da imaju visok stepen efikasnosti (u ovom kontekstu, odnos korisne i ukupne snage/energije) kako bi nivo potrošnje električne energije bio minimalan. Zbog toga se kod opreme za rudarenje uglavnom koriste PSU čiji je stepen efikasnosti veći od 80%. PSU su svrstani u kategorije nazvane bronzani, srebrni, zlatni, platinasti i titanijumski. Kao što se vidi iz Tabele I, PSU iste kategorije ima drugačiju efikasnost pri različitim uslovima opterećenja. Naime, za 80 PLUS Gold PSU kategoriju, pri napajanju od 230V i opterećenju od 20%, efikasnost je 80%, dok pri opterećenju od 50% dostiže efikasnost 92% [17].

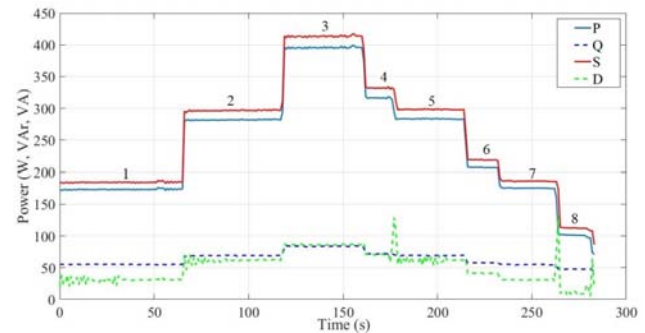
TABELA I. ZAHTEVANA EFIKASNOST U ZAVISNOSTI OD OPTEREĆENJA

	115V Internal Non-Redundant			230V Internal Redundant			
	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%
80 PLUS	80%	80%	80%	N/A			
80 PLUS Bronze	82%	85%	82%	-	81%	85%	81%
80 PLUS Silver	58%	88%	85%	-	85%	89%	85%
80 PLUS Gold	57%	90%	87%	-	88%	92%	88%
80 PLUS Platinum	90%	92%	89%	-	90%	94%	91%
80 PLUS Titanium	92%	94%	91%	90%	94%	96%	91%

U ovom radu predstavljeni su rezultati merenja snaga (aktivne, reaktivne, prividne snage i snage izobličenja) za dve vrste izvora napajanja i njihov uticaj na nivo gubitaka u samom elektroenergetskom sistemu. Kao uređaj za testiranje korišćena je oprema za rudarenje (*minig rig*) koja se sastoji od PSU Cooler Master 750W bronzne design, Sesonnic Focus PSU 850W gold design, 6 Gigabyte GTX1070 grafičkih kartica (3 kartice su sa jednim ventilatorom, 3 kartice su sa 3 ventilatora). Sesonnic Focus PSU se koristi za napajanje grafičkih kartica sa 3 ventilatora, dok se pomoću Cooler Master PSU napajaju preostale 3 kartice, matična ploča i SSD hard disk.

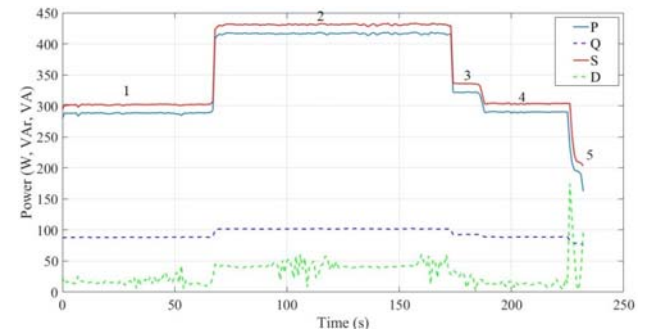
Na Sl. 2 prikazana je potrošnja Cooler Master PSU pri različitim opterećenju. Naime, merenje počinje u trenutku kada je samo jedna grafička kartica uključena (faza 1), a zatim se uključuje druga, pa treća kartica (faza 2 i 3). Kao što se može videti sa Sl. 2., kada su sve tri kartice uključene vrednost

aktivne snage je 400W, dok je vrednost reaktivne snage i snage izobličenja 75VAR. Zaključujemo da distributer električne energije beleži nivo gubitaka od 18% usled neuzimanja u obzir snage izobličenja prilikom konačnog obračuna utrošene električne energije. Odnosno, gubitak bi bio oko 45% ukoliko se u obračun uzme u razmatranje i utrošena reaktivna snaga/energija. Tokom narednih nekoliko faza isključujemo karticu po karticu tako da su u trenutku 8 aktivni samo PSU, matična ploča, procesor i SSD hard disk. U ovom trenutku aktivna snaga dostiže vrednost od 100W, dok je reaktivna snaga 50VAR. Vrednost snage izobličenja u ovom trenutku je zanemarljiva.



Sl. 2. Rezultati merenja potrošnje za Cooler Master PSU

Na Sl. 3 prikazana je potrošnja za Sesonnic Focus PSU i sledeće tri grafičke kartice. Dobijeni rezultati pokazuju da je korišćeni izvor napajanja efikasniji u pogledu snage izobličenja i da će distributeru električne energije prouzrokovati niži nivo gubitaka. Naime, u sve tri faze vrednost snage izobličenja je veoma niska i dostiže 50 VAR samo u slučaju kada su sve 3 kartice uključene.

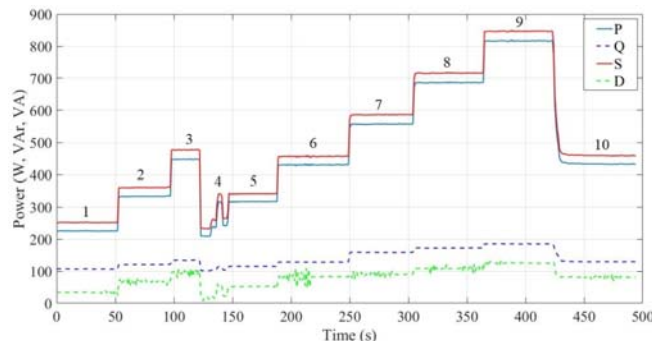


Sl. 3. Rezultati merenja potrošnje za Sesonnic Focus PSU

Potrošnja celokupnog *minig rig*-a prikazana je na Sl. 4. Na samom početku uključuju se 3 grafičke kartice jedna po jedna. Nakon toga isključimo dve grafičke kartice (trenutak 4), i ponovo startujemo karticu po karticu. U trenutku 9 kada je aktivno svih 6 grafičkih kartica, vrednost aktivne snage je 820W, reaktivne snage 180VAR, dok je vrednost snage izobličenja 150VAR što predstavlja 18% aktivne snage koja nije registrovana, a samim tim ni naplaćena.

Dobijeni rezultati merenja pokazuju da su korišćeni PSU veoma efikasni, kao što je i prikazano u Tabeli I. Poredeći ove rezultate sa rezultatima objavljenim u [5], možemo zaključiti da PSU generišu značajno manje harmonika, ali njihova vrednost nije zanemarljiva. Naime, vrednost harmonika se

direktno odražava na povećanje snage izobličenja. Ova snaga se isporučuje potrošaču, ali usled neadekvatne politike naplate distributeri električne energije je registruju kao gubitak. Na osnovu prikazanih rezultata vidimo da distributeri u konkretnom slučaju beleže gubitke od 10-18% isporučene aktivne snage u zavisnosti od opterećenja i korišćene opreme.



Sl. 4. Rezultati merenja potrošnje za celi mining rig

IV. ZAKLJUČAK

Dobijeni mereni rezultati pokazuju da su korišćeni PSU veoma efikasni u pogledu snage izobličenja i da generišu mali broj harmonika. Međutim, distributeri električne energije beleže značajan nivo gubitaka usled neadekvatne politike naplate. Na osnovu rezultata dobijenih u ovom radu, gubici se kreću do 18% aktivne snage. Ukoliko se uzme u obzir i reaktivna snaga koja se takođe ne obračunava korisniku, nivo gubitaka dostiže neverovatnih 45%. Treba napomenuti da su prilikom merenja korišćeni brendirani (kvalitetni) PSU, pa se pretpostavlja da je kod ostalih PSU nivo gubitaka znatno veći. Autori će se u daljem radu fokusirati na identifikaciju dominantnih harmonika generisanih od strane PSU. Na osnovu ovih podataka, distributeri električne energije bi mogli da planiraju neki od načina smanjenja prostiranja harmonika kroz mrežu primenom metoda za kompenzaciju harmonika.

ZAHVALNICA

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekta TR32004 čiju realizaciju finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] G. K. Singh, "Power system harmonics research: a survey," *European Tran. on Electrical Power*, 19, 151–172, (2007).
- [2] Y. Alhazmi, "Allocating power quality monitors in electrical distribution systems to measure and detect harmonics pollution," PhD dissertations, University of Waterloo, Ontario, Canada, (2010).

- [3] J. G. Wakileh, "Power Systems Harmonics", Springer (2001).
- [4] D. Stevanović, P. Petković, "The Losses at Power Grid Caused by Small Nonlinear Loads," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol 10, No. 1, 209-217, (2013)
- [5] D. Stevanović, P. Petković, "Utility needs smarter power meters in order to reduce economic losses," *Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics* Vol. 28, No 3, pp. 407-421, doi:10.2298/FUEE1503407S, (2015).
- [6] D. Stevanović, P. Petković, "A Single-Point Method for Identification Sources of Harmonic Pollution Applicable to Standard Power Meters," *Electrical Engineering*, Volume 97, Issue 2, June 2015, 2015, pp 165-174, ISSN 0948-7921(prn), doi:10.1007/s00202-014-0324-z.
- [7] <https://qz.com/1204842/bitcoin-mining-should-use-renewable-energy-if-we-want-cryptocurrencies-to-be-ethical/>
- [8] <http://fortune.com/2018/01/11/bitcoin-mining-tesla-electricity/>
- [9] A. E. Emanuel, "Summary of IEEE standard 1459: definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions," *IEEE Tran. on Industrial Applications*, Vol. 40, No. 3, May 2004 pp. 869–876.
- [10] J. G. Webster, "The measurement, instrumentation, and sensors handbook," *IEEE Press*, 1999
- [11] A. E. Emanuel, "Power Definitions and the physical mechanism of power," *Wiley and IEEE Press*, 2010.
- [12] IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions.
- [13] D. Stevanović, "Metod za efikasnu identifikaciju harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži primenom modifikovanih elektronskih brojlara," Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Srbija, (2015).
- [14] EWG - multi metering solutions, www.ewg.rs.
- [15] IEC 62053-22 Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S).
- [16] <https://www.techradar.com/news/best-mining-gpu>
- [17] <https://alldaymining.com/best-psu-mining>.

ABSTRACT

In this paper we will try to present one aspect of energy consumption caused by equipment for cryptocurrency mining. We will first address problems concerning increscent number of nonlinear loads leading to the fact that the active power no longer represents the main part of total power delivered to customer. Since the distributors do not measure the other components of power, they tend to have high level of losses. We will stress in this paper losses produced by power supply unit in the mining rig, since nowadays one of the greatest nonlinear consumers is equipment for cryptocurrency mining. Special attention will be paid to quantities of active, reactive and distortion power.

UTILITY LOSSES DUE TO CRYPTOCURRENCY MINING

Dejan Stevanović, Miona Andrejević Stošović, Marko Dimitrijević, Predrag Petković

Ocjena energetske efikasnosti termoelektrane

Primjer RiTE Ugljevik nominalne snage 300 MW

Zdravko Milovanović¹, Valentina Jančić Milovanović², Snježana Milovanović³, Momir Samardžić⁴

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Rouuting d.o.o., Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

⁴ZP RiTE Ugljevik, Ugljevik, Republika Srpska

zdravko.milovanovic@mf.unibl.org, valentina.mil@live.com, snjezana.milovanovic@aggf.unibl.org, samarmo@gmail.com

Sažetak—Koristeći standard ISO 50001 i Zakon o efikasnom korišćenju energije ostvaruje se uvid u energetska stanja objekta ili postrojenja sa ciljem utvrđivanja potencijala za povećanje energetske efikasnosti. Uvidom u prethodna mjerenja, na osnovu izvršene statističke obrade podataka o rezultatima dosadašnje eksploatacije na RiTE Ugljevik nominalne snage 300 MW i obavljenim rekonstrukcijama i unapređenjima, definisan je preliminarni način upravljanja energijom. U okviru preduzeća on se treba integrisati sa poslovnim i strateškim planiranjem. Uspješnost projekata u oblasti energetske efikasnosti može da se ocjenjuje kroz više kriterijuma, od kojih su kao najvažniji izdvojeni ekonomski efekti projekta.

Ključne riječi—termoelektrana; energetska efikasnost; parametri za ocjenu; energetski menadžment;

I. UVOD

Usvajanjem Akcionog plana energetske efikasnosti Republike Srpske do 2018. godine, pripremljenog u skladu sa Zakonom o energetske efikasnosti (Službeni glasnik Republike Srpske, broj 59/13), kao i obavezama iz Ugovora o osnivanju Energetske zajednice i na bazi zahtjeva Direktive 2006/32/EC Evropskog parlamenta o energetske efikasnosti kod finalne potrošnje energije i energetskim uslugama, a prema preporučenom modelu od strane Sekretarijata Energetske zajednice, stvorene su polazne osnove i za uvođenje sistema energetskog menadžmenta (skraćeno EnMS) u kompanijama koje su kao značajni potrošači energije postali obveznici ovog Zakona. Rezultat uvođenja EnMS na nivou preduzeća svakako neće predstavljati samo ispunjavanje zakonskih obaveza i direktiva, već treba i da omogući da preduzeće racionalno koristi energetske resurse, stalno sprovodi i prati mjere unapređenja energetske efikasnosti i na kraju time ostvaruje značajne finansijske uštede odnosno dobiti. Procjena na nivou EU je da se uvođenjem sistema energetskog menadžmenta mogu ostvariti uštede na nivou od 15 do 20%. Uvođenje EnMS u preduzeće koje se bavi proizvodnjom uglja i proizvodnjom električne i (manjim dijelom) toplotne energije poput ZP RiTE Ugljevik, kao sastavnog dijela MH EPRS Trebinje, predstavlja jedan složeni i zahtjevan proces sa implementacijom u više faza. Realizacija ove prve od nekoliko faza treba da omogući ZP RiTE Ugljevik da dobije osnovni model pomoću kojeg će jednostavnije i pravovremeno izvršiti pripreme za uvođenje sistema energetskog menadžmenta na nivou kompanije, a u skladu sa

važećim zakonom i akcionim planom o energetske efikasnosti Republike Srpske. Time bi se otvorile mogućnosti za: smanjenje specifične potrošnje energenata i energije, smanjenje gubitka u procesu distribucije električne energije, smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu pri ostvarenju proizvodnji, unapređenje sigurnosti vezanoj za snabdijevanje energijom i energijom, povećanje konkurentnosti ovog ZP u okviru MH EPRS na otvorenom tržištu energije i energenata (uključujući i emisiju CO₂) i samim tim pozitivne ekonomske efekte nakon povećanja nivoa sopstvene energetske efikasnosti.

II. DEFINICIJE I OBUHVAT RADA

A. Pojmovi i definicije

Mjere energetske efikasnosti se najčešće odnose na: programe upravljanja štednjom energije (što uključuje poboljšanje efikasnosti postojeće opreme i sistema, bez izmjena u bilo kom proizvodnom procesu datog postrojenja ili u sistemu snabdijevanja energijom), poboljšanje efikasnosti sistema za snabdijevanje toplotnom i električnom energijom uvođenjem nove opreme ili demontažom stare i zamjenom novom, energetski efikasnijom opremom, pri čemu su 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, [1].

B. Programi i mjere upravljanja štednjom energije i energetskom efikasnošću

U programe upravljanja štednjom energije spadaju: inicijative i mjere u pogledu upravljanja i smanjenje potrošnje i gubitaka energije bez promjene procesa, korišćenje otpadne energije, sistematsko i plansko održavanje opreme, eliminacija curenja pare, vode, sabijenog vazduha i vakuuma, bolja izolacija toplih cijevi, uvođenje centralizovanog upravljanja sistemima klimatizacije i grejanja, instalacija visoko efikasne rasvjetle (zamjena standardnih sijalica "štedljivim"), frekventno "vođenje" velikih elektro-motornih potrošača radi poboljšanja faktora snage elektromotora, kompenzacija reaktivne električne energije, predgrijevanje otpadnim fluidima, instalacija rekuperativnih razmjenjivača toplote, kao i povraćaj kondenzata, [2].

U grupu mjera za poboljšanje efikasnosti sistema za snabdijevanje toplotnom i električnom energijom uvođenjem nove opreme ili demontažom stare i zamjenom novom, energetski efikasnijom opremom spadaju: promjene u proizvodnom procesu uvođenjem tehnoloških i tehničkih inovacija zamjenom dijelova ili cijelog proizvodnog postrojenja savremenijim, rekonstrukcija toplovodnih i parnih instalacija, instalacija savremenih visoko efikasnih kotlovskih postrojenja, rekuperacije energije iz organskog otpada industrije, ugostiteljstva i komunalnog otpada (proizvodnja i upotreba biogasa i biomase), zamjena indirektnog sušenja grijanim vazduhom direktnim sušenjem toplim gasovima iz procesa sagorijevanja prirodnog gasa, biogasa ili biomase, primjena visokoefikasne kogeneracije - spregnute proizvodnje toplotne i električne energije iz jednog izvora, čime se postiže faktor iskorišćenja primarnog goriva preko 85%, primjena toplotnih pumpi u industriji ili za sisteme grijanja stambenih ili poslovnih zgrada i naselja.

III. ENERGETSKA EFIKASNOST I ENERGETSKI MENADŽMENT

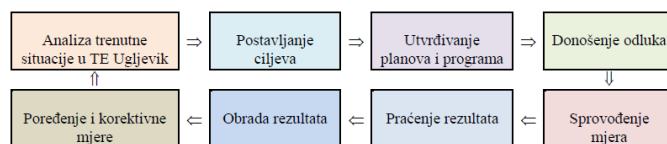
A. Sistem energetskog menadžmenta

Sistem energetskog menadžmenta predstavlja skup mjera koje: garantuju efikasno korišćenje raspoloživih energetskih resursa u kompaniji, tretiraju uštedu i racionalno korišćenje energije, tretiraju zamjenu pojedinih vrsta energenata čistijim, odnosno onim koji se efikasnije mogu koristiti. Uveden sistem energetskog menadžmenta u suštini predstavlja razvoj strateških i ciljanih aktivnosti za poboljšanje energetske efikasnosti, a koje su najčešće integrisani u poslovnu filozofiju i planiranje.

Sistem menadžmenta zaštitom životne sredine usmjerava organizacione aktivnosti na način koji smanjuje njihove štetne efekte na životnu sredinu, uz stalno poboljšavanje poslovnih performansi u odnosu sa okruženjem. Sistem menadžmenta energije omogućava organizacijama da prošire svoju odgovornost u odnosu na životnu sredinu, smanje troškove energije i emisiju CO₂. Kako se sistem menadžmenta energije uvodi najčešće kao poslednji, odnosno nakon uvedenih standarda ISO 9001 i ISO 14001, nije potrebno uvoditi procedure koje su zajedničke za sve standarde, [3].

Sa druge strane, sistem dokumentovanja i izvještavanja koji se oslanja na važeći međunarodni standard ISO 50001:2011 treba prilagoditi postojećim sistemima menadžmenta, što zajedno vodi do uvođenja i sprovođenja Integrisanog Sistema Menadžmenta (IMS) u okviru proizvodne RiTE, kao sastavne cjeline EES. Pri tome, veoma jednostavne mjere u obliku malih promjena vezanih za procedure rada mogu imati značajan uticaj na smanjenje potrošnje energije.

Ostali važni integralni dijelovi sistema energetskog menadžmenta su: energetski pregledi, odnosno energetski bilansi (eng. *energy audits*), kao i praćenje realizacije i postavljanje ciljeva. Jednostavna struktura pristupa sistema energetskog menadžmenta je data na slici 1.



Sl. 1. Proces upravljanja energijom u kompaniji primjenom EnMS, [3]

B. Zahtjevi i struktura standarda ISO 50001

Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) je energetski menadžment identifikovala kao jednu od najznačajnijih oblasti za razvoj i promociju međunarodnih standarda. Obezbeđenjem tehničke i upravljačke strategije za povećanje energetske efikasnosti u organizacijama i kompanijama, stvaraju se uslovi za smanjenje troškova i poboljšanje uticaja na okolinu. Zasnovan na široj primjeni kroz nacionalne ekonomske sektore, budući standard može da utiče na do 60% svjetskih potreba za energijom. Iako je prvenstveno namijenjen industriji, standard je primjenljiv na bilo koji tip organizacije koja želi da uspješno upravlja korišćenjem energije i energetsom efikasnošću. Standard ISO 50001 je objavljen 2011. godine od strane ISO organizacije, a 2012. godine je usvojen u Republici Srbiji kao SRPS ISO 50001:2012 (Sl. glasnik Republike Srbije, 80/12 od 25.07.2012.).

Standard specificira zahtjeve za sistem menadžmenta energije, koji omogućava organizaciji da primjeni sistemski pristup u cilju stalnih poboljšanja energetske efikasnosti. Globalni ciljevi standarda ISO 50001 odnose se na povećanje energetske performansi (na primjer: energetske efikasnosti, intenziteta energije, potrošnje energije, emisije CO₂) i njihovo precizno definisanje i praćenje. Prema ovom standardu, energijom se smatra: električna energija, gorivo, para, toplota, komprimovani vazduh, kao i obnovljivi izvori energije, dok su energetske performanse mjerljivi rezultati u vezi sa energijom. U BiH je ovaj međunarodni standard objavljen 2012. godine i zamijenjen novim BAS ISO 50001:2015. Standard specificira zahtjeve za uspostavljanje, primjenu, održavanje i poboljšavanje sistema upravljanja energijom, sa svrhom da omogući organizaciji da slijedi sistemski pristup u postizanju stalnog poboljšavanja energetske performanse, obuhvatajući energetska efikasnost, korišćenje i potrošnju energije.

Ovaj međunarodni standard, [3]:

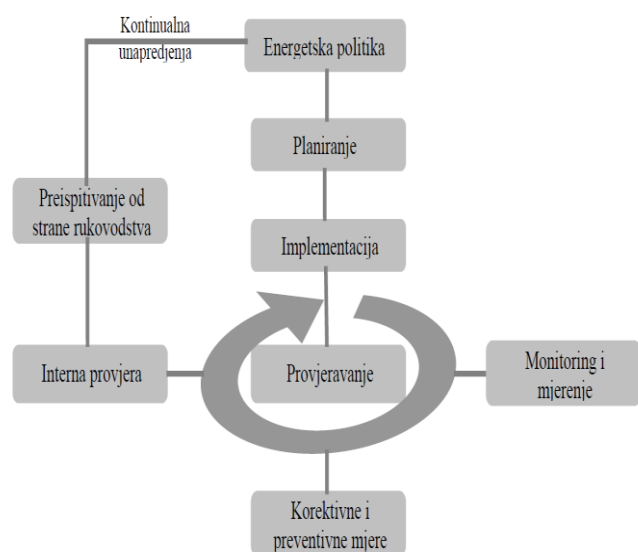
- specificira zahtjeve primjenljive na korišćenje i potrošnju energije, obuhvatajući mjerenje, dokumentaciju i izvještavanje, projektovanje i postupke za nabavku opreme, sisteme, procese i osoblje koji doprinose energetske performansi;
- primjenjuje se na sve promjenljive činioce koji utiču na energetske performanse, a koje organizacija može da prati i na koje može da utiče;
- ne propisuje specifične kriterijume performanse u vezi sa energijom;
- projektovan je tako da se koristi nezavisno, ali može da se koristi i uporedo ili integrisano s drugim sistemima upravljanja;

- može da primjenjuje svaka organizacija koja želi da osigura da je usaglašena sa svojom iskazanom energetsom politikom i koja želi to da prikaže drugima, tako što tu usaglašenost potvrđuje bilo putem samovrednovanja i samodeklarisanja usaglašenosti ili sertifikacijom sistema upravljanja energijom koju daje eksterna organizacija.

U Prilogu A su date informativne smjernice za primjenu ovoga međunarodnog standarda. Opšti zahtjevi standarda su da organizacija mora sistem EnMS da:

- Uspostavi (znači da je sistem uveden po svim zahtjevima standarda na svim nivoima u organizaciji);
- Dokumentuje (znači da je uspostavljena potrebna dokumentacija koja opisuje sistem i koju zahtjeva standard);
- Primijeni (znači da je sistem primijenjen po svim zahtjevima, na svim nivoima u organizaciji);
- Održava (znači da se sistem kontinualno održava);
- Stalno poboljšava (znači da postoje dokazi o poboljšavanju sistema upravljanja energijom u skladu sa zahtevima standarda ISO 50001).

Specifični zahtjevi standarda ISO 50001 su: energetska planiranje i preispitivanje, izrada energetske referentne (poredbene) vrijednosti, odnosno energetskog bilansa, definisanje indikatora energetskih performansi, definisanje opštih i posebnih ciljeva upravljanja energijom, izrada i realizacija akcionih planova, vrednovanje značajnog korišćenja energije, kao i operativno upravljanje značajnim korišćenjem energije. Na slici 2 je predstavljena osnova pristupa standarda ISO 50001.



Sl. 2. Model sistema energetskog menadžmenta prema standardu ISO – DIS 50001, [3]

Veoma značajno pitanje energetske efikasnosti odnosi se na procese održavanja energetske efikasnosti, što uz nizak nivo zahtjeva koje u tom smislu postavlja industrija, otežava procjenu potrebnog kvaliteta za održavanje sa aspekta energetske efikasnosti u odnosu na spremnost sistema da radi u funkciji energetske efikasnosti. Proizvođači često, u pokušaju da snize cijene proizvoda, redukuju pa čak i eliminišu nivo izlazne kontrole, tj. superviziju na račun održavanja kojima ostavljaju tu odgovornost. Kako se izgradnja energetskih sistema posmatra često odvojeno od održavanja egzistira direktan uticaj na energetska efikasnost tavih sistema. Iako danas obuka održavalaca u funkciji energetske efikasnosti ide u korak sa razvojem energetskih sistema posebno u građevinarstvu (grijanje i klimatizacija), još uvijek industrija može biti paradigma toga kako se organizuje i izvodi održavanje u funkciji energetske efikasnosti, kako se njime upravlja, kako se finansira i konačno kako se od njega profitira.

C. Utvrđivanje stanja mjerenja potrošnje energije

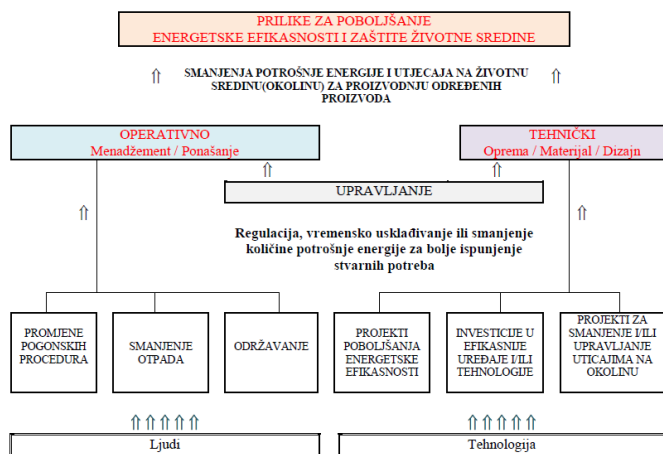
Da bi se sproveo program upravljanja energijom potrebno je imati tačne i ažurne podatke o potrošnji energije, dobijene mjerenjem, pri čemu je poznata činjenica vezana za mjesto i način mjerenja potrošnje energije. Kako u fabrikama najčešće postoje mjerenja potrošnje energije za svaki oblik energije sa samo jednim mjernim uređajem (mjerenja sprovedena radi praćenja ukupnih troškova za energiju), ona nisu dovoljna za provođenje dobrog programa upravljanja energijom i energetskom efikasnošću. Racionalizacija potrošnje energije moguća je u svim fazama, od proizvođača do krajnjeg potrošača, pa shodno tome i sistem internog mjerenja potrošnje energije treba ići tim redoslijedom. Način formiranja internog sistema mjerenja potrošnje energije zavisi od tehnološkog procesa proizvodnje (potrebno poznavati potrošnju dijela procesa proizvodnje, jedne tehnološke faze ili samo jednog uređaja) i od organizacije kompanije (praćenje troškova za energiju i po organizacionim jedinicama unutar kompanije, što bliže mjestu nastanka). Ugradnja mjernih uređaja po tehnološkom principu stvara potrebnu osnovu za provođenje mjera, jer daje polazne podatke za stručnu obradu potrošnje provođenja mjera upravljanja energijom i energetskom efikasnošću i njihovo kvantifikovanje. Aspekt zavisnosti formiranja internog sistema praćenja potrošnje energije od organizacije cijele kompanije važan je kod izrade plana poslovanja koji uključuje troškove za energiju i praćenje stvarnog utroška energije prema planskom, pri čemu treba da prevlada onaj princip koji prema stručnoj ocjeni daje važnije podatke za procjenu mogućih mjesta racionalizacije potrošnje energije. Pri tom treba paziti da troškovi mjerenja (nabave opreme i praćenja) ne budu veliki tj. sistem internog praćenja potrošnje energije mora se formirati i na osnovu ekonomičnosti. Osim samog mjerenja sistem internog mjerenja potrošnje energije čini i organizovanje očitavanja i prikupljanja podataka po unaprijed zadatom planu, posvećujući posebnu pažnju zaprimanju goriva, praćenju zaliha goriva i njegovoj potrošnji.

D. Obrada podataka o potrošnji energije

Nakon odrađenog mjerenja neophodna je analiza i obrada dobijenih mjernih podataka, radi sačinjavanja izvještaja, koji bi trebao sadržavati:

- Podatke o potrošnji svakog od korištenih oblika energije, izražene u energetske jedinice za posmatrani period (sedmično, mjesečno, kvartalno, polugodišnje, godišnje ili kumulativno) po mjestu troška, za radnu jedinicu ili ukupno za kompaniju;
- Podatke o troškovima za svaki od korištenih oblika energije izražene u novčanom iznosu, po mjestu troška, radnoj jedinici ili za cijelu kompaniju;
- Podatke o kretanju troškova za svaki korišćeni oblik energije u odnosu na plan, s iskazanim odstupanjima od plana, po mjestu troška, radnoj jedinici ili kompaniji u cjelini;
- Podatke o gubicima energije u distribuciji i transformaciji s izračunatim odstupanjima od uobičajene ili očekivane vrijednosti.

Poboljšanja efikasnosti upravljanja energijom mogu doći od efikasnijeg korišćenja energije u proizvodnji, veće efikasnosti snabdijevanja energijom, uticaja na okolinu, posebno smanjenja otpada. Poboljšanja se mogu naći i u načinu na koji ljudi upravljaju postrojenjima, uređajima i pratećom opremom, kao i u efikasnosti postrojenja i tehnologija u proizvodnom procesu, slika 3.



Sl. 3. Načini poboljšanja energetske efikasnosti i zaštite životne sredine, [4]

Postizanje dugoročnih smanjenja uticaja na životnu sredinu i energetske zahtjevi za proizvodnjom određenog proizvoda zahtjeva realizaciju nekoliko faktora: bolje pogonske procedure i procedure održavanja, bolje upravljanje (ljudima i tehnologijom), izbjegavanje i smanjenje otpada, efikasniju opremu i iznad svega vješte i odane ljude.

Treba naglasiti da upravljanje energijom i upravljanje zagađenjem počinje poboljšanjem efikasnosti postojećeg pogona i smanjenjem otpada. Kada god se obrađuju sirovine, potrebna je energija. Suvišan otpad u obradi materijala će takođe uzrokovati suvišnu potrošnju energije. Promjene u efikasnosti obrade materijala odraziće se u varijacijama

potrošnje energije. Uticaji na životnu sredinu su posljedica obrade sirovina, transformacije primarne energije u finalnu korisnu energiju, kao i same potrošnje energije u procesu proizvodnje, pa je proces upravljanja energijom pokreta; upravljanja održivom proizvodnjom, upravljanja okolinom i ukupnom efikasnošću pogona u cjelini.

E. Izbor parametara za ocjenu efikasnosti termoelektrane u cjelini

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 tehnokoekonomske karakteristike ostvarene u eksploataciji. Vremenske karakteristike ostvarene u eksploataciji bloka za posmatrani vremenski period (na nivou godine, polugodišta, mjeseca ili nekog drugog perioda koji se analizira) definisane su sa koeficijentom eksploatacije bloka K_e i koeficijentom zastoja (otkaza) bloka (K_e'). Energetske karakteristike bloka daju ocjenu proizvodne sposobnosti bloka i utrošenoj energiji za vlastite potrebe. Energetske karakteristike bloka se daju u vidu određenih parametara: koeficijent iskorišćenja snage bloka, koeficijent iskorišćenja kapaciteta bloka, koeficijent vlastite potrošnje bloka termoelektrane i koeficijent korisnog dejstva termoelektrane. Tehničko ekonomski pokazatelji obuhvataju: količine proizvedene električne energije na generatoru i predate na mrežu elektroenergetskog sistema (generator - prag termoelektrane), količine uložene toplotne energije iz energenata za proizvedenu električnu energiju, eksploatacioni period aktivnog rada bloka uzimajući u obzir i toplu rezervu ukoliko je potisnut sa mreže. Definiše ih specifična potrošnja osnovnog i potpalnog goriva bruto i neto, specifična potrošnja toplotne energije iz osnovnog goriva, specifična potrošnja dekarbonizovane i demineralizovane vode, kao i brojno učešće radne snage po proizvedenom kWh-u električne energije (ovo obuhvata eksploatacioni personal i personal održavanja).

IV. ANALIZA DOSADAŠNJEG RADA ZP RiTE UGLJEVIK

A. Probnii pogon ZP RiTE Ugljevik

Probnii pogon je pokazao da parni kotao bloka nije mogao obezbijediti u kontinuitetu nominalnu snagu bloka od 300 MW, sagorijevanjem uglja koji se nalazi u ležištu "Bogutovo selo". Rad bloka u eksploataciji se odlikovao čestim zastojima, sniženim opterećenjem, aktivnim zašljakivanjem i zaprljanjem ogrijevnih površina parnog kotla. Eksploatacije parnog kotla, kao i cijelog bloka, nije bila bezbjedna. Izabrana i ugrađena oprema namijenjena za održavanje čistih ogrijevnih površina nije mogla da posluži namjeni. Tako, primjera radi, u tom periodu je bilo ukupno 54 zastoja. Suočeni sa ovim problemom, predstavnici termoelektrane, projektanta i isporučioaca opreme kotlovskog postrojenja ("Podoljski Zavod", Moskva), uz angažovanje tada renomiranih stručnih instituta ("Institut Vinča", Beograd, "Sibenergo", Novosibirsk i drugi instituti tadašnjeg Sovjetskog Saveza), preko stručnih timova, poslije probnog pogona pristupili su dokazivanju kapaciteta i utvrđivanju stvarnog stanja. Dokazano je da parni kotao sa

ugrađenom opremom ne može ostvariti garancijske vrijednosti opterećenja. Zato je odlučeno da se uradi rekonstrukcija kotla u cilju podizanja njegovog opterećenja. Izvršena je I faza rekonstrukcije na kotlu (1987. god.) i podignuta raspoloživa snaga za 15 MW, ali nije postignut projektovani nivo od 279 MW. Tako, primjera radi, do rekonstrukcije ostvarena je srednja prosječna snaga na pragu termoelektrane od 223,6 MW, a u periodu nakon rekonstrukcije do 23.04.1992. godine 237,5 MW. Rekonstrukcija se zasnivala na povećanju razmjene toplote u dijelovima kotla i obezbjeđenju boljeg prolaza dimnih gasova sa letećim pepelom kroz ogrijevne površine, u ložištu sa izborom novih sistema čišćenja ogrijevnih površina - vodenih duvača, sa povećanjem ogrijevnih površina pregradnog zavjesastog pregrijača pare - širmova za jednu trećinu, proširenjem svijetlih otvora na konvektivnom međupregrijaču pare izbacivanjem reda cijevnih zmija i ugradnjom novih sistema za čišćenje konvektivnih ogrijevnih površina (dugohodih duvača).

B. Period nakon prve rekonstrukcije u ZP RiTE Ugljeverik

Nakon rekonstrukcije i dalje je ostao osnovni problem u eksploataciji parnog kotla - slaba efikasnost ložišta, što se posebno reflektuje na povećan nivo temperatura dimnih gasova u okretnoj komori ($> 900^{\circ}\text{C}$), koje zbog karakteristika letećeg pepela ubrzavaju zaprljanje i začepljenje konvektivnih ogrijevnih površina kotla. Za to su temperature u okretnoj komori dimnih gasova postale limitirajući faktor na nivo opterećenja parnog kotla i bloka i ograničene do 820°C . Nivo ograničenih temperatura odgovara opterećenju bloka u sadašnjem stanju od 250 do 260 MW. U periodu ispitivanja 1987. godine taj nivo temperatura je odgovarao opterećenju 270 do 285 MW. Drugi problem je visoka temperatura u zoni graničnog sloja cijevi ekrana ložišta generatora pare ($> 900^{\circ}\text{C}$) i zašljakivanje ekrana, a naročito je izražajna pojava u periodu zastoja srednjih mlinova generatora pare. Ova pojava je prouzrokovana samom konstrukcijom ložišta kotla i njegovom konfiguracijom i dimenzijama. Treći problem je i snižena temperatura sekundarne pare na izlazu iz međupregrijača pare II na 510 do 535°C u odnosu na projektovanu 545°C . Veliki uticaj ima zaprljanost ogrijevnih površina međupregrijača kao i pojedini pogonski uslovi (stanje armature na obilaznim parovodima PPTI) a djelimično i smanjenje ogrijevnih površina pri razređivanju MPP-e u I fazi rekonstrukcije (1987. god.). Predlagač rekonstrukcije je smatrao da će ovaj problem razriješiti prepajanjem mjesta dovoda primarne pare iz kotla u PPTI (posle plafonskih ekrana generatora pare), što u potpunosti nije nadoknađeno. Ostvarena je prosječna snaga na generatoru od 265 MW, što je 88 % nominalne snage. Povećano zaprljanje ložišnih ekranskih površina primarnim naslagama sa strane dimnih gasova i zadržana problematika generatora pare samim izborom se, uz pogoršan kvalitet uglja u posleratnom periodu, odrazila na nivo opterećenja kotla i bloka, [3].

C. Period stajanja bloka u ZP RiTE Ugljeverik zbog ratnih dejstava

U okviru perioda stajanja termoelektrane od 23.04.1992. do 24.11.1995. godine, zbog trajanja ratnih dejstava, termoelektrana Ugljeverik 1 nije radila.

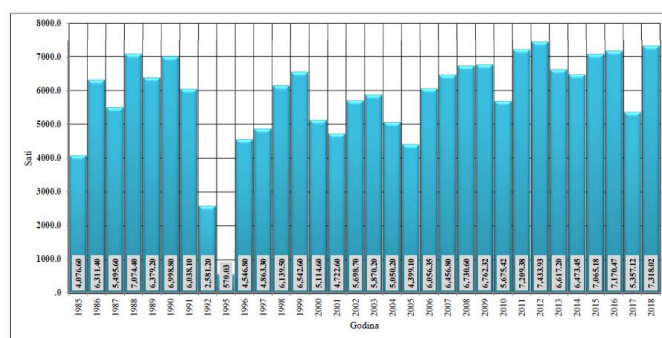
D. Pogon nakon zastoja do kraja 2004. godine u ZP RiTE Ugljeverik

U toku eksploatacije u okviru drugog perioda (zaključno sa 2004. godinom), blok TE Ugljeverik je ostvario srednju snagu od 235 MW na generatoru, što daje faktor iskorištenja snage od 0,783. Akcenat analize problematike rada u ovom periodu je posvećen radu kotlovskog postrojenja termobloka, jer je kotao limitirajući element nepostizanja nominalne snage termobloka od 300 MW. Analizom su kvantifikovani određeni problemi koji se javljaju u radu kotlovskog postrojenja. Izvršena su mjerenja određenih veličina u ložištu kotla: temperature plamena i gasa, padajućih toplotnih flukseva, primarnih toplotnih flukseva i izračunatog koeficijenta toplotne efikasnosti ekranskih grejnih površina.

E. Pogon nakon rekonstrukcije dijela postrojenja i opreme u ZP RiTE Ugljeverik

U remontima 2007. i 2008. godine su detaljno očišćeni zidovi cijevi ekrana ložišta kotla sa strane dimnih gasova (primarne i sekundarne naslage pepela i šljake). Skidanje naslaga sa zidova cijevi je omogućilo bolju razmjenu toplote u ložištu i veću efikasnost ložišta, što je uslovalo povećanje opterećenja kotla za oko 10,5 %. Ostvarena je srednja snaga na generatoru bloka od 245,1 MW i pragu od 223,3 MW. Problematika nepostizanja nominalnog opterećenja bloka je ostala i dalje prisutna, [3].

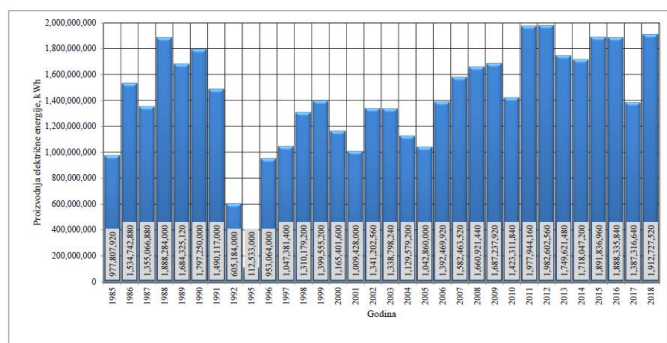
Sadašnji nivo snage bloka je na nivou 85-90 % nominalne vrijednosti (300 MW), a karakteristike vremena rada i ostvarene proizvodnje električne energije zaključno sa 2018. godinom prikazane su na slikama 4 i 5.



Sl. 4. Ostvareno vrijeme rada u ZP RiTE Ugljeverik, [6]

Dodatne negativne efekte stvara i zastarjelost opreme i odrađeni vijek bloka preko 65 % planiranog pri izgradnji i puštanju u pogon sa korišćenjem jako zašljakujućeg i jako zaprljavajućeg uglja u eksploataciji. Ugalj je velikog sadržaja sumpora ($> 4,5\%$) što stvara i dodatne probleme u eksploataciji, [5].

Snaga bloka je limitirana kotlom na vrijednost do 260 MW na generatoru i u direktnoj je funkciji kvaliteta i karakteristika uglja kao i stanja čistoće ogrijevnih površina kotla.



Sl. 5. Ostvarena proizvodnja električne energije u ZP RiTE Ugljevik, [6]

Prikaz ostvarenih rezultata rada bloka RiTE Ugljevik nominalne snage 300 MW za mjesec decembar 2018. godine dat je u okviru tabele 1 i tabele 2.

TABELA I. PROIZVODNJA I POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE BLOKA RiTE UGLJEVIK SNAGE 300 MW ZA MJESEC XII 2018. GODINE, [6]

Veličine		AKTIVNA (kWh)				REAKTIVNA (kVarh)	
PROIZVODNJA	GENERATOR	Planirano (P)	U mjesecu XII 2018. god.	%	U godini	%	U mjesecu
		Ostvareno (O)					U godini
	PRAG - (davanje)	P					
		O					
	generator	P					
		O					
	prag	P					
		O					
	Proizvedena snaga (kW)						
	P						
POTROŠNJA	O						
	P						
	O						
	P						
	O						
	P						
	O						
	P						
	O						
	P						
PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	O						
	P						
	O						
	P						
	O						
	P						
	O						
	P						
	O						
	P						

TABELA II. VRIJEME RADA BLOKA RiTE UGLJEVIK SNAGE 300 MW ZA MJESEC XII 2018. GODINE, [6]

Veličine		U mjesecu	U godini	Od 1985. god.
2. Vrijeme rada bloka	RAD na mreži	h:m	7318:01:00	184 799:19
	Kvar i nedostatak	h:m	81:22:00	525:28:00
	a) TE	h:m	0:00:00	0:00:00
	b) Radnik	h:m	0:00:00	11:01:00
	c) Međa	h:m	0:00:00	159:23:00
	Planirani zastoj	h:m	0:00:00	746:07:00
	Planirani REMONT	h:m	0:00:00	0:00:00
	Potrošnja na mreži	h:m	0:00:00	607
	Broj kretanja	tr.	1	16

V. ZAKLJUČAK

Nastavak projekta za ostvarivanje energetske uštede veoma je značajan za RiTE Ugljevik nominalne snage 300 MW. Pored smanjenja troškova i čistije proizvodnje električne energije, kao i poboljšanja konkurentnosti preduzeća (i pored havarije generatorskog postrojenja) ostvareni su značajni rezultati u radu kompanije, uz integraciju svih razvojnih projekata i projekata energetske efikasnosti sa postojećim

poslovnim planovima, što predstavlja na neki način dalji razvoj ove kompanije. Ulaganja u projekte energetske efikasnosti brže se realizuju i otplate, u odnosu na izgradnju novih energetske kapaciteta, pri čemu su, kao ključni faktori za uspješno upravljanje tim projektima, determinisani: tražnja na tržištu, kompetentnost ugovarača za pružanje energetske usluge i posjedovanje znanja i vještina iz oblasti upravljanja projektima.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju službi za optimizaciju tehnološkog pogona termoelektrane na pripremi i dostavi podataka potrebnih za realizaciju ovog rada.

LITERATURA

- [1] Z. Milovanovic, M. Samardžić, Analiza energetske efikasnosti rada TE Ugljevik za period 2004-2014. godina, ENEF 2015, Banja Luka, 2015.
- [2] Z. Milovanovic, M. Samardžić i dr., Studija o energetske efikasnosti TE Ugljevik I, Institut za građevinarstvo IG, PC Trebinje, Trebinje, 2014.
- [3] Z. Milovanović, Lj. Papić, S. Dumonjić-Milovanović, A. Milašinović, D. Knežević, Sustainable Energy Planning: Technologies and Energy Efficiency, DQM monograph library Quality and reliability in practice, Book 9, Prijedor, 779 p, 2017.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Tehnički podaci o realizaciji proizvodnje ya RiTE Ugljevik za 2018. Godinu, RiTE Ugljevik, Ugljevik, 2019.

ABSTRACT

Using the ISO 50001 standard and the Law on Energy Efficiency, an insight into the energy state of a facility or plant is obtained in order to determine the potential for increasing energy efficiency. Inspection of the previous measurements, based on the performed statistical processing of the data about the results of previous exploitation at TPP Ugljevik with a nominal power of 300 MW and the reconstructions and improvements carried out, defined a preliminary method of energy management. Within the company, it integrates with business and strategic planning. The success of projects in the field of energy efficiency can be judged by several criteria, the most important of which are the economic effects of the project.

ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF A THERMAL POWER PLANT

EXAMPLE OF THE TPP UGLJEVIK OF 300 MW NOMINAL CAPACITY

Zdravko Milovanović, Valentina Jančić Milovanović, Snježana Milovanović, Momir Samardžić

Upravljanje projektom energetske efikasnosti na termoenergetskim postrojenjima

Zdravko Milovanović¹, Valentina Jančić Milovanović², Snježana Milovanović³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Routing d.o.o., Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
zdravko.milovanovic@mf.unibl.org, valentina.mil@live.com, snjezana.milovanovic@aggf.unibl.org

Sažetak— Obim i različitost projekata iz energetske efikasnosti, daju samo načelne osnove kod dalje razrade projekata energetske efikasnosti na energetskom ili procesnom postrojenju. Pokazatelji za ocjenu uspješnosti projekata energetske efikasnosti, razvrstani su u tri grupe: statičke, dinamičke i neekonomske. U okviru rada dat je primjer koncepcije grupisanja projekata energetske efikasnosti po sektorima unutar termoenergetskog preduzeća, kao i pregled rezultata konkretne analize na TE Ugljevik u okviru EES Republike Srpske.

Ključne riječi—energetska efikasnost; upravljanje projektima energetske efikasnosti; principi energetske efikasnosti; vlastita potrošnja;

I. UVOD

U težnji za nižim troškovima poslovanja i većom konkurentnošću, potrebno je pripremiti projekte na polju ušteda energije, kojima bi se ostvarilo smanjene troškova za energiju, poboljšanje konkurentnosti, smanjenje emisije gasova staklene bašte, kao i povećanje sigurnosti snabdijevanja energijom. Da bi ostvarile veće uštede energije, neophodno je uspostaviti energetski menadžment u privrednim organizacijama i pripreme akcione planove za energetsku efikasnost. Investiranje u projekat energetske efikasnosti prvenstveno ima zahtjev za realizaciju brzog povrata investicije, zatim za sigurnost ulaganja, kao i ostvarenje očekivanih rezultata od projekta (ušteda energije, smanjenje operativnih troškova za energiju, veća pouzdanost u radu, veći stepen korisnog dejstva i manji gubici u procesu transformacije primarne u korisne oblike energije – električnu i toplotnu energiju). Osim ovih očekivanja, neophodno je eliminisati eventualne rizike u realizaciji projekta (skriveni troškove eksploatacije i održavanja sistema, uticaj tehničkih nedostataka tokom eksploatacije na obim proizvodnje, racionalizacija vlastite potrošnje i sl.). Radi ostvarenja ciljeva smanjenja operativnih troškova kroz uštedu energije, neophodna je često i isporuka i postavljanje energetski efikasnije opreme (često u kombinaciji sa njenim upravljanjem i održavanjem), monitoring potrošnje energije, kao i uvođenje povećanja konkurentnosti kompanije (Asset management) i ESCO principa (ugovaranje performansi energetskih ušteda). Polazeći od tendencije o racionalnoj potrošnji energije neophodno je da se za određeni proces proizvodnje pored potrošača energije, posmatra cijeli proizvodni sistem kao

cjelina, pri čemu se koriste ranije definisani kriterijumi, kao što su: procjena korišćenja energije i sirovina, smanjenje zagađenja okoline, poboljšanje radnih uslova, kvalitete proizvoda i poboljšanje procesa proizvodnje.

II. ENERGETSKI MENADŽMENT U PREDUZEĆIMA U ENERGETICI I PROCESNOJ INDUSTRIJI

A. Pokazatelji za ocjenu uspješnosti projekata energetske efikasnosti (statički, dinamički i neekonomski)

Poređenje sa najboljom praksom u radu termoenergetskih postrojenja se vrši na osnovu prethodno pripremljenih podataka specijalno za tu aktivnost. Rezultati određuju ciljne parametre, čijom korekcijom se optimizira konkurentnost postrojenja i podiže nivo energetske efikasnosti. Upoređuju se optimalan nivo pouzdanosti i raspoloživosti postrojenja, zahtijevani ekološki i drugi prostorno-lokacijski parametri, zatim optimalni ekonomski parametri, optimalni poslovni parametri, kao i termotehničke karakteristike termoelektrane, energetsko-proizvodne karakteristične veličine za ocjenu energetske i ekonomske efikasnosti termoelektrane, uz analize ostvarene energetske efikasnosti u radu termoelektrane. Na osnovu rezultata poređenja određuju se ciljevi, granice i tempo povećanja konkurentnosti i energetske efikasnosti postrojenja. Na osnovu sprovođenja politike efikasnog korišćenja električne energije i mjera energetske efikasnosti u sektoru proizvodnje električne energije definišu se mjere za: efikasnije korišćenje proizvodnih kapaciteta termoelektrane, povećanu konkurentnost na tržištu električne energije, smanjene negativne uticaje energetskog sektora na životnu sredinu, kao i mjere, prijedlozi i sugestije za podsticanje odgovornog ponašanja prema proizvodnji električne energije.

Pokazatelji za ocjenu uspješnosti projekata energetske efikasnosti, razvrstani su u tri grupe: statičke, dinamičke i neekonomske. Prva statička grupa obuhvata: prosječne godišnje uštede, period povrata, stopu prinosa i period pripreme. Druga dinamička grupa obuhvata: neto sadašnju vrijednost, internu stopu profitabilnosti i indeks profitabilnosti. Treća neekonomska grupa obuhvata: uštede energije u kWh, uštede emisije CO₂, uštede potrošnje energenata, uštede potrošnje demineralizovane i dekarbonizovane vode, uštede potrošnje sirove vode i sl.

Integracijom energetske efikasnosti sa strateškim i poslovnim planiranjem, poboljšanja energetske efikasnosti, zajedno sa drugim projektima se postavljaju u fokus poslovne strategije. Ovaj pristup se koristi da se razmotre inicijative sa kojima mogu da se ostvare ciljevi, kao i da se postigne realnost planova.

B. Karakteristike projekata energetske efikasnosti

Karakteristika mjera energetske efikasnosti treba da obezbijedi realizaciju sljedećih principa:

- davanje prednosti onim mjerama sa većim potencijalom povećanja energetske efikasnosti;
- jednostavnost predloženih mjera za primjenu i potreba za obezbjeđenjem značajnijih energetskih ušteda;
- davanje prioriteta projektima sa nižim investicijama i kraćim periodom otplate;
- realizacija projekata na tehnički korektan način i logičan redoslijed, uz ostvarenje preduslova međusobnog neremećenja.

Pri realizaciji gore datih principa neophodno je obezbijediti i sljedeće:

- atraktivnost ulaganja (ogleda se u najvećoj mjeri u ostvarenim godišnjim uštedama i periodu otplate investicije);
- relativno kratak period za pripremu investicije (od nekoliko mjeseci do nekoliko godina);
- relativno kratak period realizacije (od nekoliko mjeseci do jedne godine);
- veći udio ulaganja u materijalima i opremi, a manji dio u radovima;
- jednostavnost administrativnih procedura oko dobijanja dozvola za početak radova;
- period otplate investicije od nekoliko godina pa do max. 10 godina;
- evaluacija projekta nakon određenog vremena od primjene.

Ovo često (posebno projekti revitalizacije, rekonstrukcije i modernizacije opreme i postrojenja na TE Ugljevik) zahtijeva i sprovođenje poređenja sa projektima izgradnje novih energetskih kapaciteta. Iako su ulaganja u nove projekte često opravdani, jer se radi o projektima sa poboljšanim tehnologijama i dobijanju čistije energije, ulaganja u projekte energetske efikasnosti imaju bržu realizaciju i kraći period otplate.

Racionalizacija potrošnje energije neće imati samo mikroekonomski efekt za termoelektrsko postrojenje, koji je sprovodi, već će imati i makroekonomski efekt za cijelu državu, kao i veliki uticaj na cjelokupnu energetsku politiku. Termoelektrana će smanjiti svoje troškove za energiju. Veličina potencijalnih ušteda obično se povećava sa starošću postrojenja, ali jako zavisi i od načina održavanja. Poboljšanja vezana za sistem upravljanja, održavanja i koje nisu investirale

u preventivno održavanje, uvijek imaju velike mogućnosti smanjenja troškova za energiju. Republika Srpska na ovaj način će imati korist, jer potrošnja energije zadržava se na istom stalnom nivou ili se smanjuje u slučaju povećanja obima industrijske proizvodnje i izgradnje novih fabrika. Paralelno, smanjuju se i potrebe za investicijama u nove izvore energije. Zbog toga država treba svojom porezom i kreditnom politikom stimulisati ulaganja u projekte energetske efikasnosti. Racionalnija potrošnja energije značajna je i sa aspekta zaštite prirode. Kako povećana potrošnja energije uzrokuje velike probleme u održavanju ekološke ravnoteže, bilo kakvo njeno smanjenje ima uticaja i na mikro klimu (od poboljšanja radnih uslova do smanjenja zagađenja bliže okoline). Racionalizaciju potrošnje energije čini skup mjera kojima se uz promjene organizacije rada, načina korištenja postrojenja i uređaja, uređenja i materijala, a uzimajući u obzir i sigurnost rada, zaštitu zdravlja i okoline, ostvaruje optimalna proizvodnost, uz zadržavanje potrebnog kvaliteta proizvoda, rentabilnosti i ekonomičnosti poslovanja, uz istovremeno smanjenje utroška energije po jedinici proizvoda.

III. PODPROJEKTI ENERGETSKE EFIKASNOSTI U TERMOENERGETSKIM PREDUZEĆIMA

A. Konceptije grupisanje projekata energetske efikasnosti po sektorima unutar termoelektrskog preduzeća

S obzirom na kompleksnost složenih termoelektrskih postrojenja dalja realizacija pod projekata u oblast energetske efikasnosti zahtijeva grupisanje po dijelovima odnosno sektorima unutar termoelektrane, kao što su zgradarstvo, proizvodnja električne i toplotne energije i transport.

U dijelu zgradarstva pod projekti energetske efikasnosti se mogu vezati za problematiku:

- termoizolacija spoljnih zidova, zgrada i objekata termoelektrane ;
- toplotna izolacija prozora i krovova;
- energetsko saniranje ranije izgrađenih objekata;
- toplotne pumpe za grijanje i klimatizaciju;
- rekuperatori otpadne toplote ;
- mjerenje potrošnje utrošene energije za grijanje;
- veći nivo korišćenja prirodnog osvjetljenja;
- korišćenje solarnih sistema za dobijanje potrošne tople vode;
- primjena toplotne pumpe za dobijanje potrošne toplotne vode (vazduh – voda);
- termostatski ventili za grijanje;
- energetski efikasne pumpe za cirkulaciju vode za grijanje, kao i
- aktiviranje sistema hlađenja vazduha iznad temperature 24°C).

U proizvodnji električne i toplotne energije podprojekte energetske efikasnosti treba vezati sa problematikom koja se odnosi na:

- energetske efikasnije pumpe i kompresore;
- uvođenje frekventnih regulatora na elektromotorima pumpi;
- iskorišćenje otpadne toplote kroz povrat kondezata iz sistema snabdijevanja parom;
- smanjenje gubitaka u sistemu za sabijeni vazduh;
- rekuperacija otpadne toplote iz dimnih gasova;
- rekuperacija otpadne toplote iz kompresora;
- rekuperacija otpadne toplote iz otpadne vode;
- rekonstrukcija sistema za razvod pare;
- uvođenje automatske regulacije sadržaja kiseonika u sagorevanju kod kotlova;
- sistem za povrat kondenzata kod kotlova;
- predgrijevanje dodatne vode do stanja napojne vode za kotlove;
- izolaciju parovoda, toplovoda i drugih cjevovoda;
- višestepene kompresore za hlađenje kod industrijskih rashladnih sistema;
- višestepeno prigušivanje, podhlađivanje kondenzata u rashladnim sistemima;
- energetske efikasne i automatizovane rasvjete;
- planiranje i uvođenje energetske efikasnije opreme kroz planiranje tekućih i investicionih remonata;
- softver za energetske menadžment;
- smanjenje reaktivne energije i povećanje faktora snage;
- smanjenje gubitaka u procesima transformacije primarne u električnu i toplotnu energiju;
- on-line monitoring, mjerenje potrošnje električne i toplotne energije kod krajnjih potrošača u sistemu vlastite potrošnje termoelektrane;
- energetske efikasne računarske opreme;
- energetske efikasne potrošačke elektronike;
- primjenu obnovljivih izvora energije za proizvodnju struje;
- primjena obnovljivih izvora energije za podršku grijanju ili kogeneracija i trigeneracija;
- modernizacija postrojenja u sistemu daljinskog grijanja Ugljevika;
- softver za automatizaciju kontrole kvaliteta uglja sa rudnika i formiranja kontrolisanih deponija uglja po kvalitetu;

- kontrolu kvaliteta uglja pri punjenju kotlovskih bunkera.

Kod transporta podprojekte vezati za problematiku:

- razvoja sistema transporta, uvođenjem novih tehnologija;
- upotreba vozila na električni pogon) i sl.

B. Principi za ovladavanje tehnologijama energetske efikasnosti

Proces ovladavanja novom tehnologijom ili razvoj i primjena određenog inovativnog rješenja mora biti bazirana na: nadogradnji postojećih znanja i iskustava u određenoj oblasti, raspoloživim radnim personalom i njihovim nivoom obučenosti i etičkoj svijesti za primjenu principa energetske efikasnosti na TE Ugljevik 1. To podrazumijeva da se tehnologija uvođenja principa mora prethodno usvojiti, s ciljem integracije pojedinih segmenata energetske efikasnosti u strukturirana rješenja. Zahtjeva i određen nivo tehničke opremljenosti za realizaciju, kao i servisnu sposobnost..

Zainteresovanost za ostvarenje zarade na projektu, kako bi osim angažovanosti resursa mogao da održi svoje poslovanje i njegovo dalje usavršavanje, zahtjeva poznavanje ključnih faktora za uspješno upravljanje projektima energetske efikasnosti. Ti projekti obuhvataju posjedovanje određenih kompetencija u oblasti tehnologije energetske efikasnosti, kao i postojanje domaće potražnje za određenom tehnologijom energetske efikasnosti, kako bi se postigla ekonomija obima i nastavio dalji razvoj rješenja i unapređenja usluga. Potražnja za energetske efikasne tehnologijama se nalazi pod značajnim uticajem mjera domaćih regulatornih tijela, koje uključuju mjere da se podignu standardi i daju finansijski podsticaji za primjenu.

Za realizaciju projekta potrebno je i posjedovanje znanja i vještina projektnog menadžmenta, koja obuhvataju metode upravljanja projektima, od planiranja projekta, preko upravljanja rizicima i upravljanja izmjenama, do upravljanja troškovima i vremenom. Osim ovih faktora treba istaći i sljedeće:

- Pažljivo planiranje projekta i detaljno definisanje ponuđenog rješenja;
- Tačnost evaluacije efekata investicije, proračunata, uzimajući u obzir ne samo tehničke brošure proizvođača, već i vršenim poređenjima sa sličnim realizovanim sistemima, treba da pruži objektivnu i pouzdanu sliku investitoru o očekivanim efektima projekta;
- Prije donošenja odluke o investiranju objektivni način je da se do ovih pokazatelja dođe kroz izradu studije opravdanosti, koja će prikazati predmjer i predračun opreme i radova, troškove održavanja i korišćenja sistema, uz primjenu metode analize osjetljivosti za određivanje pokazatelja povrata investicije u slučajevima pojave odstupanja u odnosu na planirano, pristupačnost uslova finansiranja i pristup finansijskim

institucijama, kao preduslova za uspješno realizovanje projekata energetske efikasnosti.

C. Vlastita potrošnja u termoelektrskom preduzeću

Skup 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, transporter, 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 / generatora pare (elektrofilteri, 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 rina, 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.), kao i 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 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

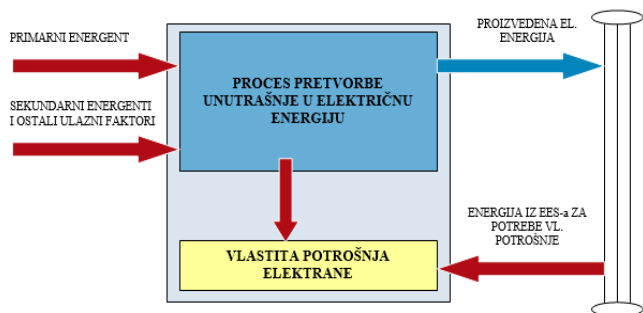
sniženje proizvodnje električne energije ili dovodi do zaustavljanja osnovnih agregata termoelektrane, a u posebnim slučajevima može izazvati i oštećenje osnovne i pomoćne opreme. Ovu grupu čine elektronapojne, kondenz pumpe I i II stepena, cirkulacione (rashladne) pumpe, ventilatori svježeg vazduha, 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.

D. Načelni dijagram energetskog bilansa termoelektrane

Trajni zadatak energetike je racionalizacija procesa transformacije različitih oblika primarne (prirodne) energije u korisne oblike energije. Termoelektrane na fosilna goriva (ugalj, gas, lož ulje i sl.) su postrojenja za transformaciju primarne unutrašnje (hemijske) energije u električnu energiju, najekonomičniju za transport do korisnika i naknadnu transformaciju u kasniji koristan rad. Bruto proizvedena električna energija slijedi iz ukupne ulazne primarne energije namijenjene procesu transformacije u električnu, uz oduzimanje gubitaka u procesu transformacije. Kod toga moramo znati da je stepen korisnosti termodinamičkog procesa u termoelektranama na fosilna goriva relativno nizak i da se kreće od 30 do 40%, što podrazumijeva da se već u procesu transformacije primarne u korisne oblike energije dešava i najveći dio gubitaka (60 do 70% od ulazne primarne energije). Kada se od bruto proizvedene električne energije odbije vlastita potrošnja termoelektrane, dobija se neto proizvedena električna energija, koja se nakon procesa prenosa distribuira krajnjem korisniku (gubici u prenosu su 2 do 3%, a u distribuciji u zavisnosti od stanja distributivne mreže 7 do 14%). Ako se razmatranje svede samo na jedno postrojenje,

npr. na predmetnu termoelektiranu TE Ugljevik 1 na fosilno gorivo – mrki ugljevički ugalj, energetski bilans se može prikazati kao na slici 1.



Sl. 1. Načelni dijagram energetskog bilansa termoelektirane, [1 - 3].

Kako je termoelektirana samo jedan element elektroenergetskog sistema (EES), treba uzeti u obzir i njenu dvosmjernu energetsku komunikaciju sa EES. Prag termoelektirane je linija razdvajanja ova dva sistema: sve što se zbiva iza praga termoelektirane pripada EES, a sve ispred praga termoelektirane. Termoelektirana je, dakle, složena funkcionalna cjelina čiji su ulazni faktori primarni i sekundarni energenti i sirovine (ali i električna energija), a izlazni proizvedena vrela voda i ogrijevna toplota, te električna energija kao nusproizvod. S ekonomske strane, cilj je termoelektirane proizvodnja toplotne i električne energije uz što manje troškove proizvodnje, tj. uz maksimalno redukovane gubitke transformacije, prenosa i distribucije i uz što je moguće više optimiziran sistem vlastite potrošnje.

Gubici u termodinamičkom procesu transformacije primarne u korisnu energiju, kao i gubici prenosa i distribucije, direktno su vezani uz specifične tehnologije. S današnje tačke gledišta oni su svedeni na svoj minimum. Međutim, gubici u sistemu vlastite potrošnje nisu nužno vezani samo uz tehnologiju proizvodnje, već često i uz specifične prostorno-vremenske uslove u kojima je građena termoelektirana i u kojima se odvija proizvodnja. Optimiziranjem u ovom segmentu može se postići značajan pomak prema jeftinijoj energiji na pragu termoelektirane.

Vlastitom potrošnjom termoelektirane naziva se ona potrošnja koja je specifična samo za tu proizvodnu jedinicu. Vlastita potrošnja termoelektirane je cijena poslovanja i predstavlja trošak koji se po vrsti može označiti kao stalni ili promjenjivi. Kao i kod ranijih razmatranja, vlastita se potrošnja može proširiti na sve energente, ali u realizovanom projektu fokus je bio isključivo vlastiti potrošak električne energije. Iz komercijalnih razloga, a ponajprije zato što je vlastita potrošnja znatan trošak poslovanja, valja ju funkcionalno podijeliti na više segmenata potrošnje različitog karaktera. U okviru elektroprivrednih preduzeća ustaljena je sljedeća podjela vlastite potrošnje: primarna vlastita potrošnja (vezana uz svaki proizvodni blok i čini je skup potrošača koji u svim uslovima moraju raditi da bi blok/termoelektirana uopšte mogla proizvoditi električnu energiju), sekundarna vlastita potrošnja (obuhvata dio vlastite potrošnje koju treba osigurati sigurnosnim i pomoćnim sistemima, odnosno uređajima i postrojenjima nezavisno od statusa termoelektirane - bloka) i tercijalna vlastita potrošnja (osigurava da bi ostali dijelovi termoelektirane koji nisu vezani uz direktnu

proizvodnju mogli funkcionisati, a ujedno omogućava da i osoblje u termoelektirani i u njenom sklopu mogu pod prihvatljivim i povoljnim uslovima obavljati potrebne aktivnosti). Vlastita potrošnja iz usluge koje se mogu zasebno evidentirati te eventualno i naplatiti - riječ je npr. o potrošnji energije za izgradnju novog dijela postrojenja termoelektirane, potrošnji za potrebe drugih dijelova konzorcija EES ili o potrošnji energije spoljašnjih izvođača tokom zahvata u termoelektirani. Smisao ugradnje sistema za optimiziranje vlastite potrošnje električne energije je sistemsko nadgledanje svih vrsta vlastite potrošnje da bi se izradila metodologija izvještavanja o utrošenoj električnoj energiji i, u kasnijoj fazi, algoritam za smanjenje ili potpuno uklanjanje nepotrebnih troškova proizvodnje. Konačni cilj izvedenog projekta je sistem upravljanja ili gospodarenja vlastitom potrošnjom električne energije, počev od njegove implementacije samo za tercijarnu vlastitu potrošnju, da bi se u kasnijim fazama stečena iskustva proširila i na ostale segmente vlastite potrošnje, pa i na ostale energente, [3, 4].

E. Povećanje pouzdanosti napajanja

Pouzdanost postrojenja povećava se na sljedeće moguće načine:

- napajanje vlastite potrošnje najmanje iz dva izvora;
- sabirnice vlastite potrošnje dijele se na nekoliko dijelova-sekcija i na srednjem i na niskom naponu, a svaka sekcija se napaja preko posebnog izvora napajanja;
- primjenjuje se brza relejna zaštita za zaštitu od djelovanja struje kratkog spoja, čime se osigurava smanjenje trajanja snižavanja napona na sabirnicama vlastite potrošnje prilikom kratkog spoja;
- uzbuda generatora je takve izvedbe da osigurava visok nivo napona prilikom kratkog spoja i brzo uspostavljanje napona nakon isključenja kratkog spoja;
- obavezno se koristi automatika brzog prekopčavanja rezervnog napajanja za bitne potrošače;
- za posebno značajne potrošače primjenjuje se rezervno napajanje pomoću istosmjernog napona;
- broj sekcija vlastite potrošnje jednak je broju blokova, a kod većih jedinica, kao što je TE Ugljevik nazivne snage od 300 MW, koriste se dvije sekcije po bloku uz primjenu transformatora vlastite potrošnje sa odvojenim sekundarnim namotajima;
- najčešće se koristi jedan rezervni (mrežni) transformator za dva bloka i na sekcije rezervnog transformatora vlastite potrošnje se priključuju manje važni potrošači - opšta potrošnja elektrane;
- rezervni (mrežni) transformator za napajanje vlastite potrošnje priključuje se na sabirnice na koje nije priključen generator (u postrojenje visokog napona) radi povećanja sigurnosti napajanja.

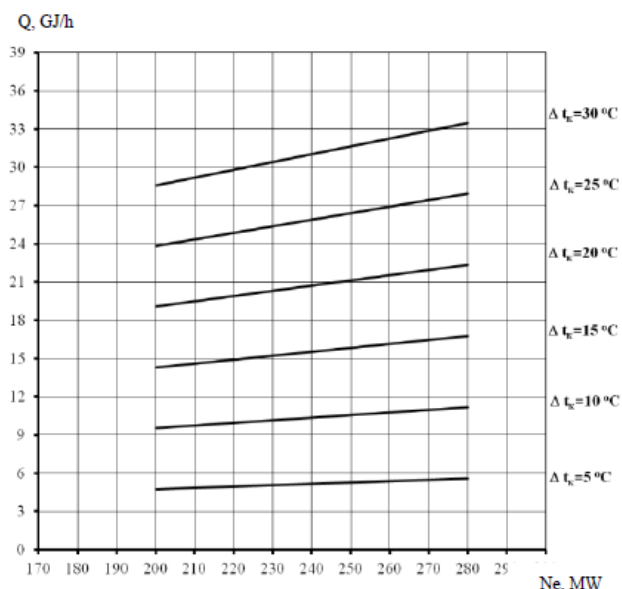
Vlastita potrošnja savremenih termoeenergetskih blokova napaja se u normalnom pogonu redovno s otcjepa veze između generatora i blok transformatora, preko dvonamotajnog ili tronamotajnog transtormatora. U prošlosti se vlastita potrošnja manjih blokova napajala preko prigušnice za smanjenje struje kratkog spoja, ili preko serijskog spoja prigušnice i regulacionog autotransformatora. Na upotrebu regulacione transformatore prešlo se zbog toga što su naponi generatora veći od nazivnih napona vlastite potrošnje, pa postoji potreba za transformacijom.

IV. SPECIFIČNOSTI RADA TERMOENERGETSKIH PREDUZEĆA

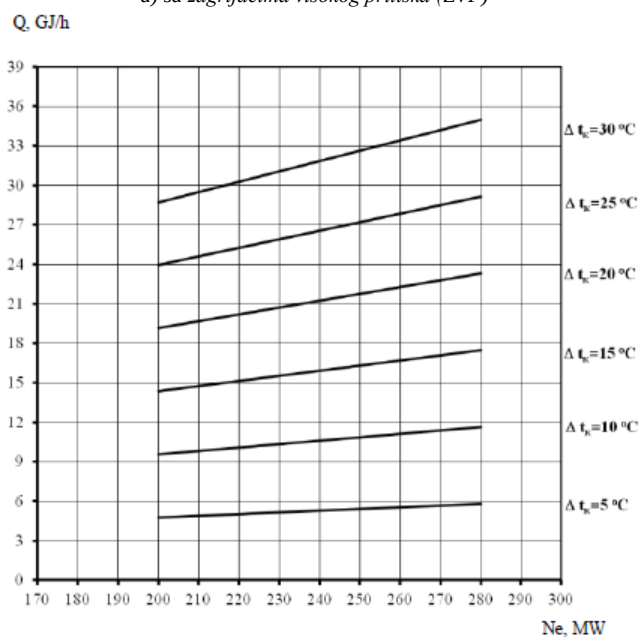
A. Specifičnosti konstrukcije i uslova eksploatacije opreme na termoeenergetskim preduzećima na primjeru TE Ugljevik

Polazeći od specifičnosti konstrukcije i uslova eksploatacije opreme, pogodnosti za korišćenje izrađenih energetskih karakteristika u ovoj glavi su date specifične zavisnosti osnovnih i pomoćnih pokazatelja rada energetskog bloka 300 MW TE Ugljevik, što je dopušteno sa Metodičkim napomenama za sastavljanje i za sadržaj energetskih karakteristika opreme termoelektrane RD 34.09.155-93, [1]. U ovom dijelu je bitno poznavanje sljedećih elemenata: proračun raspoložive snage energetskog bloka, zavisnost stepena korisnog dejstva (SKD) energetskog bloka „neto“ od proizvedene snage na generatoru, zavisnost specifične potrošnje goriva za proizvodnju električne energije, koja se šalje na kotao bloka, od kvaliteta dolazećeg uglja, balans potrošnje mazuta na termoelektrani i njegove norme, kao i balans potrošnje vode na termoelektrani i njegove norme. Radi planiranja ukupne proizvodnje električne energije pomoću energetskog bloka koji se nalazi u radnoj organizaciji, dopunski je, uz izrađene energetske karakteristike opreme, izvršena analiza i proračun nivoa raspoložive snage termoelektrane. Pri proračunu uzete su u obzir specifične karakteristike konstrukcije opreme, eksploatacije bloka i uslovi njegovog rada.

Dio rezultata je prikazan na slikama 1 do 4, [5]. Na osnovu materijala koji su dobijeni tokom ispitivanja (septembar 2012. god.), na osnovu kojih su sastavljene normativne karakteristike, raspoloživa snaga bloka, posle umanjjenja potrošnje za sopstvene potrebe, iznosila je: pri radu sa zagrijačima visokog pritiska (ZVP) – 270 MW, pri isključenim zagrijačima visokog pritiska (ZVP) – 260 MW.

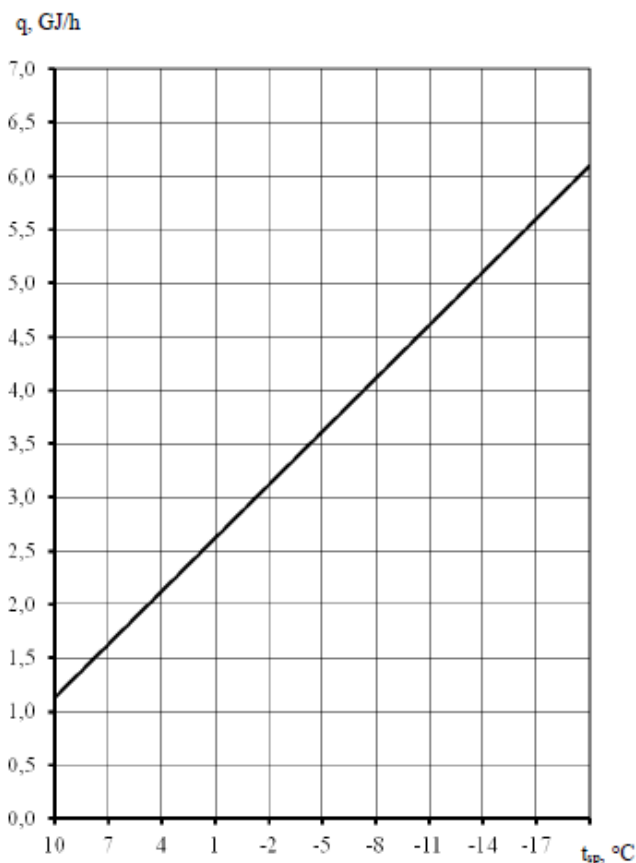


a) sa zagrijačima visokog pritiska (ZVP)

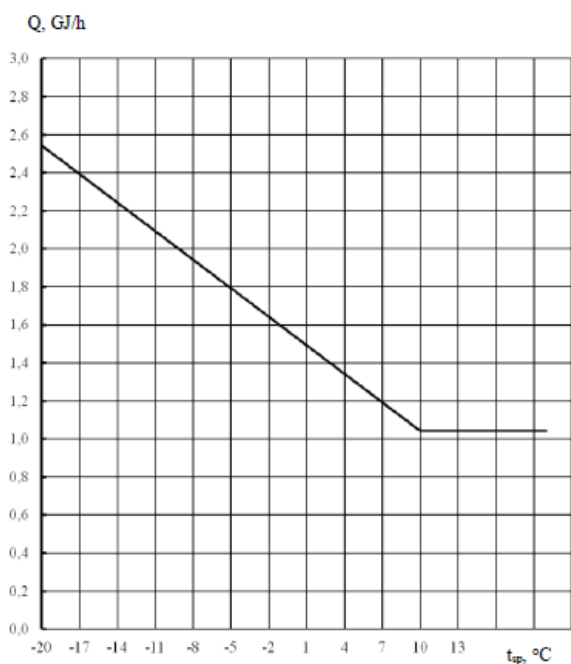


b) bez zagrijača visokog pritiska (ZVP)

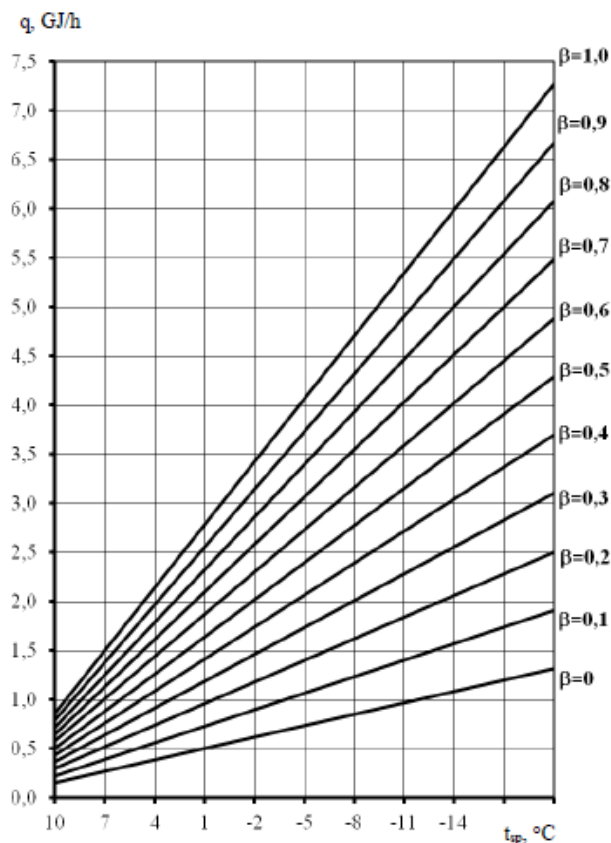
Sl. 2. Potrošnja toplote na zagrijavanje vazduha u kaloliferima kotla pri radu energetskog bloka sa ZVP (a) i bez ZVP (b)



Sl. 3. Potrošnja toplote na grijanje proizvodnih prostorija druge kategorije kotlovskog odjeljenja TE Ugljektivik pri različitim temperaturama spoljašnjeg vazduha t_{sp}



Sl. 4. Časovni tehnološki gubici toplote, koji su povezani sa njegovim isključenjem sa mreže

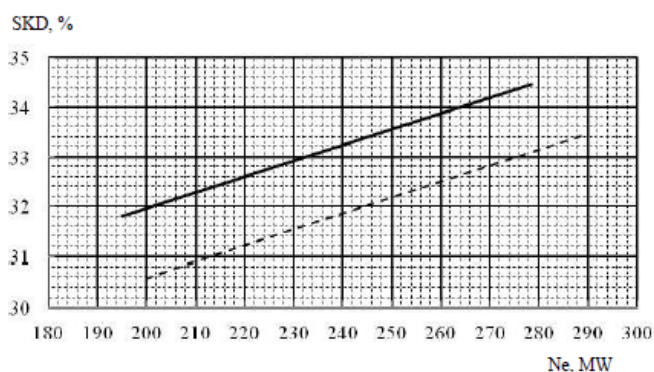


Sl. 5. Zavisnost norme potrošnje toplote na grijanje turbinskog odjeljenja TE Ugljektivik od t_{sp} i koeficijenta viška vazduha β

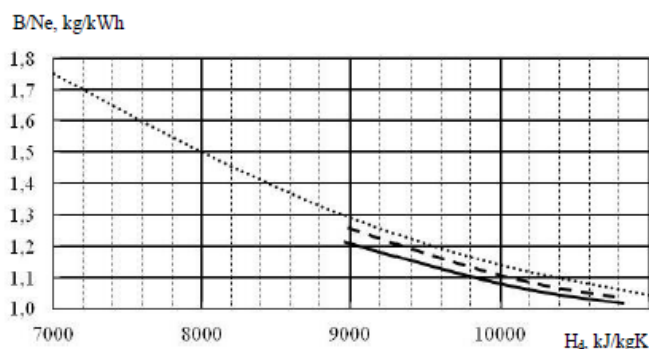
Podaci su dati pod uslovima da je na termoelektranu dopremano gorivo (ugalj) radnog sastava (9810 kJ/kg) sa karakteristikama koje su bliske proračunskim. Osnovni ograničavajući faktori za povećanje nivoa maksimalnog dugotrajnog opterećenja u ovom trenutku su: visoki nivo temperatura gasova po traktu kotla pri uključenju u rad ZVP, rad kotla na gorivu sa visokim svojstvima za zašljakivanje i zaprljanje pepelastih ostataka, odsustvo automatske regulacije parametara rada kotla, kao i zaprljanje grejnih površina u ložištu kotla i konvektivnih grejnih površina. Navedena ograničenja su unapred ograničili nivo maksimalno dostižnog električnog opterećenja bloka na generatoru od 280 do 290 MW. Pri tome srednja vrednost iznosi 285 MW što iznosi 95 do 98% u odnosu na nominalnu količinu proizvedene toplote kotlovskog postrojenja (sa ZVP/bez ZVP). U toku ispitivanja maksimalno opterećenje bloka je bilo 280 MW. Uticaj rada aparata za duvanje kotla uzeto je u obzir u visini 2 MW, što treba da se odnosi na prosječno dnevno opterećenje bloka. Smanjenje proizvodnje nastaje zbog oduzimanja pare iz ciklusa, potrebne za duvanje i njenog neiskorišćenja u turbini pri konstantnoj količini proizvedene toplote od strane kotla. Smanjenje snage bloka zbog nepostojanja opreme za automatsko regulisanje parametara njegovog rada ocijenjeno je na nivou 8 MW. U toku sprovođenja ispitivanja oscilacije opterećenja energetskog bloka su iznosile ± 5 do 8 MW. Za ocjenu raspoložive snage termoelektrane, usvojeno je apsolutno smanjenje srednjeg nivoa opterećenja bloka za 8 MW.

B. Zavisnost tehno-ekonomskih pokazatelja rada energetskog bloka od snage i kvaliteta uglja

Razrada normativnih karakteristika izvršena je na osnovu provedenih ispitivanja i na osnovu početnih podataka koji su usaglašeni sa rukovodstvom termoelektrane. Na slikama 5 i 6 dati su rezultati proračuna popravki na pokazatelje rada bloka na odstupanje početnih-nominalnih vrijednosti osnovnih i prolaznih pokazatelja rada opreme. Radi približenja dobijenih karakteristika realnim uslovima rada opreme energetskog bloka, u ovoj tački su dati rezultati proračuna zavisnosti: SKD energetskog bloka «neto» u odnosu na snagu na generatoru i specifične potrošnje goriva za proizvodnju električne energije, koja se predaje korisniku, od kvaliteta dopremljenog uglja. Zavisnosti su dobijene na osnovu materijala koji su dobijeni kontrolnim mjerenjima. Količina proizvedene električne energije, koja dolazi u energetski sistem, određena je sa uzimanjem u obzir pokazatelja proračunatih i datih na slikama 5 i 6.



Sl. 6. Zavisnost SKD energetskog bloka «neto» od proizvedene snage na generatoru uglja (pri radu ZVP dato punom linijom, isključeni ZVP dato isprekidanom linijom)



Sl. 7. Zavisnost specifične potrošnje goriva za proizvodnju električne energije, koja se šalje korisniku, od kvaliteta dopremljenog uglja H_d (pri radu ZVP dato punom linijom, isključeni ZVP dato isprekidanom linijom, zavisnost za energetski blok TE Gacko data tačkasto)

U količinu potrošnje goriva uzeti su u obzir i gubici toplote za sopstvene potrebe termoelektrane. Uzimajući u obzir da su se, pri sprovođenju toplotnih ispitivanja opreme, mijenjale karakteristike goriva u neznatnom dijapazonu, a radi poredjenja na slici 5 je data zavisnost specifične potrošnje goriva za

energetski blok TE Gacko u širem dijapazonu promene toplotne sposobnosti uglja, [6].

V. ZAKLJUČAK

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. Dobijene energetske karakteristike kotlovskog agregata i turbouređaja, rezultati proračuna potrošnja električne energije i toplote za sopstvene potrebe bloka 300 MW termoelektrane Ugljevik, dozvoljavaju da se ocijeni SKD kotla bruto, unutrašnji relativni SKD cilindra turbine, ostali tehno-ekonomski pokazatelji rada opreme na termoelektrani.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju službi za optimizaciju tehnološkog pogona termoelektrane na pripremi i dostavi podataka potrebnih za realizaciju ovog rada.

LITERATURA

- [1] Metodiske napomene po sastavljanju i sadržaju energetskih karakteristika opreme termoelektrana. RD 34.09.155-93. SPO ORGR3S, M., 1993 g (Vneseno izmenu № 1, utvrđeno Mintopenergo RF ot 21.07.99). Dejstvo RD 34.09.155-93 prodleno bez ograničenja roka
- [2] Z. Milovanovic, M. Samardžić, Analiza energetske efikasnosti rada TE Ugljevik za period 2004-2014. godina, ENEF 2015, Banja Luka, 2015.
- [3] Z. Milovanović, Lj. Papić, S. Dumonjić-Milovanović, A. Milašinović, D. Knežević, Sustainable Energy Planning: Technologies and Energy Efficiency, DQM monograph library Quality and reliability in practice, Book 9, Prijedor, 779 p, 2017.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Z. Milovanovic, M. Samardžić i dr., Studija o energetskej efikasnosti TE Ugljevik I, Institut za građevinarstvo IG, PC Trebinje, Trebinje, 2014.

ABSTRACT

The scope and diversity of energy efficiency projects provide only the basic principles for further development of energy efficiency projects an energy or process plant. Performance indicators for energy efficiency projects are classified into three groups: static, dynamic and non-economic. The paper gives an example of the concept of grouping energy efficiency projects by sectors within a thermal power company, as well as an overview of the results of a specific analysis at TPP Ugljevik within the RS Power System.

MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY PROJECT AT THERMAL POWER PLANTS

Zdravko Milovanović, Valentina Janićić Milovanović,
Snježana Milovanović

ОПТИМИЗАЦИЈА И ВЕРИФИКАЦИЈА СИСТЕМА БЕСПРЕКИДНОГ НАПАЈАЊА У ТС 110/20 kV ЛАКТАШИ 2

Здравко Перић¹, Жељко В. Деспотовић², Бранислав Копрена³

¹Техничка школа, Градишка, Република Српска

²Институт Михајло Пупин, Универзитет у Београду, Београд, Србија

³Електропренос БиХ, Оперативно подручје Бања Лука

servispermic33@gmail.com, zeljko.despotovic@pupin.rs, branislav.koprena@elprenos.ba

Сажетак—У овом раду наведени су основни елементи беспрекидног напајања који се користи за потребе сопствене потрошње у трансформаторској станици 110/20 kV Лакташи 2. Ово напајање садржи основне компоненте, као што су исправљачи, инвертори, батерије, статичка преклопка и пратећу управљачку и сигнализациону опрему. Главни допринос у овом истраживању се односи на оптимизацију рада и побољшање рада како самог напајања, тако и статичке преклопке. У току експлоатационих испитивања и тестирања извршена је верификација квалитета и поузданости пројектованог рјешења. На крају су на основу овога приказани добијени експериментални резултати и изведени су најбитнији закључци.

Кључне ријечи — *беспрекидно напајање; трансформаторска станица; исправљач; инвертор; статичка преклопка*

I. УВОД

Беспрекидни системи напајања данас су неизоставан технички дио трансформаторских станица (ТС) које се користе у системима претварања и преноса електричне енергије. Намјена им је да обезбједе поуздано и стабилно напајање потрошача сопствене потрошње у свим режимима рада, обзиром да непоуздано напајање може довести до прекида у преносу и испоруци електричне енергије, престанка рада SCADA система, рачунарске и ТТ мреже и сл. [1], [2]. Приликом пројектовања и изградње ТС (електронски системи мјерења, заштите и управљања) морају се, уместо линеарних потрошача, узети у обзир претежно нелинеарна оптерећења. Ово је последица чињенице да је у напојној мрежи присутан велики број електронских уређаја који се напајају наизмјеничним напонам [3].

Нелинеарна оптерећења код нас су претежно капацитивног типа, што је нетипично гледајући земље ЕУ код којих преовладавају индуктивни потрошачи, као резултат велике индустријске развијености (60% потрошене електричне енергије отпада на погон мотора). Код нас преовладавају капацитивни потрошачи: клима уређаји, телевизори, рачунари и сл., који у себи садрже енергетске претвараче (углавном исправљаче) и капацитивне акумулационе елементе-кондензаторе у

једносмјерном (DC) међуколу. Све ово је довело до нових захтјева за рад система беспрекидног напајања у погледу рада са струјама оптерећења које одступају од синусног таласног облика и са израженим вршним вриједностима [4]. Нарочито треба поменути напајање најкритичнијих капацитивних потрошача као што су рачунарска напајања са релативно великим вриједностима DC кондензатора, које се крећу од 330 μF до 1000 μF).

У електроенергетским постројењима, најзахтјевнији и најкритичнији DC потрошачи који изискују беспрекидан напон напајања су следећи уређаји:

- системи заштите и аларма,
- даљинске станице,
- растављачи (управљање и погон),
- електромоторни погони прекидача,
- управљачки кругови ВН, СН и НН прекидача,
- системи телекомуникација,
- системи мјерења и
- општа потрошња DC и (или) AC (расвјета и др.).

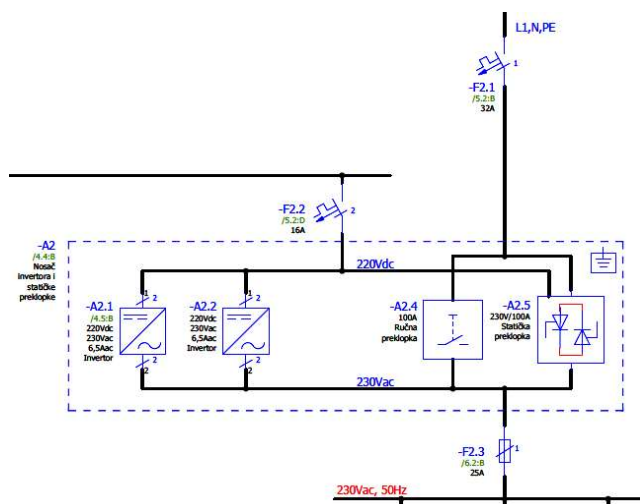
У раду су представљени основни елементи беспрекидног напајања који се користи за потребе сопствене потрошње у трансформаторској станици 110/20 kV Лакташи 2.

Опрема система беспрекидног напајања која је одабрана приликом пројектовања ТС 110/20 kV Лакташи 2 [5], морала је бити верификована интерним испитивањима. Испитивање се односило на мјерење улазног једносмјерног напона са DC сабирница, напона на потрошачима (излаз са статичке преклопке) и струје потрошача.

Резултати верификације су показали да је вријеме преклапања статичке преклопке на секундарни извор напајања по нестанку или опадању примарног извора напајања испод 5 ms (1/4 периоде сигнала од 50 Hz). Такав захтјев је условљен прикљученим AC потрошачима за које сваки прекид напајања изнад 5 ms представља губитак напајања и уређаји се присилно гасе. Такође овај захтјев за прекидом напајања, иде на страну сигурности у погледу поузданости напајања и поузданог рада DC потрошача.

II. ОПИС СТРУКТУРЕ СИСТЕМА БЕСПРЕКИДНОГ НАПАЈАЊА

Основна структура система непрекидног напајања властите и неопходне потрошње ТС 110/20 kV Лакташи 2, састављена од кућног трансформатора, двије акумулаторске банке, два инвертора и три монофазна исправљача, је дата на Сл. 1 [5]. Инверторске јединице и јединице статичке преклопке су управљане савременом микропроцесорском технологијом и одликују се брзим и ефикасним дјеловањем, добрим дијагностичким функцијама са могућношћу повезивања у систем управљања путем индустријске „ETHERNET“ комуникације по IEC 61850 протоколу.



Сл. 1 Једнополна шема система непрекидног напајања ТС 110/20kV Лакташи 2

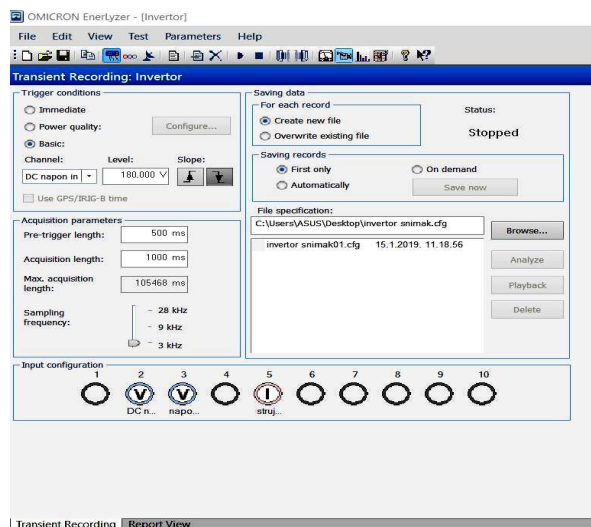
Статичка преклопка је реализована примјеном брзих полупроводничких прекидача (тиристора). Основни задатак статичке преклопке је да се, у случају нестанка или значајног смањења напона примарног извора, на потрошаче пребаци други извор напајања, а да при томе нема прекида [2]. Уз правилно управљање, могуће је обезбједити пребацивање напајања потрошача са једног извора на други практично са минималном напонском паузом, односно да при томе пауза у напајању не буде дужа од 5 ms [1], [2]. Статичка преклопка је у овом случају реализације система непрекидног напајања интегрисана у склопу инверторског модула.

Веома битни елементи приказаног система непрекидног напајања су конфигурација улазних величина, диспозиција мјernih тачака као и коришћена мјерна опрема. Ови елементи су били од кључног значаја при верификацији система непрекидног напајања.

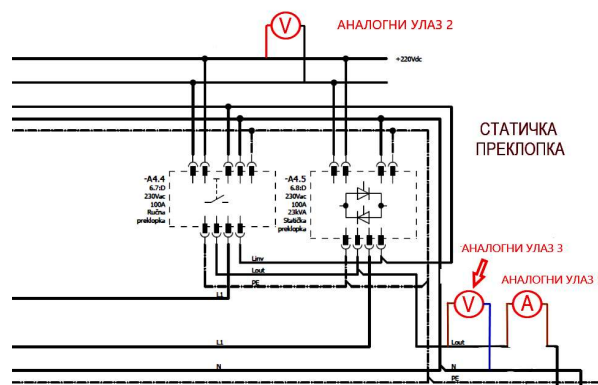
Распоред и подешавање улазних величина на мјерном анализатору су представљени на Сл. 2.

Мјерне тачке које су битне за испитивање и мјерење квалитета рада система су приказане на Сл. 3. Ту спадају:

- DC напон сабирница на улазу у инвертор (аналогни улаз 2. у анализатору),
- AC напон на потрошачима на излазу статичке преклопке (аналогни улаз 3. у анализатору) и
- AC струја на потрошачима на излазу статичке преклопке (аналогни улаз 5. у анализатору).



Сл. 2 Приказ почетног подешавања анализатора



Сл. 3 Мјерне тачке за испитивање рада статичке преклопке

Инструменти који су коришћени током верификације и тестирања:

- Анализатор OMICRON CMC 256-6,
- Струјна клијешта OMICRON CURRENT PROBE C-Probe1 и
- Мултиметар FLUKE 179.

Анализатор OMICRON CMC 256-6 има десет аналогних улаза на које се могу довести напонски и струјни сигнали [6]. Инструмент се повезује са рачунаром преко USB улаза са стране рачунара и LPT порта са стране анализатора помоћу одговарајућег кабл интерфејса. Софтвер помоћу којег се прати и управља радом инструмента је „TEST UNIVERSE“, модул „EnerLyzer“. За

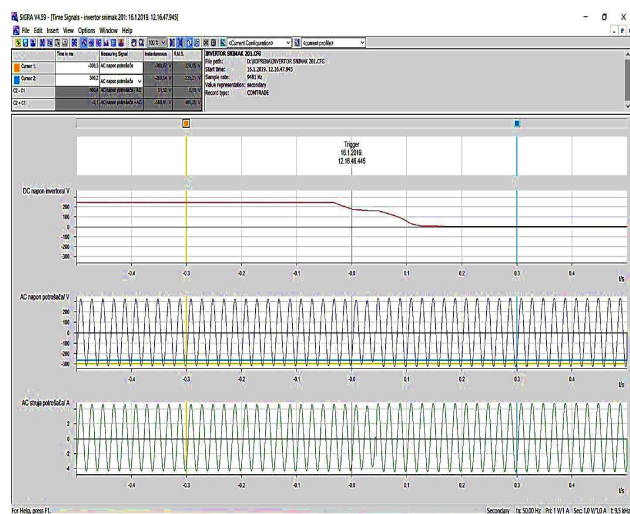
анализу резултата испитивања коришћен је програм *SIGRA V4.59*. За потребе верификације система непрекидног напајања је веома било битно остварити функцију тригеровања анализатора и ускладити напонске нивое.

Тригеровање анализатора *OMICRON CMC 256-6* је подешено кад напон на *DC* сабирницама опадне испод 180 V (на силазну ивицу сигнала) што је уједно и напон батерије кад су све ћелије испразњене. Фреквенција узорковања сигнала је 9 kHz. Вријеме које је обухваћено снимком је пола секунде прије окидања и траје једну секунду.

III. РЕЗУЛТАТИ МЈЕРЕЊА И ИСПИТИВАЊА

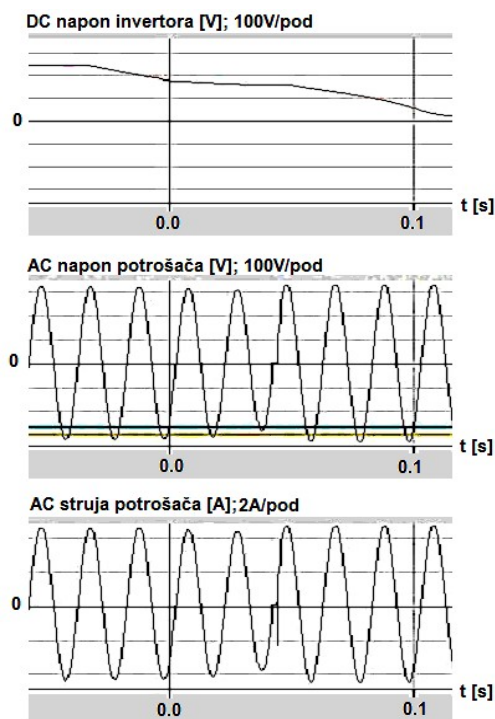
Статичка преклопка која је интегрисана у инвертор *INVERTRONIC (220Vdc/230Vac/6.5A)* је тако подешена да јој је *DC* напон са батерија (излаз исправљача) примарни улаз, а *AC* напон мреже секундарни улаз, гледано по приоритету. Напон на излазу инвертора се добија коришћењем дигиталног сигнал процесора (*DSP*) помоћу којег се остварује контрола рада снажних излазних *MOSFET* транзистора, при чему је цијели систем базиран на *PWM* технологији. Разлог за овакав рад је тај што је систем непрекидног напајања у *TC* Лакташи 2 конципиран тако да потрошачи који су везани на *DC* сабирнице ни у једном тренутку не остану без напајања. У случају да неки од батеријских чланака буде у квару (прекид и сл.), потрошаче напаја без икаквог преклапања *AC/DC* мрежни исправљач који је својим излазом стално везан на *DC* сабирнице. Ако се деси квар на једном од три *AC/DC* исправљача (три исправљача везани на фазне водове *L1, L2, L3* кућног трансформатора *KT, 20/0.4 kV/kV* и снаге 160 kVA, чине степен редуванције $n+2$), напајање *DC* сабирница преузимају акумулаторске банке.

Оптерећење које је спојено на излаз статичке преклопке је чист омски потрошач снаге 800 W, и као такво обезбјеђује да нема фазног помјераја између напона и струје.



Сл. 4 Резултати мерења напона *DC* сабирница и *AC* напона и струје на потрошачима

На Сл. 4 су приказани снимци напона на *DC* сабирницама, напона и струје на излазу инвертора (напон и струја *AC* потрошача). Сигнал напона на *DC* сабирницама је представљен црвеном бојом (скала графика је 100 V по подиоку), сигнал *AC* напона је представљен плавом бојом (скала графика је 100 V по подиоку) и сигнал *AC* струје је представљен зеленом бојом (скала графика је 1 A по подиоку). Напон на *DC* сабирницама је примарни напонски улаз у инвертор. На овом напонском сигналу се јасно види смањење нивоа напона и потпуни нестанак у временском интервалу од око 150 ms. Што се тиче *AC* напона и струје на потрошачима, уочава се рад без прекида и поред смањења и потпуног нестанка *DC* напона. У тренутку смањења нивоа *DC* напона уочава се мало смањење *AC* напона и његов релативно брз опоравак у интервалу мањем од 100 ms.



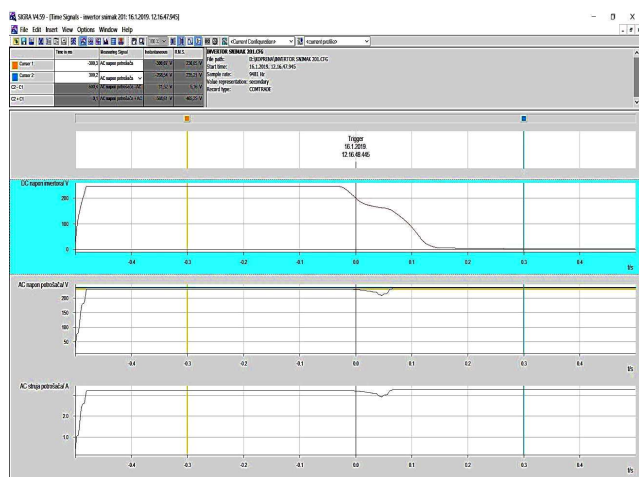
Сл. 5 Детаљан приказ напона на *DC* сабирницама и прекида напона и струје за вријеме дјеловања статичке преклопке

На Сл. 5 је дат детаљан приказ прекида напона и струје приликом преклапања за вријеме деловања статичке преклопке. Уочава се да су након опадања *DC* напона испод подешеног нивоа од 180 V протекле двије периоде и да је извршено је пребацивање са *DC* на *AC* напајање. Такођер, укључење је извршено приликом проласка и струје и напона потрошача кроз нулу што је још један доказ о квалитету изабраног система непрекидног напајања, што умногоме продужава радни вијек статичке преклопке и прикљученог *AC* оптерећења. Укључење статичке преклопке при проласку мрежног напона кроз нулту вриједност је осигурано поузданим контролним колом које у основи сачињавају функционалне цјелине: (1) детектор проласка мрежног напона кроз нулу ("zero-

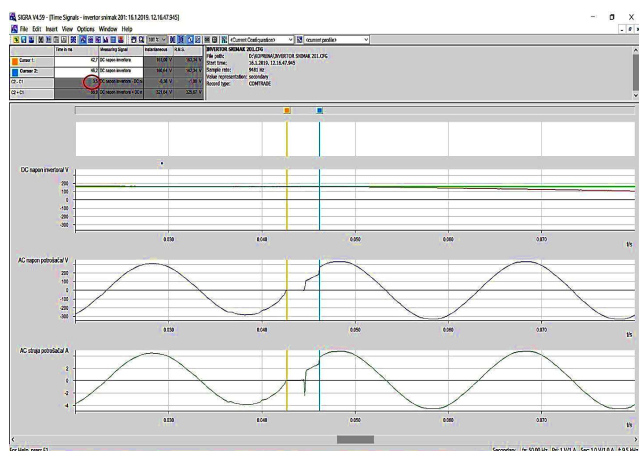
cross detection"), (2) логичко коло за дозволу укључења тиристорских прекидача, (3) коло са фазно спрегнутом петљом ("Phase locked loop" - PLL) и (4) сигнални генератор са галвански изолованим побудним колом (драјверима) за укључење тиристорских прекидача.

Присуство двије периоде примарног напона напајања након тригерована су резултат нагомилане енергије у излазним кондензаторима AC/DC претварача (исправљача). Поменута слика приказује чист синусни напон и на излазу инвертора као и приликом напајања са AC мреже.

На Сл. 6 је дат приказ снимка мјерења ефективних вриједности струје и напона на потрошачу. Резултат показује благи пропад ефективних вриједности AC напона и струје на потрошачу приликом преклапања статичке преклопке. Ефективна вриједност напона на AC потрошачима која је измјерена и приказана у табели при врху снимка износи 230 V, док је активан примарни DC напон, односно 235 V кад је присутан AC напон са мреже.



Сл. 6 Снимљени приказ мјерења ефективних вриједности („RMS value“) струје и напона



Сл. 7 Детаљан снимак AC напона и струје у моменту дејства статичке преклопке

На Сл. 7 је приказан детаљан снимак напона и струје потрошача у моменту дејства статичке преклопке. Из табеле која се налази у горњем десном углу снимка, величине које се упоређују и прате су смјештене између плавог и жутог граничника. У овом случају измјерен је почетак преклапања кад је напон на DC сабирницама 163 V, а крај преклапања је при 162 V. Могуће је подесити посматрање било која од три улазна сигнала у подешеном временском периоду и израчунавање разлике и збира изабраних сигнала.

На Сл.8 је приказан детаљан снимак пропада напона на AC потрошачу са приказом времена трајања пропада.

Жути граничник C1 на Сл. 7 и Сл. 8 које приказују резултате мјерења је постављен на мјесто почетка дјеловања статичке преклопке, а плави граничник C2 на мјесто краја преклапања.

Табела у горњем десном углу на Сл. 8 приказује временски резултат C2-C1 и црвеним кругом је показано да то вријеме износи 3.5 ms. Успостављање напајања се изврши и раније, али прави континуитет синусног напона настаје најкасније по истеку ове временске разлике.

Овакав резултат мјерења од 3.5 ms трајања прекида при пребацивању статичке преклопке верификује изабрано пројектантско рјешење као исправно и конзистентно.



Сл. 8 Детаљан приказ пропада напона на AC потрошачу са табеларним приказом времена трајања пропада

IV. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је представљен систем непрекидног напајања у трансформаторској станици TC 110/20 kV Лакташи 2, који је био предмет тестирања и верификације. У оквиру експлоатационих тестова је показано да су задовољени основни захтјеви у погледу димензионисања и квалитета опреме, безбједности и поузданости рада система. У склопу реализованог пројекта је остварена оптимизација и побољшање система непрекидног напајања.

Побољшање система се прије свега огледа у употреби три монофазна исправљача који су замјенили један трофазни у претходним верзијама система непрекидних напајања. Овим је повећана редундантност у напајању DC сабирница. Такођер, урађено је и спајање акумулаторских батерија директно на DC сабирнице, умјесто на исправљач као што је било реализовано у претходним системима. На овај начин је спријечен губитак напајања критичних потрошача приликом квара исправљача. Редунданција је остварена и у инверторском и батеријском дијелу употребом два инвертора, односно двије акумулаторске групе батерија у паралелном раду.

Могућност даљњег побољшања и оптимизације система непрекидног напајања у ТС би ишла у правцу кориштења акумулаторских ћелија од 6 V, умјесто употребљених од 2 V. Разлози за ово су практичне и економске природе. Лакше је и економичније смјестити у ормаре, годишње испитивати и тестирати, ћелије од 6 V, при чему приликом отказа једне од њих у акумулаторској банци, не нарушава се значајно називни напон исте.

Конкретним мјерењима и испитивањима показано је да је вријеме дјеловања статичке преклопке испод 5 ms и да се извршава приликом проласка струје кроз нулу, чиме је верификовано непрекидно, поуздано и квалитетно напајање прикључених потрошача како у нормалном погону, тако и приликом присуства кварова и грешака.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B.Gurevich, Power Supply Devices and Systems of Relay Protection, CRC Press; 1 edition, Boca Raton - FLORIDA, April, 2016.
- [2] A.King. W.Knight, Uninterruptible Power Supplies, McGraw Hill Professional, 2002

- [3] V. Katić, Kvalitet električne energije-viši harmonici, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad 2002.
- [4] S. Mujović, J. Radović, "Karakteristike opterećenja računara sa aspekta uticaja na kvalitet električne energije", XII Savetovanje Energetska Elektronika, Novi Sad, 5-7 Novembar 2003.
- [5] Енергоинвест-СУЕ, „Пројекат: Опрема помоћног напајања-власита потрошња“, 30.05.2016, Електропренос ОП Бања Лука.
- [6] CMC 256 plus- User Manual, OMICRON Article Number VESD2002 - Version CMC256plus.AE.6
<http://userequip.com/files/specs/6009/CMC%20256plus%20User%20Manual.pdf>

ABSTRACT

This paper describes the basic elements of uninterruptible power supply used for self-consumption in the 110/20 kV-Laktaši 2 transformer station (TS). This power supply contains basic components such as rectifiers, inverters, batteries, static switches and associated control and signaling equipment. The main contribution in this research is to optimize and improve the operation of both the power supply and the static switch. During exploitation and testing, the quality and reliability of the designed solution were verified. Finally, the experimental results are presented on this basis and the most important conclusions are drawn.

OPTIMIZATION AND VERIFICATION OF THE SYSTEM FOR UNINTERRUPTIBLE POWER IN THE TRANSFORMER STATION 110/20 kV LAKTAŠI 2

Zdravko Perić
Željko V. Despotović
Branislav Koprena



Simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2019

14 - 15. novembar, Banja Luka

Sesija D

Sesija D

Sanja Jović, Marko Ikić, Mladen Banjanin i Goran Vuković

UTICAJ CFL I LED RASVJETNIH TIJELA NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE73

Predrag Mršić, Nemanja Kitić, Bojan Erceg, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković i Petar Matić

**PROJEKTOVANJE PASIVNOG KOMPENZATORA NEAKTIVNE SNAGE
INDUSTRIJSKOG POTROŠAČA79**

Diana Bogdan, Petar Gvero i Milovan Kotur

**KORIŠĆENJE TRNSYS SOFTVERA KAO ALATA U DIMENZIONISANJU I OPTIMIZACIJI SISTEMA ZA
SOLARNO ZAGRIJAVANJE TOPLE POTROŠNE VODE84**

Renata Srbljanin, Vladimir Popović, Roberto Varga, Petar Matić i Darko Marcetić

**GRAPHICAL USER INTERFACE FOR SELF-COMMISSIONING OF INDUCTION MOTOR DRIVE INSURING
HIGH-EFFICIENCY OF ELECTRICAL VEHICLE90**

Milan Paripović

TELEKOM JE LIDER U ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI95

Slobodan Lubura

REGENERACIJA KINETIČKE I POTENCIJALNE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM SISTEMIMA101

Uticaj CFL i LED rasvjetnih tijela na kvalitet električne energije

Sanja Jović¹, Marko Ikić², Mladen Banjanin², Goran Vuković²

¹MH „ERS“- MP a.d. Trebinje- ZEDP „ELEKTRO-BIJELJINA“ a.d. Bijeljina, Bijeljina, Republika Srpska

²Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, Republika Srpska
sanjajovic994@gmail.com, marko.ikic@etf.ues.rs.ba, mladen.banjanin@etf.ues.rs.ba, goran.vukovic@etf.ues.rs.ba

Sažetak—U radu su analizirane osnovne karakteristike CFL i LED rasvjetnih tijela. Posebna pažnja posvećena je analizi njihovog uticaja na kvalitet električne energije u mreži. Kreiran je simulacioni model opisanih rasvjetnih tijela i izvršena su eksperimentalna mjerenja struje ovih potrošača. Urađena je analiza talasnih oblika struje i određen je njen harmonijski spektar. Utvrđena je vrijednost faktora totalne harmonijske distorzije (THD) kojim se kvantifikuje nivo prisustva viših harmonika u talasnom obliku struje. Na kraju rada su prezentovani osnovni zaključci o uticaju pomenutih rasvjetnih tijela na kvalitet električne energije.

Ključne riječi—viši harmonici; THD faktor; kvalitet električne energije;

I. UVOD

Danas, u Evropi, rasvjeta čini oko 14% ukupne potrošnje električne energije, što ukazuje na njen izražen uticaj na okolinu i troškove energije. Smanjenje troškova i ušteda električne energije mogu se postići provođenjem mjera koje se odnose na primjenu energetske efikasne rasvjetne tijela. Ulaganjem u sisteme energetske efikasne rasvjete može se uštediti između 30 i 50% električne energije [1].

Prilikom zamjene i ugradnje novih sistema osvjetljenja treba uzeti u obzir energetske efikasne vrste rasvjetnih tijela. Izbor rasvjetnih tijela treba biti zasnovan na postizanju ekološki i ekonomski optimalnih uslova osvjetljenja radnog mjesta. Novo rasvjetno tijelo se može smatrati ekološkim i efikasnim ukoliko posjeduje jednak svjetlosni fluks uz manju potrošnju električne energije.

U poređenju sa klasičnim inkandescentnim sijalicama nove vrste električnih rasvjetnih tijela kao što su CFL (kompaktne fluorescentne svjetiljke) i LED sijalice su energetske efikasnije. Na primjer, CFL sijalice koriste između 65% i 80% manje energije od klasičnih inkandescentnih sijalica [2]. Orijentaciono govoreći, inkandescentna sijalica od 60 W ima isti svjetlosni fluks kao CFL sijalica od 13 W, odnosno LED sijalica od 10 W.

Ipak, CFL i LED rasvjetna tijela predstavljaju nelinearna opterećenja čija struja je veoma izobličena višim harmonicima. Strujni harmonici se prostiru kroz niskonaponsku mrežu i na elementima sistema prave dodatne padove napona tako da se na taj način generišu i viši harmonici u naponu. Interaktivnost između potrošača i mreže

može imati za posljedicu da potrošači u značajnoj mjeri vrše generisanje viših harmonika u mrežu što kasnije može da negativno utiče i na njih same [3], [4].

Zbog male snage potrošnje, pojedinačno, bilo koja od sijalica ne može bitno uticati na kvalitet električne energije. Međutim kada se posmatra na nivou distributivne mreže, uticaj ovakvih potrošača na kvalitet električne energije je znatno veći i u budućnosti može imati izražen uticaj na rad elektrodistributivne mreže.

II. OSNOVNE KARAKTERISTIKE CFL I LED SIJALICA

CFL sijalice su kompaktne fluorescentne cijevi malih dimenzija. U sklopu sijalice nalazi se elektronski pretvarač (elektronski balast) koji vrši paljenje cijevi i ograničenje struje. Svjetlosna iskoristivost ovih sijalica je 70 lm/W, što je znatno bolje u odnosu na inkandescentne sijalice. Životni vijek im je do 10000 h, a indeks reprodukcije boja im je do 75. Njihovi najznačajniji nedostaci su:

- cijena, skuplje su 5 do 20 puta od inkandescentnih sijalica,
- komplikovana i skupa tehnologija izrade,
- moraju se zaštititi od pare, vlage i kapljica,
- korištenje toksičnih materijala kao što je živa, arsen i barijum,
- štedne sijalice imaju složen upravljački sklop koji je sklon kvaru usljed naponskih oscilacija,
- štedne sijalice generišu više harmonike u distributivnoj mreži.

Danas se rasvjetna tijela sve više baziraju na primjeni LED tehnologije, koja predstavlja revolucionarni korak u oblasti električne rasvjete. LED je svjetleća poluprovodnička dioda koja emituje usmjerenu svjetlost. Više LED dioda u zajedničkom kućištu predstavlja LED sijalicu. Svjetlosna efikasnost LED sijalica prevazilazi efikasnost CFL sijalica. Svjetlosna iskoristivost ovih sijalica je do 130 lm/W. Emituju svjetlost bilo koje boje bez upotrebe filtera, a indeks reprodukcije boja im je do 80. Jedna od njihovih najvažnijih karakteristika je dug vijek trajanja koji iznosi 50000 h.

Osnovne prednosti LED sijalica su:

- značajna ušteda energije i manje zagađenje okoline,
- dugotrajnost, životni vijek im je 10 puta duži od CFL i približno 100 puta duži u odnosu na inkandescentne sijalice,
- ne emituju UV i IR zrake kao klasična ili CFL sijalica,
- ekološki su bezbjednije i mogu se reciklirati.

Osnovni nedostaci LED sijalica su:

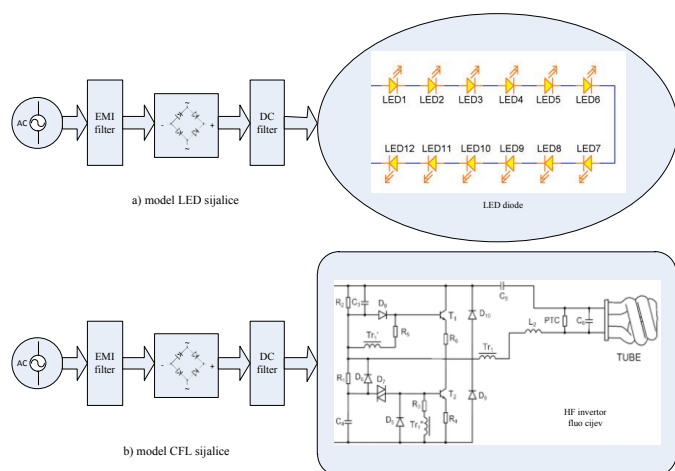
- Karakteristike LED jako zavise od temperature ambijenta. Strujno preopterećenje LED sijalica ili visoka temperatura okoline mogu dovesti do drastičnog smanjenja vijeka trajanja sijalice pa čak i do trajnog oštećenja.
- Niži indeks reprodukcije boja u odnosu na inkandescentne sijalice.

III. SIMULACIONI MODEL RASVJETNIH TIJELA

U nastavku rada, prikazana je fotografija i dat je blok dijagram modela CFL i LED sijalica. Simulacioni model ovih rasvjetnih tijela je urađen u Matlab/Simulink okruženju na bazi predstavljenih modela sa blok dijagrama i konkretnih vrijednosti elemenata sijalica prikazanih na slikama 1 i 2, te dostupne literature [5], [6], [7].



Sl. 1. Izgled LED i CFL sijalice i njihovih sastavnih dijelova

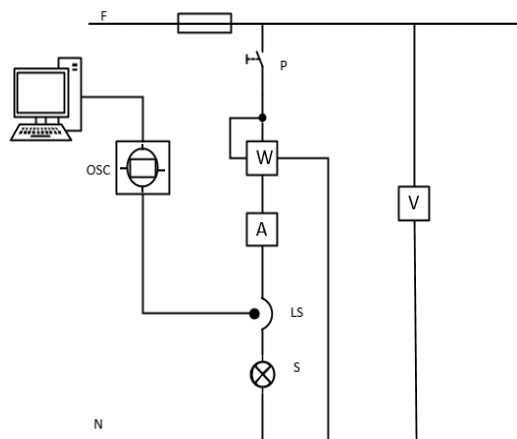


Sl. 2. Blok dijagrami LED i CFL sijalica

LED sijalica je jednostavnije izvedbe u odnosu na CFL sijalicu. Pored rasvjetnog tijela koga čine LED diode, za funkcionisanje sijalice dovoljan je jednostavan elektronski balast za koji pored EMI filtera, diodnog ispravljača i DC filtera nije potreban dodatni element za ispravan rad. Kod CFL sijalica, pored nabrojanih elemenata elektronskog balasta, potrebno je obezbijediti i visokofrekventni rezonantni inverter (najčešće u polumosnoj izvedbi) kojim bi se medium u fluo cijevi aktivirao. Zbog toga je pretvarač u CFL sijalici složeniji i sa nižim koeficijentom korisnog dejstva.

IV. EKSPERIMENTALNA MJERENJA

Eksperimentalna mjerenja talasnog oblika struje CFL i LED sijalica su urađena prema šemi sa slike 3.



Sl. 3. Šema spajanja eksperimentalne postavke

Uključenje i isključenje sijalice u kolu je vršeno preko instalacionog prekidača (P) nazivne struje 16 A i nazivnog napona 400 V. Redno sa prekidačem su povezani vatmetar (W) i ampermetar (A), a zatim Lemova sonda (LS). Sa Lemove sonde signal se vodi na dvokanalni digitalni osciloskop (OSC) koji je povezan sa personalnim računarom na kome je vršena akvizicija mjerenih podataka.

Mjerenja su vršena za tri sijalice, jedna CFL i dvije LED sijalice (jedna je od poznatog proizvođača i veće cijene koštanja LED-1, a druga je jeftinija i od manje poznatog proizvođača LED-2).

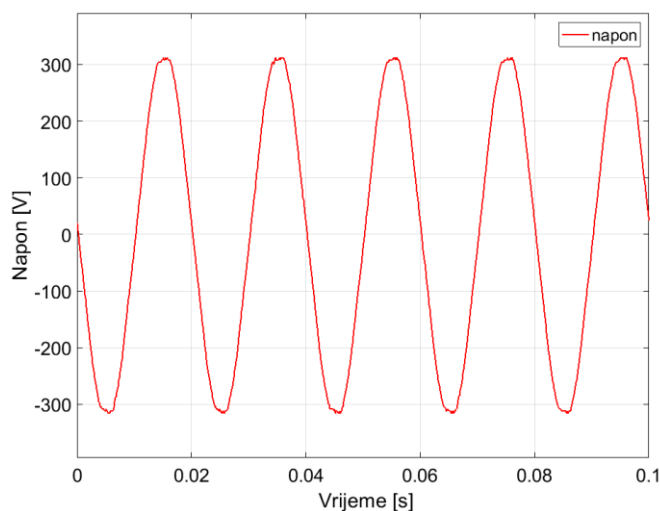
U tabeli I dat je prikaz izmjernih parametara sijalica. Nazivna snaga LED-1 sijalice je 9 W, a izmjerena je veća i iznosi 9,5 W, dok je nazivna snaga LED-2 sijalice 11 W, a izmjerena je manja i iznosi 10,3 W. Kako je izmjerena vrijednost LED-2 sijalice manja od nazivne, vjerovatno je i svjetlosni fluks ove sijalice manji od deklarisanog.

TABELA I. MJERENE VRIJEDNOSTI SNAGA, STRUJA I NAPONA ANALIZIRANIH SIJALICA

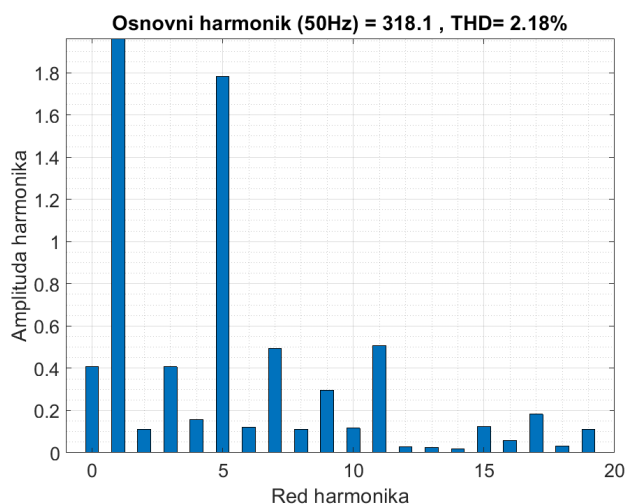
Tip sijalice	Nazivna snaga [W]	Mjerena snaga [W]	Struja [mA]	Napon [V]
CFL	15	16,7	110	229,5
LED - 1	11	10,3	75	229,5
LED - 2	9	9,5	72	229

A. Harmonijska analiza napona mreže

Talasni oblik mrežnog napona je snimljen primjenom sonde prenosnog odnosa 1:100 i prikazan je na slici 4. Harmonijski sadržaj napona mreže je prikazan na slici 5.



Sl. 4. Talasni oblik napona mreže



Sl. 5. Harmonijski sadržaj napona mreže

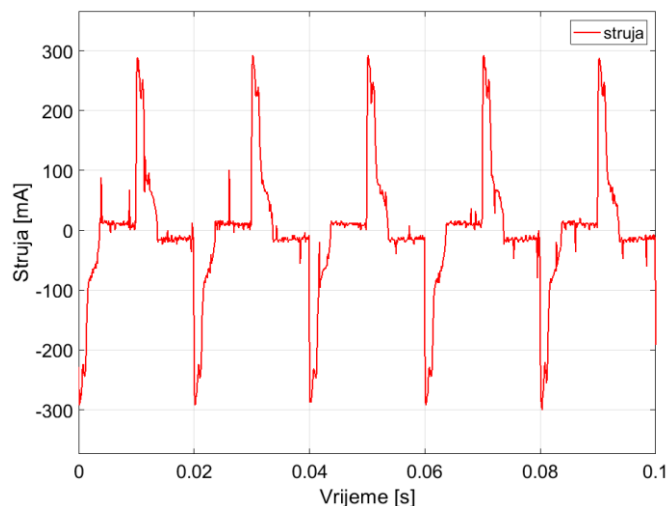
Totalna harmonijska distorzija napona mreže iznosi 2,18% što je ispod granične vrijednosti od 5%, koja je deklarirana u tehničkim preporukama. Kao što je poznato, najizraženiji harmonik u mrežnom naponu je peti, s obzirom da sprega distributivnih transformatora u trougao filtrira treći harmonik u mreži.

B. Harmonijska analiza struje CFL sijalice

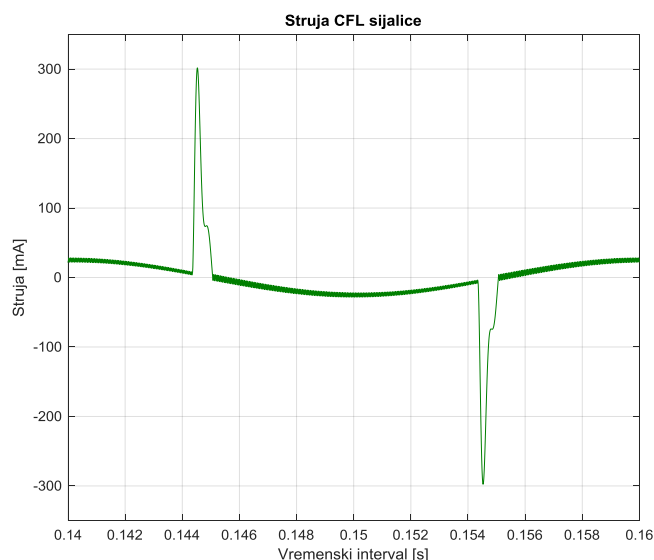
Talasni oblik struje CFL sijalice koji je snimljen u laboratoriji je prikazan na slici 6 i isti je izrazito izobličen višim harmonicima. Na slici 7 je prikazan talasni oblik struje CFL sijalice koji je dobijen numeričkim proračunima.

CFL sijalice predstavljaju izrazito nelinearne potrošače, tako da njihove struje sadrže harmonike koji ne postoje u

naponu napajanja. Kao rezultat toga registruje se značajna vrijednost faktora totalne harmonijske distorzije. U analiziranom slučaju $THD = 102,30\%$. Izražene su vrijednosti neparnih harmonika. Posebno je izraženo učešće trećeg harmonika. Uočava se dosta dobro slaganje talasnih oblika struja koje su dobijene mjerenjem i simulacijama, što znači da je kreirani simulacioni model tačan i pouzdan za proračune.



Sl. 6. Talasni oblik struje CFL sijalice snimljen u laboratoriji

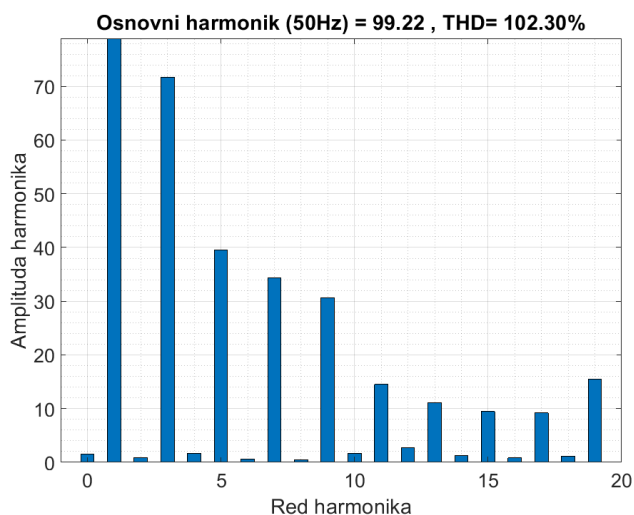


Sl. 7. Talasni oblik struje CFL sijalice dobijen numeričkim proračunima

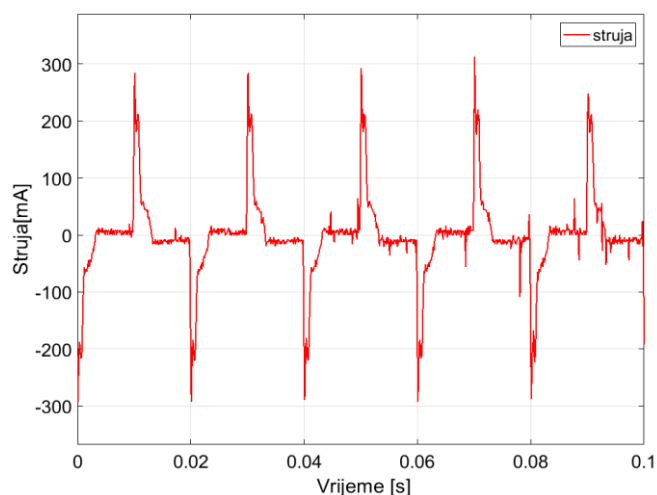
Na slici 8 je prikazan sadržaj viših harmonika u talasnom obliku struje sijalice koji je snimljen u laboratoriji. THD struje je veoma loš i iznosi 102,3%, uz visok sadržaj neparnih viših strujnih harmonika.

U tabeli II su date granične vrijednosti pojedinačnih harmonika struje potrošača u procentualnom iznosu osnovnog harmonika prema standardu IEC 61000-3-2 [8], kao i izmjerene vrijednosti viših harmonika mjerene struje CFL

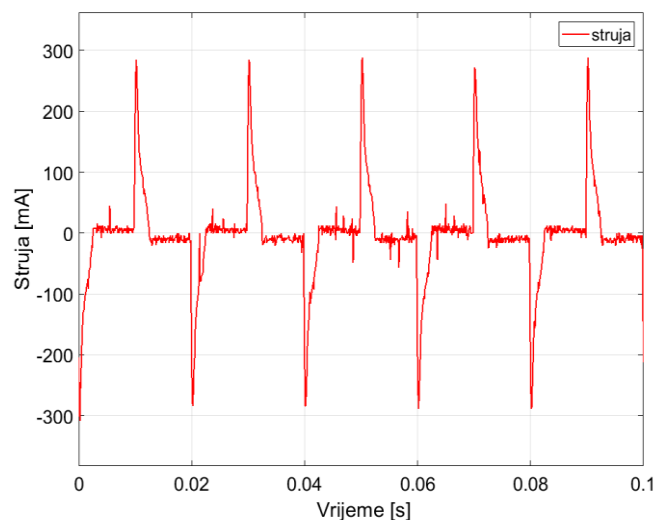
sijalice. Za faktor snage sijalice je usvojena teorijska vrijednost $PF=0,6$.



Sl. 8. Harmonijski sadržaj struje CFL sijalice



Sl. 9. Talasni oblik struje LED-1 sijalice snimljen u laboratoriji



Sl. 10. Talasni oblik struje LED-2 sijalice snimljen u laboratoriji

TABELA II. POREĐENJE MJERENIH VRIJEDNOSTI VIŠIH HARMONIKA U STRUJI CFL SIJALICE NASPRAM NJIHOVIH GRANIČNIH VRIJEDNOSTI PREMA STANDARDU IEC 61000-3-2

Red harmonika	IEC standard Harmonici struje [%]	Mjerenje Harmonici struje [%]
<i>Paran harmonik</i>		
2	2	0,9
<i>Neparni harmonici</i>		
3	$30\% \times PF = 30 \times 0,6 = 18$	71,75
5	10	39,53
7	7	34,29
9	5	30,63
$9 < n < 39$	3	11,92

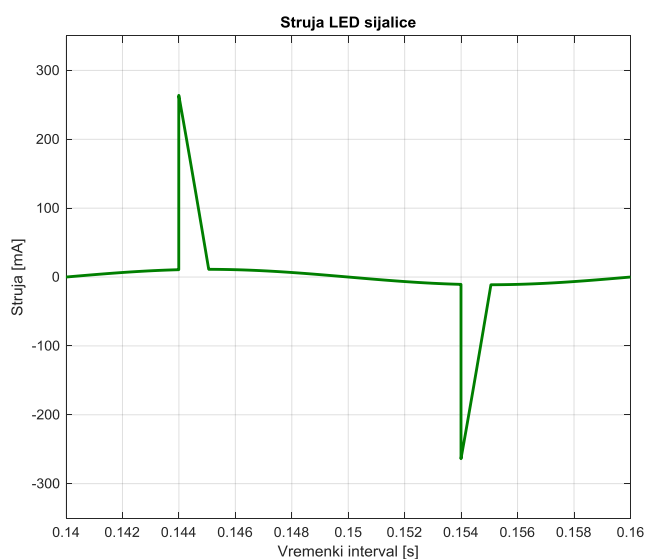
Prema standardu IEC 61000-3-2 postoje dva kriterijuma od kojih bar jedan mora biti zadovoljen kada su u pitanju viši strujni harmonici:

- Granične vrijednosti individualnih harmonika struje potrošača su date u tabeli II.
- Treći harmonik struje potrošača ne smije da prelazi 86%, a peti harmonik 61% vrijednosti osnovnog harmonika struje.

Uočava se da samo drugi harmonik struje zadovoljava prvi kriterijum standarda IEC 61000-3-2. Drugi kriterijum ovog standarda je zadovoljen jer treći harmonik struje CFL sijalice iznosi 71% (granica je 86%), a peti harmonik iznosi 39.53% (granica je 61% osnovnog harmonika). S obzirom da je drugi kriterijum standarda IEC 61000-3-2 zadovoljen analizirana CFL sijalica zadovoljava standardne po pitanju generisanja viših strujnih harmonika.

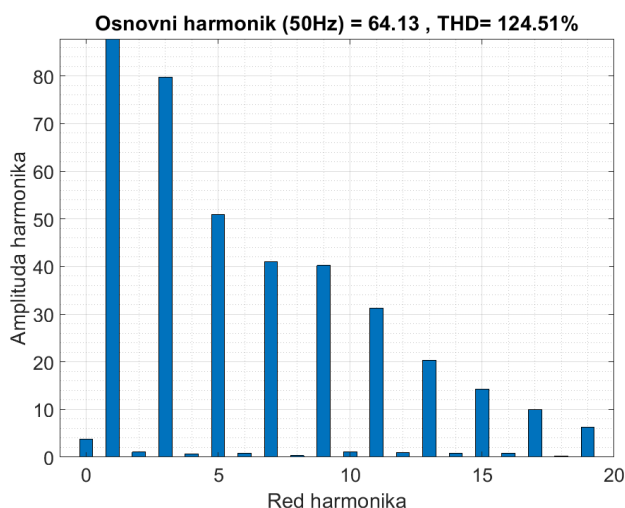
C. Harmonijska analiza struja LED sijalica

Talasni oblici struja LED sijalica koji su snimljeni u laboratoriji su prikazani na slikama 9 i 10. Na slici 11 je prikazan talasni oblik struje LED sijalice koji je dobijen numeričkim proračunima.

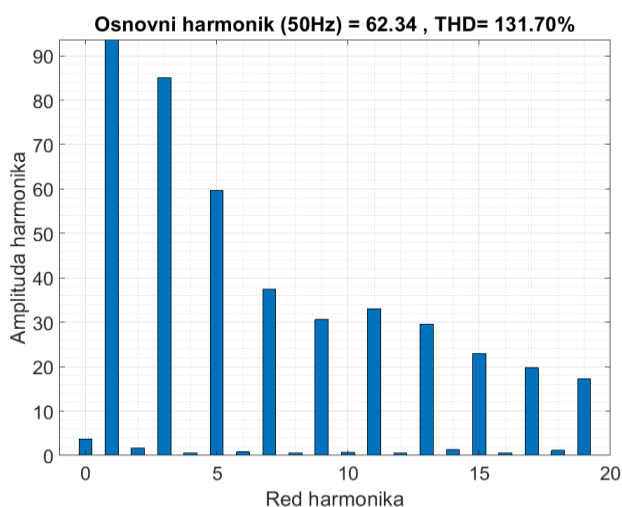


Sl. 11. Talasni oblik struje LED sijalice dobijen numeričkim proračunima

Na slikama 12 i 13 je prikazan sadržaj viših harmonika u talasnim oblicima struja LED sijalice koji su snimljeni u laboratoriji.



Sl. 12. Harmonijski sadržaj struje LED-1 sijalice



Sl. 13. Harmonijski sadržaj struje LED-2 sijalice

Kao i kod CFL sijalica, i LED sijalice imaju struju veoma izobličenog talasnog oblika. Sa grafika se mogu uočiti minimalne razlike u talasnim oblicima struja LED sijalica brendiranog i manje poznatog proizvođača. Talasni oblik struje simulacionog modela LED sijalice više odgovara LED-2 sijalici iz razloga što su u proračunima i modelima korištene vrijednosti upotrebljenih elemenata koje su odgovarale datoj sijalici. Bez obzira na tu činjenicu, jasno se može vidjeti da i ovakav model LED sijalice može da zadovolji u daljim analizama ovog tipa rasvjetnih tijala.

LED sijalice imaju veoma visok faktor totalne harmonijske distorzije koji je veći nego kod CFL sijalice, s tim što je *THD* faktor lošiji kod sijalice manje poznatog brenda. Procentualne vrijednosti viših harmonika obje LED sijalice su dati u tabeli III. Za faktor snage usvojena je njegova teorijska vrijednost od $PF=0.5$. Ni LED sijalice ne zadovoljavaju prvi

kriterijum standarda IEC 61000-3-2 po pitanju sadržaja viših harmonika, ali kao i CFL sijalica zadovoljavaju drugi kriterijum. Naime, LED-2 sijalica sadrži treći harmonik u iznosu od 85,13% (granica je 86% vrijednosti osnovnog harmonika), a peti harmonik u iznosu od 59,60% (granica je 61% vrijednosti osnovnog harmonika), dok struja LED-1 sijalice ima sadržaj trećeg i petog harmonika od 79,2% i 50,92% respektivno, što je ispod granice koju definiše standard.

TABELA III. POREĐENJE MJERENIH VRIJEDNOSTI VIŠIH HARMONIKA U STRUJI LED SIJALICA NASPRAM NJIHOVIH GRANIČNIH VRIJEDNOSTI PREMA STANDARDU IEC 61000-3-2

Red harmonika	IEC standard harmonici struje [%]	Mjerenje harmonici struje [%]	
		LED 1	LED 2
Paran harmonik			
2	2	1,07	1,64
Neparni harmonici			
3	30%×PF=30×0,5=15	79,82	85,13
5	10	50,9	59,60
7	7	41,06	37,47
9	5	40,26	30,63
9 < n < 39	3	16,44	24,42

V. ZAKLJUČAK

Prilikom primjene novih tehnologija u osvjetljenu prvenstveno se vodi računa o uštedi električne energije. Sa druge strane, neophodno je voditi računa i o kvalitetu električne energije koji se isporučuje potrošačima kako bi se spriječio niz neželjenih efekata koje loš kvalitet električne energije može prouzrokovati kako u mreži, tako i kod potrošača. Iz tog razloga veoma je bitno uvođenje graničnih vrijednosti sadržaja viših harmonika u struji potrošača.

U slučaju da talasni oblik struje CFL i LED sijalica ne zadovoljava standardom propisane vrijednosti, može se vršiti popravka talasnog oblika struje ugradnjom odgovarajućih električnih filtera koji istovremeno smanjuju *THD* faktor i povećavaju faktor snage potrošača. Analizirane sijalice su napravljene tako da su njihovi odgovarajući parametri harmonijskog izbličenja struje u dozvoljenim granicama. Ipak, talasni oblici struja ovih sijalica su veoma izobličeni tako da se u budućnosti može očekivati veće izobličenje talasnog oblika napona u niskonaponskoj mreži i lošiji kvalitet električne energije koja se isporučuje potrošačima.

LITERATURA

- [1] Zhiliang Wei, "Compact Fluorescent Lamps phase dependency modelling and harmonic assessment of their widespread use in distribution systems", University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, Sep. 2009.
- [2] Nabava i zaštita okoliša, Smjernice – učinkovita rasvjeta, dostupno na: <https://www.enu.hr>
- [3] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, Kvalitet električne energije, Ed. J. Milanović, CEFES EU Tempus Project, Novi Sad, jun 2007.
- [4] S. Mujović, V. Katić, J. Radović, „Uticaj grupisanja nelinearnih potrošača malih snaga na redukovanje harmonijskog spektra generisane struje“, ETF Journal of Electrical Engineering, br. 1
- [5] Muhyaddin J. H. Rawa, David W. P. Thomas, Mark Sumner, "Experimental Measurements and Computer Simulations of FL and CFL

Lamps for Harmonic Studies”, 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation

- [6] Chun-An Cheng, En-Chih Chang, Ching-Hsien Tseng and Tsung-Yuan Chung, “A Single-Stage LED Tube Lamp Driver with Power-Factor Corrections and Soft Switching for Energy-Saving Indoor Lighting Applications”, Applied Sciences, Sep 2017.
- [7] A. Tokić, M. Kasumović, D. Bago, V. Milardić, B. Filipović – Grčić, „LED sijalice kao izvori viših harmonika“, BH K/O CIRED, oktobar 2018.
- [8] IEC 61000-3-2:2018, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).

ABSTRACT

In this paper the basic characteristics of CFL and LED lighting are analyzed. Special attention was paid to the analysis of their influence on the electric power quality in the network. A

simulation model of the described lighting bodies was created and experimental measurements of the current of these consumers were performed. An analysis of currents waveforms was performed, and its harmonic spectrum was determined. The value of the total harmonic distortion factor (THD) was determined, which quantifies the level of the presence of higher harmonics in the waveform of the current. At the end of the paper, the basic conclusions about the influence of the mentioned lighting bodies on the quality of electricity were presented.

INFLUENCE OF CFL AND LED LIGHTING ON THE ELECTRIC POWER QUALITY

Sanja Jović, Marko Ikić, Mladen Banjanin, Goran Vuković

Projektovanje pasivnog kompenzatora neaktivne snage industrijskog potrošača

Predrag Mršić, Nemanja Kitić, Bojan Erceg, Đorđe Lekić, Čedomir Zeljković, Petar Matić

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

predrag.mrsic@etf.unibl.org, nemanja.kitic@etf.unibl.org, bojan.erceg@etf.unibl.org,

djordje.lekic@etf.unibl.org, cedimir.zeljkovic@etf.unibl.org, petar.matic@etf.unibl.org

Sažetak—Porast broja energetskih pretvarača u savremenim industrijskim postrojenjima dovodi do povećanja ukupnog harmonijskog izobličenja napona i struje. Prisustvo izobličenih napona i struja zahtijeva novi pristup projektovanju pasivnih kompenzatora za industrijske potrošače, koji se zasniva na kompenzaciji neaktivne snage. U ovom radu je sprovedena analiza talasnih oblika struje opterećenja za realan industrijski potrošač, te je izvršen proračun pasivnih kompenzatora neaktivne snage primjenom postupka minimizacije gubitaka aktivne snage napojnog voda. Predloženo rješenje je testirano računarskim simulacijama koje kao ulazne podatke koriste talasne oblike napona i struja izmjerene u postrojenju.

Ključne riječi— *industrijski potrošač; neaktivna snaga; pasivni kompenzator; viši harmonici;*

I. UVOD

Distributivne kompanije industrijskim potrošačima naplaćuju prekomjerno utrošenu reaktivnu energiju, tako da se u industrijskim postrojenjima uglavnom pristupa kompenzaciji reaktivne energije. Procedura projektovanja baterija kondenzatora za kompenzaciju reaktivne energije u simetričnim prostoperiodičnim radnim režimima je relativno jednostavna [1]. Usljed primjene sve većeg broja energetskih pretvarača u industriji, neophodno je uvažiti više harmonike napona i struja pri kompenzaciji reaktivne energije [2]. Opšteprihvaćenom definicijom reaktivne snage obuhvata se samo oscilatorna razmjena energije između potrošača i izvora, pa se javlja potreba za definicijom neaktivne snage koja uvažava i tokove snaga viših harmonika [3].

Ugradnjom otočne baterije kondenzatora smanjuje se ekvivalentna impedansa potrošača, što je praćeno sporenim efektom povećavanja amplituda viših harmonika struje i gubitaka aktivne snage napojnog voda. Osim toga, postoji i opasnost od pojave rezonanse između kapacitivnosti baterije kondenzatora i induktivnosti napojnih vodova i transformatora. Jedan od načina za ograničenje viših harmonika struje je zamjena baterija kondenzatora pasivnim filterima koji će imati ulogu kompenzatora neaktivne snage [4]–[9]. Pasivni filteri se projektuju tako da reaktansa filtra na učestanosti osnovnog harmonika bude jednaka reaktansi kondenzatora koja se dobije minimizacijom gubitaka aktivne snage napojnog voda [3], ali

da se istovremeno ostvari zanemarljiva impedansa filtra na učestanostima viših harmonika koje treba eliminisati [4]–[9]. Na ovaj način se istovremeno postiže da reaktansa filtra bude pretežno kapacitivna za osnovni harmonik, a pretežno induktivna za više harmonike, čime se sprečava pojava neželjenih rezonansi.

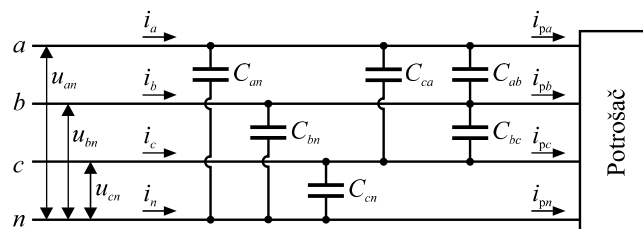
U ovom radu je izvršen proračun pasivnog kompenzatora neaktivne snage za realan industrijski potrošač primjenom postupka minimizacije gubitaka aktivne snage napojnog voda. Postupak za proračun parametara pasivnog kompenzatora neaktivne snage je predstavljena u drugoj glavi. Rezultati proračuna za konkretna mjerenja su verifikovani računarskim simulacijama projektovanog sistema u trećoj glavi.

II. METODOLOGIJA

U ovoj glavi će biti izložen postupak za proračun parametara pasivnog kompenzatora neaktivne snage za opšti slučaj trofaznog četvorožičnog sistema sa složenoperiodičnim i nesimetričnim naponima i strujama. Osnovna ideja postupka je da se u prvom koraku izvrši proračun baterije kondenzatora kojom se kompenzuje neaktivna snaga potrošača prema [3]. U drugom koraku, dodavanjem prigušnica na red sa kondenzatorskom baterijom formiraju se pasivni filteri za eliminaciju viših harmonika struje i kompenzaciju neaktivne snage potrošača [9].

A. Kompenzacija neaktivne snage primjenom kondenzatora

Na Sl. 1 je prikazana uopštena konfiguracija kondenzatorske baterije za kompenzaciju neaktivne snage sa šest kondenzatora. Tri kondenzatora su vezana između faznih provodnika (C_{ab} , C_{bc} , C_{ca}), a tri između svakog faznog i neutralnog provodnika (C_{an} , C_{bn} , C_{cn}). Kondenzatori C_{ab} , C_{bc} i C_{ca} su vezani u trougao, a kondenzatori C_{an} , C_{bn} i C_{cn} u zvijezdu.



Sl. 1. Kompenzacija neaktivne snage potrošača u trofaznom četvorožičnom sistemu primjenom šest kondenzatora [3].

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za naučnotehnoški razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske u okviru projekta Poboljšanje pokazatelja kvaliteta električne energije industrijskih potrošača.

Tri kondenzatora vezana u trougao mogu se transfigurisati u zvijezdu, ali kako potencijal dobijenog izolovanog zvjezdišta u opštem slučaju nije jednak potencijalu neutralnog provodnika, broj kondenzatora se ne može redukovati [3]. Kapacitivnosti kondenzatora prikazanih na Sl. 1 se određuju minimizacijom funkcionala [3]:

$$J_c = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 + i_n^2) dt, \quad (1)$$

koji je proporcionalan gubicima aktivne snage napojnog voda, gdje su i_a , i_b i i_c struje faznih provodnika, dok je i_n struja neutralnog provodnika napojnog voda (Sl. 1).

Kapacitivnosti su date izrazom [3]:

$$\begin{bmatrix} C_{an} & C_{bn} & C_{cn} & C_{ab} & C_{bc} & C_{ca} \end{bmatrix}^T = -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{g} = -\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdje su [3]:

$$\mathbf{B}_{11} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \begin{bmatrix} 2(Du_{an})^2 & Du_{an}Du_{bn} & Du_{an}Du_{cn} \\ Du_{an}Du_{bn} & 2(Du_{bn})^2 & Du_{bn}Du_{cn} \\ Du_{an}Du_{cn} & Du_{bn}Du_{cn} & 2(Du_{cn})^2 \end{bmatrix} dt, \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_{12} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \begin{bmatrix} Du_{an}Du_{ab} & 0 & -Du_{an}Du_{ca} \\ -Du_{bn}Du_{ab} & Du_{bn}Du_{bc} & 0 \\ 0 & -Du_{cn}Du_{bc} & Du_{cn}Du_{ca} \end{bmatrix} dt, \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_{22} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \begin{bmatrix} 2(Du_{ab})^2 & -Du_{ab}Du_{bc} & -Du_{ab}Du_{ca} \\ -Du_{ab}Du_{bc} & 2(Du_{bc})^2 & -Du_{bc}Du_{ca} \\ -Du_{ab}Du_{ca} & -Du_{bc}Du_{ca} & 2(Du_{ca})^2 \end{bmatrix} dt, \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_{21} = \mathbf{B}_{12}^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{g}_1 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \begin{bmatrix} (i_{pa} - i_{pn}) Du_{an} \\ (i_{pb} - i_{pn}) Du_{bn} \\ (i_{pc} - i_{pn}) Du_{cn} \end{bmatrix} dt, \quad (7)$$

$$\mathbf{g}_2 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \begin{bmatrix} (i_{pa} - i_{pb}) Du_{ab} \\ (i_{pb} - i_{pc}) Du_{bc} \\ (i_{pc} - i_{pa}) Du_{ca} \end{bmatrix} dt, \quad (8)$$

dok je $D = d/dt$ operator diferenciranja po vremenu.

U mnogim praktičnim slučajevima, minimizacija funkcionala (1) se postiže sa manje od šest kondenzatora. To su slučajevi u kojima se primjenom (1)–(8) dobijaju negativne vrijednosti nekih kapacitivnosti i slučajevi u kojima je rang matrice $\mathbf{B}$ manji od šest [3]. Na primjer ako se u (2) izostave kondenzatori vezani između faznih provodnika (C_{ab} , C_{bc} , C_{ca}), izraz (2) se svodi na:

$$\begin{bmatrix} C_{an} & C_{bn} & C_{cn} \end{bmatrix}^T = -\mathbf{B}_{11}^{-1} \mathbf{g}_1. \quad (9)$$

B. Kompenzacija neaktivne snage primjenom pasivnih filtara

Impedansa kondenzatora opada sa povećanjem učestanosti, tako da iako baterije kondenzatora ne generišu više harmonike struje, one mogu povećati harmonijsko izobličenje struje napojnog voda. Da bi se eliminisali viši harmonici struje napojnog voda, svaki od kondenzatora na Sl. 1 se mijenja pasivnim filtrom koji ima istu vrijednost ekvivalentne kapacitivnosti. U opštem slučaju, pasivni filter se sastoji od n_g paralelno vezanih RLC grana (Sl. 2). Podešavanjem rezonantne učestanosti i -te grane [6]:

$$\omega_{ri} = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}, \quad i = \overline{1, n_g}, \quad (10)$$

gdje su C_i i L_i kapacitivnost i induktivnost i -te grane, moguće je eliminisati jedan viši harmonik struje napojnog voda. U praksi se rezonantna učestanost (10) bira tako da bude nešto manja (oko 95 %) od učestanosti harmonika koji se želi eliminisati, da bi se na taj način izbjegle velike vrijednosti struje u samim filtrima [6]. Kako bi se dodatno ograničila struja filtra, dodaje se i otpornik otpornosti R_i na red sa C_i i L_i , čija se vrijednost bira na osnovu faktora dobrote i -te RLC grane [6]:

$$Q_i = \frac{\omega_{ri} L_i}{R_i}, \quad i = \overline{1, n_g}. \quad (11)$$

Polazeći od izraza za admitansu i -te grane na učestanosti osnovnog harmonika:

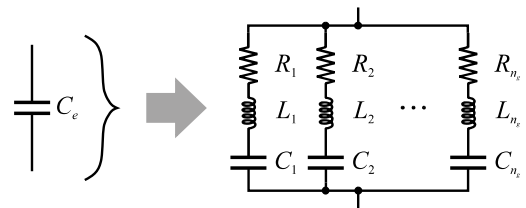
$$Y_i(\omega_1) = \frac{1}{R_i + j\omega_1 L_i + \frac{1}{j\omega_1 C_i}}, \quad i = \overline{1, n_g}, \quad (12)$$

postavlja se uslov da ekvivalentna susceptansa paralelne veze n_g grana, kojima se mijenja jedan kondenzator na Sl. 1, bude jednaka susceptansi tog kondenzatora na osnovnoj učestanosti:

$$C_e = \frac{\text{Im} \left\{ \sum_{i=1}^{n_g} Y_i(\omega_1) \right\}}{\omega_1} = \sum_{i=1}^{n_g} \frac{C_i (1 - \omega_1^2 L_i C_i)}{(\omega_1 R_i C_i)^2 + (1 - \omega_1^2 L_i C_i)^2}. \quad (13)$$

Izborom vrijednosti za ω_{ri} i Q_i nije jednoznačno određen način preraspodjele kapacitivnosti na pojedine grane. Jedan od načina da se jednoznačno odrede kapacitivnosti pojedinih grana filtra je da se definiše dodatni uslov da otpornosti i faktori dobrote budu jednaki za sve grane:

$$R_i = R_j, Q_i = Q_j \Rightarrow \frac{\omega_{ri} L_i}{Q_i} = \frac{\omega_{rj} L_j}{Q_j}, \quad i, j = \overline{1, n_g}, \quad i \neq j, \quad (14)$$



Sl. 2. Zamjena kondenzatora pasivnim filtrom sa n_g RLC grana.

odakle se dobija jednakost:

$$\omega_{ri} C_i = \omega_{rj} C_j, i, j = \overline{1, n_g}, i \neq j. \quad (15)$$

Primjenom (10)–(15), dobija se kapacitivnost i -te grane:

$$C_i = \frac{C_e}{\sum_{j=1}^{n_g} \frac{\frac{\omega_{ri}}{\omega_{rj}} \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{rj}^2}\right)}{\left(\frac{1}{Q} \frac{\omega_1}{\omega_{rj}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{rj}^2}\right)^2}}. \quad (16)$$

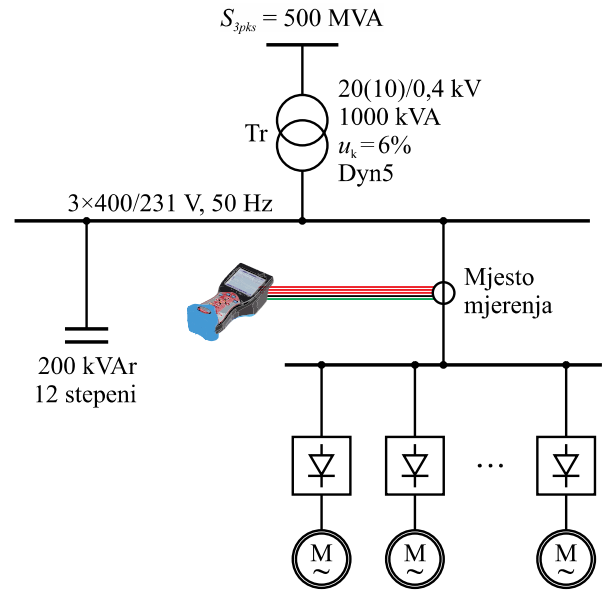
Nakon što se kapacitivnost i -te grane izračuna iz (16), induktivnost L_i se računa iz (10) za usvojenu vrijednost rezonantne učestanosti ω_{ri} , dok se otpornost R_i određuje iz (11) za usvojenu vrijednost faktora dobrote Q .

III. REZULTATI

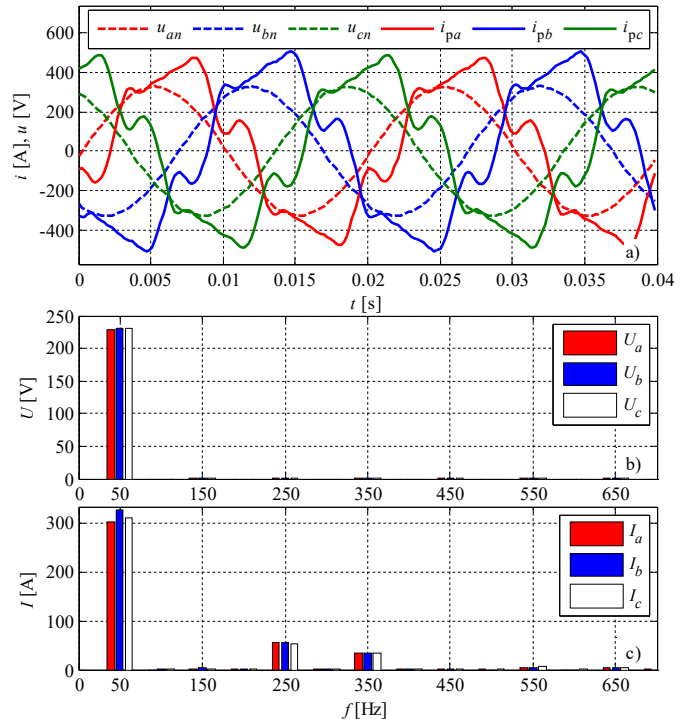
U ovoj glavi će biti prikazani rezultati računarske simulacije sistema za kompenzaciju neaktivne snage jednog industrijskog postrojenja u Banjaalučkoj pivari. Uprošćena šema razmatranog postrojenja je prikazana na Sl. 3. Postrojenje sadrži veliki broj regulisanih elektromotornih pogona sa energetske pretvaračima, što ima za posljedicu veliku vrijednost harmonijskog izobličenja struje napojnog voda. U postrojenju je izvršena kompenzacija reaktivne snage pomoću klasične baterije kondenzatora, kojom se popravljaju faktor snage, ali ne smanjuje harmonijsko izobličenje struje. Rezultati prikazani u ovoj glavi ilustruju mogućnost zamjene klasične kondenzatorske baterije pasivnim filtrom kojim se istovremeno popravljaju faktor snage i smanjuje harmonijsko izobličenje struje.

A. Analiza talasnih oblika napona i struje potrošača

Talasni oblici napona i struja za nominalni radni režim industrijskog potrošača su izmjereni pomoću mjernog instrumenta Metrel® PowerQ4 MI 2592 i prikazani su na Sl. 4a. Iz harmonijskog spektra napona na potrošaču (Sl. 4b) se vidi da napon ne sadrži značajan postotak viših harmonika ($THD_U \approx 1\%$), ali da su u spektru struje (Sl. 4c), pored osnovnog, izraženi peti i sedmi harmonik. Prisustvo petog i sedmog harmonika u spektru struje je posljedica šestpulsnih ispravljača kojima se napajaju pretvarači regulisanih elektromotornih pogona. U Tabeli I su navedene efektivne vrijednosti harmonijskih komponenti struje potrošača, kao i vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja, koje iznosi $THD_I \approx 20\%$, što je mnogo veće u odnosu na preporuke koje daje standard [2]. Rezultati mjerenja u Tabeli I ukazuju i na blagu nesimetriju u faznim strujama na učestanosti osnovnog harmonika, što je posljedica postojanja jednofaznih potrošača u postrojenju. Na osnovu sprovedene analize postojećeg stanja, može se zaključiti da se eliminacijom petog i sedmog harmonika struje, može značajno smanjiti THD_I . Stoga je opravdano razmotriti mogućnost zamjene kondenzatorske baterije pasivnim filterima sa dvije paralelne RLC grane ($n_g = 2$) čije rezonantne učestanosti treba podesiti tako da se ponište peti i sedmi harmonik struje potrošača.



Sl. 3. Uprošćena šema industrijskog postrojenja u Banjaalučkoj pivari.



Sl. 4. Naponi i struje potrošača: a) talasni oblici, b) harmonijski spektar napona, c) harmonijski spektar struje.

TABELA I. PODACI O HARMONIJSKOM SASTAVU STRUJE POTROŠAČA

Fazne struje	Harmonici							THD_I [%]
	1	3	5	7	9	11	13	
I_a [A]	302,9	2,7	55,5	33,4	0,4	5,4	4,0	21,08
I_b [A]	325,5	3,6	54,3	33,8	2,1	4,2	4,3	19,47
I_c [A]	309,5	2,2	54,1	33,6	0,6	5,5	4,2	20,35

B. Analiza talasnih oblika struje sa pasivnim filtrom

Na osnovu izložene procedure, opisane u drugoj glavi, projektovan je pasivni filter sa dvije grane u cilju eliminacije petog i sedmog harmonika struje potrošača. Korišćenjem izraza (1)–(8), za razmatrane talasne oblike struja prikazane na Sl. 4a, dobijene su negativne vrijednosti kapacitivnosti C_{ab} , C_{bc} i C_{ca} , tako da je broj kondenzatora redukovan sa šest na tri. Usvojeno je rješenje sa tri kondenzatora (C_{an} , C_{bn} i C_{cn}) u sprezi zvijezda, čije su kapacitivnosti izračunate pomoću (9). Raspodjela ovih kapacitivnosti po granama filtra izvršena je prema (16) usvajajući vrijednost faktora dobrote $Q = 100$ [6]. Rezonantne učestanosti pojedinih grana filtra u proračunu su podešene na 97 % učestanosti petog i sedmog harmonika. Induktivnosti pojedinih grana filtra izračunate su iz (10), dok su otpornosti izračunate iz (11). Parametri grana pasivnih filtera za sve tri faze su dati u Tabeli II. Razlike u vrijednostima parametara filtra po fazama su posljedica blage nesimetrije u faznim strujama potrošača (Tabela I).

Na Sl. 5a prikazani su talasni oblici napona i struje kompenzovanog potrošača dobijeni računarskim simulacijama, gdje se vidi da su struje gotovo sinusne i u fazi sa naponom. Iz harmonijskog spektra napona na potrošaču (Sl. 5b) se vidi da napon ni u ovom slučaju nije izobličen ($THD_U \approx 1\%$). Nakon ugradnje pasivnog filtra značajno su umanjene efektivne vrijednosti petog i sedmog harmonika struje napojnog voda, što se vidi iz harmonijskog spektra prikazanog na Sl. 5c. U Tabeli III su navedene efektivne vrijednosti harmonijskih komponenti struje kompenzovanog potrošača, kao i vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja, koje nakon kompenzacije iznosi $THD_I \approx 2,5\%$. Dobijena vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja struje je u skladu sa preporukama standarda [2].

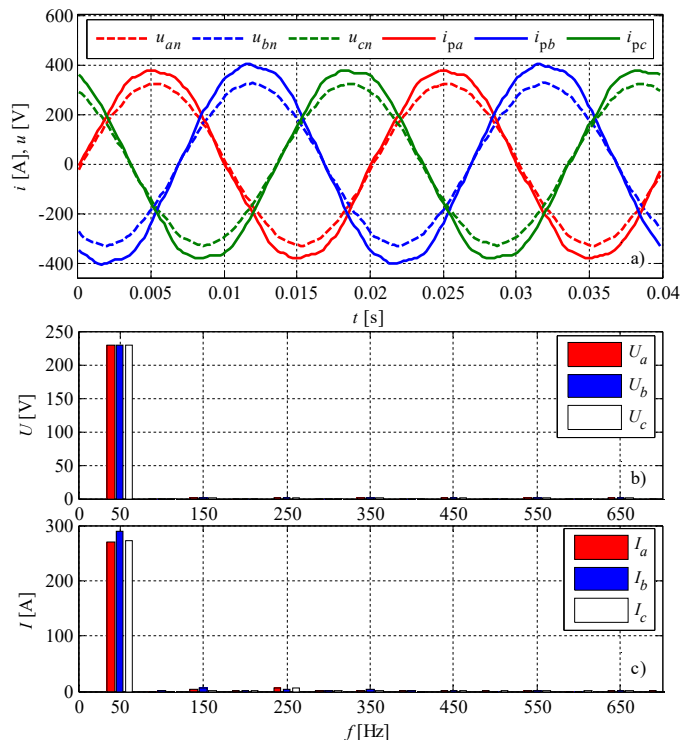
U Tabeli IV izvršeno je poređenje vrijednosti harmonijskog izobličenja struje, faktora snage i aktivne snage industrijskog potrošača prije i nakon ugradnje pasivnog filtra. Iz Tabele IV se vidi da se ugradnjom pasivnog filtra sa parametrima datim u Tabeli II istovremeno popravlja faktor snage i smanjuje harmonijsko izobličenje struje. Povećanje aktivne snage industrijskog potrošača usljed gubitaka u filtru je manje od 0,5 % ukupne aktivne snage potrošača prije kompenzacije.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je izvršen proračun pasivnog filtra za kompenzaciju neaktivne snage i eliminaciju viših harmonika struje jednog industrijskog postrojenja u Banjalučkoj pivari. Simulacije projektovanog sistema pokazuju da se ugradnjom pasivnih filtera može postići faktor snage 0,9987 uz istovremeno smanjenje ukupnog harmonijskog izobličenja struje sa 20 % na 2,5 %. Iako je u radu izvršen proračun filtra za samo jedan radni režim, isti postupak se može koristiti i za promjenljivo opterećenje. U tom slučaju, pasivni filter bi trebalo projektovati za različita opterećenja u više diskretnih stepeni primjenom izloženog postupka.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju kompaniji *Banjalučka pivara A.D. Banja Luka*, na pruženoj stručnoj i tehničkoj podršci pri izradi ovog rada.



Sl. 5. Naponi i struje napojnog voda nakon kompenzacije neaktivne snage potrošača pasivnim filtrom: a) talasni oblici, b) harmonijski spektar napona, c) harmonijski spektar struje.

TABELA II. PARAMETRI PASIVNIH FILTERA

Faze	Prva grana			Druga grana		
	R_1 [mΩ]	L_1 [μH]	C_1 [mF]	R_2 [mΩ]	L_2 [μH]	C_2 [mF]
a	5,9	381,8	1,1	5,9	275,5	0,8
b	5,5	358,7	1,2	5,5	258,8	0,8
c	5,9	383,1	1,1	5,9	276,5	0,8

TABELA III. PODACI O HARMONIJSKOM SASTAVU STRUJE NAPOJNOG VODA NAKON UGRADNJE PASIVNOG FILTERA

Fazne struje	Harmonici							THD_I [%]
	1	3	5	7	9	11	13	
I_a [A]	270,9	3,3	6,4	1,4	0,1	1,8	1,9	2,87
I_b [A]	288,6	4,9	4,0	2,8	0,7	1,0	1,9	2,53
I_c [A]	272,5	1,1	5,4	2,1	0,2	1,9	2,1	2,41

TABELA IV. UKUPNO HARMONIJSKO IZOBLIČENJE STRUJE, FAKTOR SNAGE I AKTIVNA SNAGA INDUSTRIJSKOG POSTROJENJA

	Prije kompenzacije	Nakon kompenzacije
THD_I [%]	20	2,5
PF	0,8628	0,9987
P [kW]	190,1	190,6

LITERATURA

- [1] IEEE Guide for the Application of Shunt Power Capacitors," in *IEEE Std 1036-2010 (Revision of IEEE Std 1036-1992)*, pp.1-88, 17 Jan. 2011.
- [2] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pp.1-29, 11 June 2014.
- [3] T.B. Šekara, J.Č. Mikulović and Ž.R. Đurišić, "Optimal Reactive Compensators in Power Systems Under Asymmetrical and Nonsinusoidal Conditions," in *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 974-984, Apr. 2008.
- [4] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez and R. Domke, "Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144-2164, Dec. 2005.
- [5] J.C. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, John Wiley & Sons, 2015.
- [6] J. C. Das, "Passive filters - potentialities and limitations," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 232-241, Jan.-Feb. 2004.
- [7] A. B. Nassif, W. Xu and W. Freitas, "An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications," in *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1710-1718, July 2009.
- [8] B. Badrzadeh, K. S. Smith and R. C. Wilson, "Designing Passive Harmonic Filters for an Aluminum Smelting Plant," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 2, pp. 973-983, March-April 2011.
- [9] D. A. Gonzalez and J. C. McCall, "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems," in *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-23, no. 3, pp. 504-511, May 1987.

ABSTRACT

The use of power converters in modern industrial plants results in increased voltage and current harmonic distortion. Distortion of voltages and currents should be accounted for by using a new approach based on non-active power compensation. In this paper the waveforms of load currents for a particular industrial consumer are analyzed and a passive power compensator is designed using a procedure based on minimization of active power losses in the main supply line. The performance of the proposed solution is verified by computer simulations using recorded current and voltage waveforms from the real plant as inputs.

PASSIVE COMPENSATION OF NON-ACTIVE POWER FOR INDUSTRIAL CONSUMERS

Predrag Mršić, Nemanja Kitić, Bojan Erceg, Đorđe Lekić,
Čedomir Zeljković, Petar Matić

Коришћење TRNSYS софтвера као алата у димензионисању и оптимизацији система за соларно загријавање топле потрошне воде

Диана Богдан^{1,2,3}, Петар Гверо², Милован Котур³

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

²Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, Бања Лука, Република Српска

³Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, Бања Лука, Република Српска

trrs.diana@gmail.com, petar.gvero@mf.unibl.org, milovan.kotur@mf.unibl.org

Сажетак— TRNSYS је савремени и прихваћени алат који се користи у пројектовању, димензионисању и оптимизацији сложених система за снабдијевање енергијом зграда. За очекивати је да соларни системи са загријавање топле потрошне воде у будућности играју велику улогу и у нашем региону, имајући у виду тенденцију пораста цијене електричне енергије као енергента који се тренутно највише користи у те сврхе. Овај рад анализира систем са соларно загријавање топле потрошне воде у једном конкретном и великом систему који има континуирану и значајну потребу за топлим потрошном водом. На примјеру ЈУ „Дом за лица са инвалидитетом“ у Приједору помоћу TRNSYS алата анализирано је неколико сценарија соларних система за снабдијевање топлим потрошном водом објекта и одабрано трошковно-оптимално рјешење које је детаљно представљено у овом раду.

Кључне ријечи—TRNSYS; соларни системи; топла потрошна вода; трошковно-оптимално рјешење;

I. УВОД

Енергија је разлог због којег велики број научника усмјерава своја истраживања са мотивом да је сачува и искористи на оптималан начин. Посљедњих неколико година расте удио обновљивих извора енергије у укупној светској производњи енергије, посебно у сектору електричне енергије. Међутим, обновљиви извори енергије још увијек чине око 10% од свјетске финалне потрошње енергије [1], док су фосилна горива доминантна у енергетском сектору. Бројни су начини искоришћавања обновљивих извора енергије. Соларни колектори и системи за складиштење топлотне енергије примјери су коришћења обновљивих извора енергије у топлотне сврхе. У том контексту, анализирају се концепти аутономних техничких система заснованих на коришћењу енергије сунца. Један од примјера система у којима се врши конверзија соларне енергије у топлотну, је соларни систем за снабдијевање топлим потрошном водом SHWS (енг. Solar Water Heating System). Највећи проблем при искоришћавању енергије сунчевог зрачења је

осцилацијска природа извора енергије. Моделирање соларног система који ће бити ефикасан у датим условима окружења и симулација параметара таквог система помоћу рачунарских софтвера један је од начина за анализу, и постизање оптималног дизајна његових компонената. Софтвер TRNSYS (енглески акроним за TRaNsient System Simulation) одабран је као алат за симулацију соларних система. Многа истраживања потврдила су да је разлика између експерименталних резултата и резултата добијених симулацијом параметара соларног система помоћу TRNSYS-а мања од 10 % [2].

II. ИСТОРИЈА СИМУЛАЦИЈА СОЛАРНИХ СИСТЕМА ПОМОЋУ TRNSYS СОФТВЕРА

Соларни системи за загријавање топле потрошне воде захтијевају адекватно димензионисање компоненти система као и тачно предвиђање испоручене корисне енергије и температуре воде на излазу. Оптимизација параметара важан је сегмент за постизање одговарајућих перформанси соларних система и предмет је теоријског и експерименталног проучавања током протеклих неколико деценија. TRNSYS је програмски пакет за симулацију система који је дизајнирао Duffy Beckman 1935.године. Почетне студије које су користиле TRNSYS, углавном су оптимизирале различите параметре TSHW (енгл. Thermosyphon Solar Water Heating). Нпр., Morisson и Braun (1985) проучавали су ефекте примјене хоризонталних и вертикалних акумулатора топлоте и просјечну соларну фракцију, Shariha и Ecevit (1995) анализирали су утицаје промјена температура воде спремне за употребу у TSHW са помоћним електричним гријачем као додатним извором енергије. Kaligorou и Papamarcou (2000) упоређивали су резултате TRNSYS симулација са експерименталним вриједностима. Такође, TRNSYS је коришћен за анализу соларних система са принудном циркулацијом. Buckles и Klein (1980), и Michaelis и Wilson (1996), оптимизирали су критеријуме активног SHWS-а [3]. У овом раду коришћен

је TRNSYS 18 који су креирали су стручњаци *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison*.

III. TRNSYS АПЛИКАЦИЈЕ

TRNSYS је комплетно и флексибилно симулацијско окружење за пролазну симулацију система укључујући и вишезонске зграде. Теоријска основа TRNSYS-а је моделирање појединачних компоненти енергетског система као индивидуалних црних кутија. За математичко моделирање соларних система у TRNSYS-у углавном се користе програмски језици FORTRAN, C/C++ и JAVA. TRNSYS апликације укључују [4]:

- Системе обновљивих извора енергије као што су соларни модули за производњу електричне енергије PV (енгл. *Photo Voltaic*).
- Соларни топлотни системи за гријање и хлађење: HVAC (енгл. *Heating Ventilation and Cooling*) и SHWS.
- Нискоенергетске зграде и HVAC са напредним дизајнерским карактеристикама за примјену у архитектури (природна и принудна вентилација, загријавање и хлађење плоча, дупла фасада, итд.).
- Когенерацију и гориве ћелије.
- Све што захтијева динамичку симулацију.

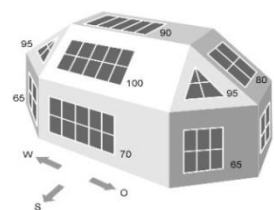
IV. SHWS

Димензионисање SHWS-а, зависно од намјене, захтијева што прецизнији прорачун енергетских потреба за гријањем, хлађењем или тачне податке о потрошњи санитарне топле воде. Ове податке најбоље је одредити мјерењем потрошње у дужем временском периоду. Међутим, због скупе мјерне опреме и немогућности одређивања вриједности параметара система у сваком тренутку, посебно за соларне системе који раде у режиму 24 сата, овакава мјерења су ограничена. У соларним системима може доћи до појаве стагнације система. Ова појава настаје због престанка напајања електричном енергијом или непостојања топлотног понора, односно акумулатора топлоте који би примио сву количину топлоте коју производи колектору који је стално изложен сунчевом зрачењу. Последице стагнације су максимална температура у колектору која узрокује кључање радног флуида, генерисање паре и раст притиска у систему. Негативан утицај на радни флуид у колектору јавља се код температура $t > 180^{\circ}\text{C}$ [5]. Да би се ове појаве избјегле димензионисање соларних система увијек се врши према индикаторима потрошње у лјетном периоду. Годишњи или мјесечни соларни степен покривања система је бољи индикатор перформанси система у односу на друге индикаторе као што су ефикасност колектора η , фактор преноса топлоте са колектора на флуид F_R и фактор

израде колектора F' . Соларни степен покривања система рачуна се према једначини [5]:

$$f = \frac{Q_{Load} - Q_{Auxiliary}}{Q_{Load}}. \quad (1)$$

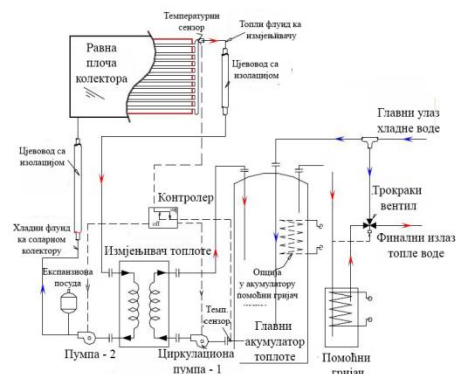
Приликом пројектовања соларних система тежи се да соларни степен покривања система буде 100%. Највеће соларне добитке даје колектор који је постављен на коси кров са јужне стране објекта. Колектори на источној или западној страни објекта постижу соларни степен покривања око 80%, а колектори постављени на фасаду објекта око 60% соларног степена покривања система [35]. На слици 4 представљен је процентуални соларни степен покривања система у зависности од положаја поља колектора према странама свијета.



Сл.1. Соларни степен покривања система у зависности од положаја колекторског поља [6]

V. TRNSYS СИМУЛАЦИЈЕ СОЛАРНИХ СИСТЕМА

Предвиђање понашања соларног система, прије него што је инсталисан, врши се на математичким и физичким моделима система. Математички модели у програмским пакетима представљени су једном или више алгебарских, трансцендентних и диференцијалних једначина. Реалан систем идеализован је и замијењен апстрактним математичким моделом. Шема SHWS-а који је моделиран у TRNSYS-у приказана је на слици 2.



Сл.2. Шема SHWS-а са индиректном циркулацијом моделиран у TRNSYS-у [7]

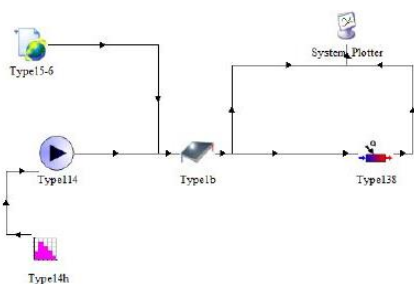
A. Модел постојећег система система за снабдијевање топлотом потрошном водом и TRNSYS модели соларних система за снабдијевање топлотом потрошном водом

На примјеру ЈУ “Дом за лица са инвалидитетом“ у Приједору анализирају се различити сценарији TRNSYS соларних система за снабдијевање топлотом потрошном водом објекта:

- Сценарио 0 – постојеће стање система за снабдијевање топлотом потрошном водом у Дому за лица са инвалидитетом базиран искључиво на електричним бојлерима. У објекту борави 180 корисника 24 часа. Годишња потрошња електричне енергије за загријавање воде је 140160 kWh.
- Сценарио 1 – TRNSYS модел соларног система са помоћним гријачем.
- Сценарио 2 - TRNSYS модел SHWS-а са акумулатором топлоте и електричним гријачем као додатним извором енергије.
- Сценарио 3 - TRNSYS модел SHWS-а са акумулатором топлоте и котлом као додатним извором енергије.

B. Симулације TRNSYS модела соларних система за снабдијевање топлотом потрошном водом

SHWS - Сценарио 1 је TRNSYS модел са електричним гријачем и представљен је на слици 3. Компоненте система су: колектор, пумпа, електрични гријач, компонента са метеоролошким подацима, штампачи дневних и укупних резултата симулација. Задатак система је да обезбједи константну температуру радног флуида у колекторском пољу од 60°C. Параметар оптимизације SHWS - Сценарио 1 је површина колектора AColl. Симулације соларног система изводе се за AColl (4, 8, 16, 32, 64 m²). у периоду од 01.јануара до 31. децембра, и у периоду од 15. априла до 15.октобра.

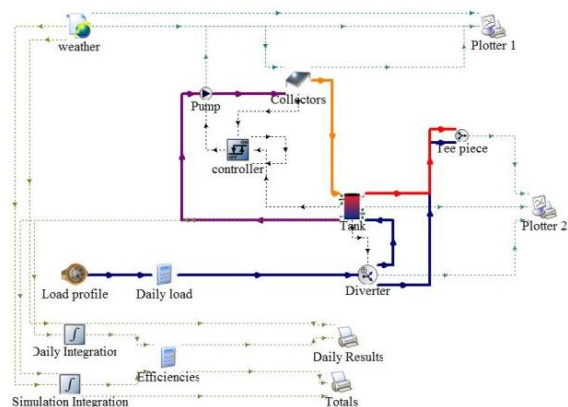


Сл.3. TRNSYS модел SHWS- Сценарио 1[4]

Изази SHWS-а су количина топлоте коју произведе колектор дате површине и потребна додатна количина

топлоте електричног гријача непоходна за одржавање константне температуре воде од 60°C.

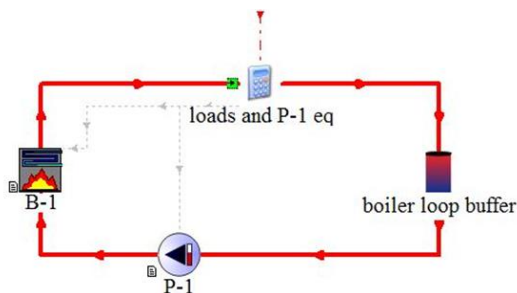
SHWS - Сценарио 2 је TRNSYS модел SHWS-а са акумулатором топлоте у који је интегрисан електрични гријач за подршку систему у вријеме смањеног сунчевог зрачења. Задатак система приказаног на слици 4 је да обезбједи дневну количину санитарне топле потрошне воде за потребе корисника у објекту. Први сет симулација SHWS-Сценарио 2 изводи се за AColl=32 m² и AColl=64 m², и дневном потрошњом санитарне топле воде од 4000 литара и период симулације од годину дана. Други сет симулација односи се на AColl (40, 42, 44, 48, 52, 56, 58, m²). Период симулације је 01.јули до 01.септембар током којег се очекује највећи соларни степен покривања система.



Сл.4. TRNSYS модел SHWS - Сценарио 2 [4]

Изази соларног система који се добију симулацијом параметара SHWS - Сценарио 2 су: мјесечне вриједности соларног степена покривања FSol, мјесечне вриједности ефикасности колектора EtaColl, корисна количина топлоте QUSEFUL, односно количина топлоте соларног флуида коју произведе колектор површине AColl за дневну потрошњу санитарне топле воде од 4000 и 5000 литара; потребна додатна количина топлоте електричног гријача QAUX непоходна за одржавање константне температуре од 60°C воде у акумулатору топлоте током смањеног сунчевог зрачења, количина акумулиране топлоте QSTORE и губици акумулатора топлоте QTANK

SHWS - Сценарио 3 је модел соларног система који за припрему топле потрошне воде користи два обновљива извора енергије: биомасу и енергију сучевог зрачења. SHWS - Сценарио 3 чини соларни система SHWS-Сценарио 2 и TRNSYS модел са котлом. Флуид у SHWS - Сценарио 3, топлотну енергију прима од колектора и електричног гријача. Током зимског периода искључује се учешће електричног гријача, а уводи се котао као додатни извор енергије Задатак котла је да током зимског периода надомјести количину топлоте коју је SHWS-Сценарио 2 предао електрични гријач система. TRNSYS модел сегмента SHWS - Сценарио 3 са котлом дат је на слици 5.



Сл.5. TRNSYS модел SHWS- Сценарио 3 са котлом[4]

VI. ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА SHWS-A

C. Анализа резултата симулације SHWS - Сценарио 1

Резултати за годишњи и лјетни период симулације SHWS - Сценарио 1 показали да са повећањем површине колектора расте и количина топлоте соларног флуида у колекторском пољу, а смањује се учешће електричног гријача што је и очекиван резултат. Међутим, модел SHWS - Сценарио 1 нема акумулатора топлоте, односно топлотног понора који би примио вишак акумулиране енергије, а произведена количина топлоте у колекторском пољу искључиво зависи од метеоролошких услова у посматраном периоду симулације. Модел SHWS - Сценарио 1 може се описати као соларни систем који није реалан.

D. Анализа резултата симулације SHWS - Сценарио 2

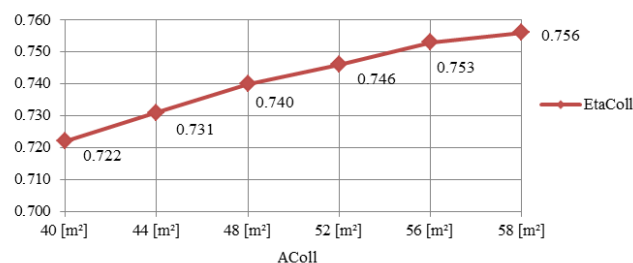
Параметри оптимизације SHWS - Сценарио 2 су површина колектора $AColl$, за усвојене дневну потрошњу топле воде од 4000. Анализа параметара симулације односи се на резултате симулације SHWS-Сценарио 2 у период симулације од годину дана уз просјечну годишњу температуру околине у којој се колектор налази од 15°C . Перформансе плочастог колектора (нагиб колектора, коефицијент прелаза топлоте и селективни премаз колектора, и специфична топлота гликола) су константне током симулације. Ефикасност колектора $EtaColl$ један је од индикатора према којем се могу одредити карактеристике соларног система. Резултати првог сета симулација SHWS-Сценарио 2 (усвојена је запремина акумулатора топлоте $VSTORAGE=2.5\text{ m}^3$) показали су да колектор $AColl=32\text{ m}^2$ има вриједност $EtaCol=0.695$, и $EtaCol=0.755$ за $AColl=64\text{ m}^2$ и дневну потрошњу топле воде од 4000 литара. Ефикасност колектора односи се само на једну компоненту соларног система. Соларни степен покривања система $FSol$ је бољи индикатор перформанси SHWS-а у односу на ефикасност колектора, јер се односи на систем у цјелини. Максимална вриједност соларног степена покривања је 1, и тежи се да соларни систем има вриједност $FSol$ што је могуће ближе максималној вриједности, јер се претпоставља да се на тај начин избегава појава стагнације система у вријеме

највећег сунчевог зрачења. Резултати симулације показали су да је просјечна вриједност $FSol=0.981$ за $AColl=32\text{ m}^2$ и дневну потрошњу топле воде 4000 литара, а просјечна вриједност $FSol=0.99$ за $AColl=64\text{ m}^2$ и дневну потрошњу топле воде 4000 литара. TRNSYS оптимизира вриједности запремине акумулатора $VSTORAGE$ тако да већим вриједностима $AColl$ одговарају веће вриједности $VSTORAGE$. Резултат анализе губитака $QTANKLOSS$ два акумулатора топлоте ($VSTORAGE=1.92\text{ m}^3$; $AColl=32\text{ m}^2$ и $VSTORAGE=3.84\text{ m}^3$; $AColl=64\text{ m}^2$; дневна потрошња топле воде 4000 литара) показује да су за 37% већи укупни губици акумулатора топлоте запремине 3.84 m^3 у односу на укупне губитке акумулатора топлоте запремине 1.92 m^3 .

Претходна анализа првог сета симулација показале је:

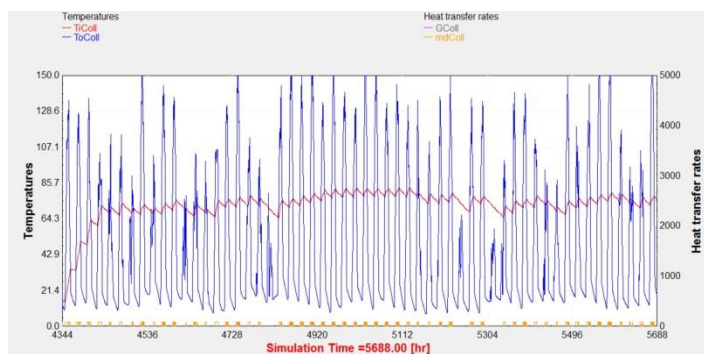
- да су блиске вриједности соларног степена покривања посматраних колектора, и да је да је колектор $AColl=32\text{ m}^2$ и дневном потрошњом воде од 4000 боље рјешење за SHWS - Сценарио 2, у односу на колектор $AColl=64\text{ m}^2$ за исту дневну потрошњу топле воде и
- да је за проналажење оптималне површине колектора и запремине акумулатора топлоте SHWS - Сценарио 2 потребан и други сет симулација у интервалу $AColl (32 - 64\text{ m}^2)$.

Други сет симулација односи се на површине колектора у интервалу $AColl (32 - 64\text{ m}^2)$, дневном потрошњом топле воде од 4000 литара у периоду симулације од 01. јула до 01. септембра када се очекује највећи соларни степен покривања система. Резултати симулације у периоду од 01. јуна до 01. септембра графички су представљени на слици 6. Колектори $AColl (40, 44, 48, 52, 56, 58\text{ m}^2)$ имају блиске просјечне мјесечне вриједности ефикасности колектора за дневну потрошњу топле воде 4000 литара.



Сл. 6. Ефикасност колектора SHWS-Сценарио 2 за дневну потрошњу топле воде од 4000 литара

Соларни степен покривања $FSol=1$ има колектор $AColl=40\text{ m}^2$, запремина акумулатора топлоте SHWS - Сценарио 2 $VSTORAGE=2.5\text{ m}^3$ и дневна потрошња топле воде од 4000 литара у периоду симулације од 01. јуна до 01. септембра. Графички приказ резултата симулације у периоду јули и август за $AColl=40\text{ m}^2$ дат је на слици 7.

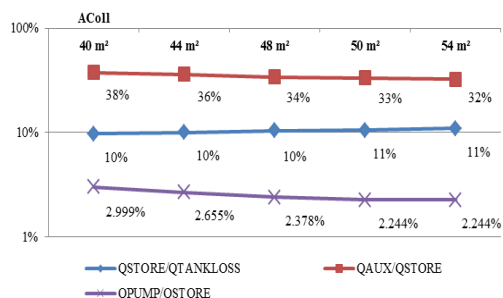


Сл. 7. Дијаграм промјене улазних и излазних температура, и протока SHWS-Сценарио 2, AColl=40 m² и дневну потрошњу топле воде од 4000 литара

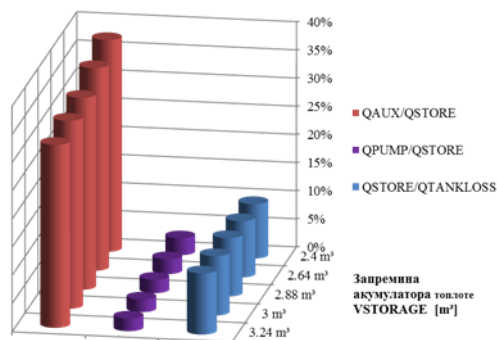
Међутим, да би се пронашло оптимално рјешење за површину колектора и дневну потрошњу воде од 4000 литара потребно је пронаћи минималну површину колектора која ће обезбједити поуздан систем и минималну потрошњу енергије. Према томе, за даљу анализу, у циљу селекције најповољније површине колектора SHWS-Сценарио2, уводе се нови критеријуми:

- QAUX /QSTORE; однос додатне количине топлоте електричног гријача и акумулиране топлоте у акумулатору топлоте.
- QSTORE/ QTANKLOSS; однос акумулиране количине топлоте и топлотних губитака акумулатора топлоте.
- QPUMP/QSTORE; однос количине топлоте за рад пумпе и акумулиране топлоте у акумулатору топлоте.

Према графиконима приказаним на сликама 8 и 9. може се уочити да са повећањем и површине колектора и запремине акумулатора топлоте опада процентуално учешће количина топлоте електричног гријача QAUX и пумпе QPUMP у акумулираној топлоти QSTORE. Удио губитака акумулатора топлоте QTANKLOSS у акумулираној топлоти QSTORE акумулатора топлоте је константан у интервалу површина колектора (40 – 48 m²), након чега расте са повећањем површине колектора. Према томе, колектор AColl= 48 m² може се посматрати као гранична површина до које би се могла вршити селекција најповољније површине колектора.



Сл.8. Међусобни односи количина топлоте SHWS-Сценарио 2 за дневну потрошњу топле воде од 5000 литара



Сл. 9. Међусобни односи количина топлоте SHWS-Сценарио 2 за оптималне запремине акумулатора топлоте

Задатак SHWS- Сценарио 2 је да за дату површину колектора обезбједи потребне дневне количине топле воде, уз што мање учешће електричног гријача. Према резултатаима симулације у интервалу површина колектора (40 – 48 m²), најмању вриједност додатне количине топлоте електричног гријача има колектор AColl=40 m².

На основу претходне анализе SHWS- Сценарио 2 оптимална је површина колектора 40 m². За ту вриједност површине колектора и дневну потрошњу топле воде 4000 литара, постигнут је степен соларног покривања FSol=1. Колектору AColl=40 m² TRNSYS додјељује оптималну запремину акумулатора топлоте VSTORAGE=2,4 m³. Усваја се оптимална запремина акумулатора топлоте 2,5 m³.

Изаз TRNSYS симулације SHWS - Сценарио 3 су вриједности фактора PLR (енгл. *Part Load Ratio*) од којег зависи расположиви капацитет котла qRtdBoiler. Ако се узме да је PLR=1, расположиви капацитет котла је 100 % од називног капацитета (количина топлоте која се уноси у флуид). Ако је PLR=0,75 контролни сигнал је 0,6262, односно qRtdBoiler испуњава 62,62% од називног капацитета. количина топлоте електричног гријача у зимском периоду У том периоду искључује се електрични гријач SHWS- Сценарио 2, а додатну количину топлоте количине топлоте обезбјеђује котла. Ефекти те промјене анализирају се у економској анализи.

VII. АНАЛИЗА ЕМИСИЈА УГЉЕН-ДИОКСИДА

Анализа емисија угљен-диоксида (CO₂) за постојећи конвенционални систем, SHWS - Сценарио 2 и SHWS - Сценарио 3 односи се на одређивање: индиректних емисија CO₂ постојећег конвенционалног система насталих као последица коришћења електричне енергије за припрему топле потрошне воде и директних емисија насталих услед коришћења пелета као допунског извора енергије у SHWS - Сценарио 3.

На основу резултата проведене анализе емисија CO₂ може се закључити да су годишње индиректне емисије CO₂ постојећег конвенционалног система за загријавање санитарне воде који је базиран искључиво на коришћењу

електричне енергије око 19 пута веће у односу на годишње директне емисије које настају коришћењем пелета у SHWS - Сценарио 3.

ABSTRACT

VIII. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА

Анализа трошкова SHWS-а за наведене сценарије показала је да се највеће уштеде током године постижу комбиновањем соларног система и котла на пелет. Примјеном SHWS- Сценарио 3 за загријавање потрошне воде трошкови се смањују за 64 % у односу на постојеће стање трошкова електричне енергије за припрему топле потрошне воде. Инвестиција у SHWS- Сценарио 3 ће се исплатити у току техничког и економског вијека трајања јер је период поврата инвестиције мањи од 3 године. Такође, пројекат инвестирања у SHWS- Сценарио 3 има позитивну нето садашњу вриједност и на тај начин је испуњен и услов профитабилности пројекта и оправдано је кренути у инвестицију.

IX. ЗАКЉУЧАК

Соларна енергија представља чист и обновљив извор енергије. Коришћење обновљивих извора енергије и улагање у савремене технологије, омогућава сигурно и одрживо снабдијевање енергијом. Циљ овог рада је дефинисање трошковно-оптималног рјешења SHWS-а које ће одговарати капацитету система за снабдијевање топлом потрошном водом у објекту. TRNSYS софтвер одабран је за моделирање оптималног SHWS-а, а на примјеру Дома за лица са инвалидитетом у Приједору. Аналитички и графички резултати TRNSYS симулације соларних система коришћени су као основа за техничку анализу предложених сценарија SHWS-а. Резултати су показали да је симулација SHWS-а помоћу TRNSYS софтвера моћан алат који пружа бројне могућности приликом селекције најповољнијег рјешења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.iea.org/topics/renewables>
- [2] R.L.Shristava, Kumar, V., & Utavale, S. (2016). Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. Preuzeto sa Elsevier, www.elsevier.com/locate/rser
- [3] -[7] Hobbi, A., & Siddiqui, K. (2008). Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. Elsevier. Preuzeto sa www.elsevier.com/locate/solener
- [4] TRNSYS18 (2017). Mathematical Reference, Volume 1,2,3,4,5,6,7 (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison and Thermal Energy System Specialists, LLC). Madison, United States of America. Preuzeto sa <http://sel.me.edu/trnsys>
- [5] Majdandžić, LJ (2010). Solarni sustavi. Zagreb: Graphis d.o.o
- [6] Upute za projektovanje. (2006, 8). Preuzeto sa www.viessmann.rs

TRNSYS is a modern and accepted software tool used in the design, sizing and optimization of complex building energy supply systems. It should be expected that solar hot water heating systems play a big role in our region in the future as well, given the tendency of increasing the price of electricity as currently the most used energy source for these purposes. This paper analyzes the solar hot water heating system in one concrete and large system that has a continuous and significant need for hot sanitary water. With the example of the Public Institution "Home for Persons with Disabilities" in Prijedor, several scenarios of solar systems for supplying hot water to the facility were analyzed using the TRNSYS tool and a cost-optimal solution was selected, which is presented in detail in this paper.

USING TRNSYS SOFTWARE AS A TOOL IN SIZING AND OPTIMIZING SOLAR HOT WATER SYSTEMS

Diana Bogdan, Petar Gvero, Milovan Kotur

Graphical user interface for self-commissioning of induction motor drive insuring high-efficiency of electrical vehicle

Renata Srblijanin, Roberto Varga, Neotech Ltd.,
Vladimir Popović, Darko Marčetić, Faculty of technical sciences Novi Sad,
Petar Matić, Faculty of electrical engineering Banja Luka

Abstract – This paper presents the graphical user interface (GUI) created to support self-commissioning procedure of unknown 48V battery driven three-phase induction motor for Golf Cart application. GUI application is created for PC, it has options to setup the self-commissioning procedure, to retrieve, display and off-line change the resulting motor and controller parameters. Finally, the application offers the option to write the parameters to the EEPROM of unknown induction motor drive and consequently to setup the drive control module and make it ready to perform robust and efficient control of induction motor. This application uses CAN Open interface to communicate with Nidec/Kinetek induction motor vector drive developed for the electrical vehicle application which has the STM32F303 microcontroller firmware version IFOC V1012 ATUN 1.09 or higher.

1. INTRODUCTION

Electrical vehicle application of digitally controlled drives is gaining momentum and it is attractive for many researchers. The focus is on performance and overall system efficiency. That is why vector control of three-phase induction motor is utilized, insuring good dynamic response and steady state performance.

Yet, the vector controlled drive has to be properly tuned in order to give the expected performance. Even more, with motors working on the edge of their safety operating area, in deep saturation (heavy torque start at low speeds) or deep field-weakening (high cruse speeds) the vector controller parameters are becoming even more important. Finally, with vehicle as dynamic system, the model based procedure have to be used for both development of Maximum Torque Per Ampere (MTPA) or for minimization of motor losses using Loss Model Control (LMC) [1]–[6]. That is why different procedures were developed for self-commissioning of unknown 48V battery driven three-phase induction motor and drive [7]. All of the relevant parameters are retrieved and available in the controller's memory.

In this paper, the GUI application developed to control and support the self-commissioning procedure [7] is described. When self-commissioning procedure is successfully finished, GUI is designed to retrieve the parameters from the controller memory to allow their inspection and editing. The GUI application is developed in C sharp using Visual studio 17 and 19 for Windows operating system. Some aspects of GUI application will be described in more details in the following chapters.

2. SETTING UP SELF-COMMISSIONING OF INDUCTION MOTOR

Autotuning procedure can be initialized, started and monitored via the Autotuning Command window, presented in Fig 1. This window is designed to allow the operator to setup some system parameters and voltage, current, speed limits for the autotuning procedure. At this point, operator has to know the voltage, current and speed range in which the motor has to be tested.

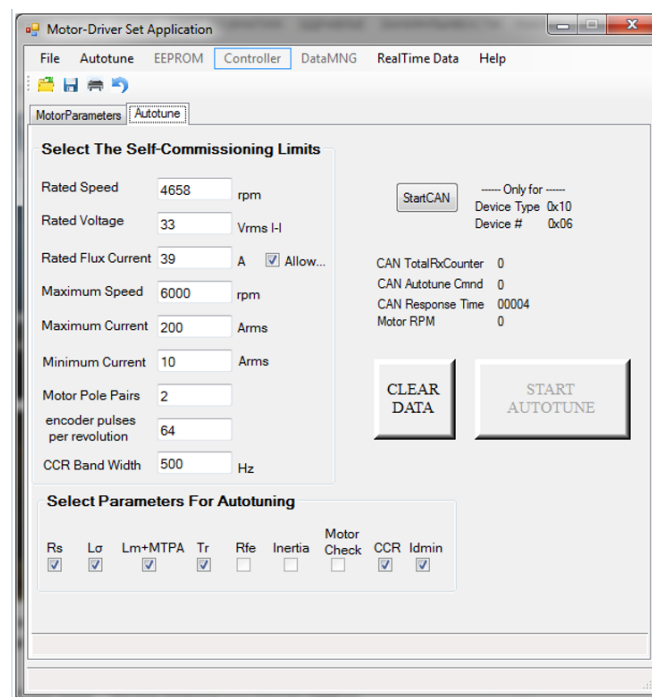


Fig. 1. Window for setting the limits and parameters for pending self-commissioning procedure

From the Fig. 1 the one can distinct three status/control groups:

1. First Group box named **Select Self-Commissioning Limits**: Contains Self-Commissioning advanced parameters for proper handling the overall estimation process. These include various limits (Maximum Current, Speed max, Minimum Current, speed rated, Minimum Voltage, number of encoder pulses per revolution, etc.) which must be set by the user before autotuning starts.
2. Second Group box named **Select Parameters For Autotuning**: Contains List of Parameters that can be selected for autotuning (stator resistance R_s , total leakage inductance L_σ , magnetizing and optimal characteristic L_m +MTPA, rotor time constant T_r , iron loss resistance

Rfe, mechanical Inertia, motor Check phase, current regulator tuning CCR). By checking/unchecking the Parameter box, the user can select/unselect the parameters, which are going to be estimated. Rfe plot and Inertia result are still not included in the program.

- Third group is a status/control group around the bottom START button, designed to start CAN communication and if no errors, to start self-commissioning procedure.

2.1. Select Self-Commissioning Limits

The following table describes the self-commissioning parameters and their defaults values.

ATUN INPUT VARIABLE	DESCRIPTION	DEFAULT VALUE
Rated speed	Rated motor mechanical speed in rpm. The speed at which most of the parameters (the ones for which the rotation is mandatory) will be measured (L_m , MTPA and Tr curves).	4658 rpm
Rated voltage	Rated line-to-line rms voltage in Volts. This voltage will be used for Idmin detection. It will be applied during scalar open loop run test at rated speed. After rated speed it will be kept constant.	For 48V battery the rated voltage is $48/1.41 = 33V_{rms}$
Rated flux current	Current level at which L_m slope starts to descend in Amps. At that level the rated rotor time constant value will be measured. (If corresponding check box selected, L_m +MTPA algorithm will suggest rated flux current value and change the value in the box accordingly)	39 A – motor dependent
Maximum speed	Maximum allowed mechanical motor speed in rpm. At that speed the Idmin will be measured.	6000 rpm
Maximum current	Maximum allowed rms value of motor line current in Amps. Within this range, L_m and MTPA curves will be defined. Must be lower than motor and drive maximum current.	200 A
Minimum current	Minimum magnetizing current rms value allowed during the autotuning. Units Amps	10A
Motor pole pairs	Integer number regarding the construction of the EV motor	2 typical
Encoder pulses per revolution	Integer number regarding the resolution construction of the encoder	64 (typical 32, 64)
CCR BandWidth	Desired current regulators bandwidth for the proper current control	500 Hz

One example of how to set those parameters is given for the motor with the nameplate data presented in Fig. 2

YDQ5-4-6730

DKDS A Kinetek Company				LV AC INDUCTION MOTOR			
MODEL	YJQ5-4N		SERIAL NO.				
KW	5	48	VOLTS				
RPM	5000	80	AMPS				
DUTY	S2-60min	170	Hz				
INS. CLASS	H	3	PHASE				
PART NO.	1SD.055.2984		40°C	AMB.			
Kinetek DeSheng (Shunde, Foshan) Motor Co., Ltd.							

Fig. 2. Example of motor nameplate data

Input parameters to the ATUN can be calculated by using the previously given considerations:

- Rated speed:** If not specified, use $n_{rated ATUN} = 0.33n_{max} = 1666 rpm$ where $n_{max} = 5000 rpm$ (1/3 is exponential value)
- Rated voltage:** $V_{rated} = V_{DC}/\sqrt{2} = 33 V$ for $V_{DC} = 48 V$
- Rated flux current:** $I_{d rated} = 0.5I_{rated} = 40 A$ where $I_{rated} = 80 A$
- Maximum speed:** $n_{max ATUN} = 2n_{rated ATUN} = 3400 rpm$
- Maximum current:** $I_{max} = 3I_{rated} = 240 A$ at least since no data for inverter ratings are given
- Minimum current:** $I_{dmin} = 0.2I_{rated} = 16 A$
- Motor pole pairs:** $P = ceil(60f_{max}/n_{max}) = 2$ where $f_{max} = 170 Hz$
- Encoder pulses per revolution:** $R = 32 pulse/rev$
- CCR Bandwidth:** $\omega_{bw} = 500 Hz$

2.2. Select Parameters For Autotuning

The autotuning can perform the separate measurement of different motor parameters. Within the Group box – **Select Parameters for Autotuning** the user can arbitrary setup the autotuning state machine flow.

If some measurements are not necessary, or maybe already determined by the a priori knowledge of the motor, the user can uncheck the proper box below and the parameter estimation procedure will not be called.

2.3. Status/control group

This group is used to initiate the CAN communication and motor self-commissioning. It consist of the various status/control actions that will be described in the continuation of the section. This group is depicted in Fig. 3. The control buttons of interest within this group are:

- CLEAR DATA** button – used to reset the motor parameter data within the **MotorParameter** tab; recommended to initiate prior to changing the motor within the drive,
- StartCAN** button – activate the CAN communication bus; a priori action to autotuning process; if CAN adapter is not attached to the driver the following warning pops out: *Open USB-CAN adapter error – no adapter*; if adapter is attached the following message is presented: *CAN started OK*,
- START AUTOTUNE** button – initiate the autotuning process (active button only if *StartCAN* was previously pressed)

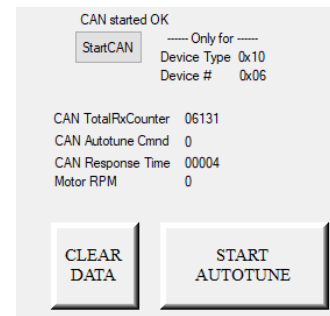


Fig. 3. If CAN communication is detected, the START button is enabled

3. MONITORING AND PROCESSING OF COMMISSIONED MOTOR PARAMETERS

The first result of self-commissioning process are parameters of equivalent circuit of induction motor. The second result are FOC induction motor drive parameter characteristics, such are $L_m(I_d)$ and MTPA $I_d(I_q)$ curves. These are as follows:

1. **R_s** – stator resistance parameter corresponding to R_s within the IM equivalent circuit; value given in Ohms – under the **Motor Parameters** field,
2. **L_σ** – stator equivalent leakage inductance, as a sum of stator and rotor leakage inductances within the IM equivalent circuit in μH – under the **Motor Parameters** field,
3. **$1/Tr$ Inverse rotor time constant parameter** – The DSP value of this parameter is recorded at the specific magnetizing current level represented at the knee point of the magnetizing $L_m(I_d)$ curve. Scaling to the rotor time constant in ms is also presented– under the **Motor Parameters** field,
4. **$L_m(I_d)$** – motor magnetizing curve denotes magnetizing characteristic within the IM equivalent circuit,
5. **MTPA $I_d(I_q)$ curve** – The d-axis stator current I_d value that gives maximum torque per amp for given I_q ,
6. **$1/Tr(Temp)$** – the rate of change of rated $1/Tr$ with temperature; this characteristic is closely related to the temperature change of rotor resistance parameter within the IM equivalent circuit,
7. **$I_{dmin}(Speed)$** – magnetizing current curve for rated voltage and different speeds,
8. **CCR Parameters** field: Include the DSP values of PI current regulator gains, proportional gain K_p , integral gain K_i and gain Shift parameter.

Curves $L_m(I_d)$ and MTPA $I_d(I_q)$ have a possibility for the advanced edition and modification. The editing window for each figure can be accessed by double clicking on the corresponding characteristic window. This software functionality is essential for acquiring the correct dependency of the critical characteristics within the IM drive.

3.1. Displaying of the self-commissioning results

When the self-commissioning phase of induction motor drive is completed, the retrieved parameter are automatically displayed at parameters dashboard, located in separate MotorParameters tab, depicted in Fig 4.

In the upper left corner, the measured value of stator resistance R_s , at 20°C, and the value of leakage inductance L_σ are displayed.

Inverse rotor time constant $1/Tr$ is also displayed in the same area. This parameter is given per unit, but also in [ms]. Due to expected variation of Inverse rotor time constant with level of heating, the value of field current that corresponds with $1/Tr$ value is also provided.

In the upper right corner of Fig. 4, the suggested parameters of current regulators are given. The parameters are given per unit, with suggested shift (gain) value.

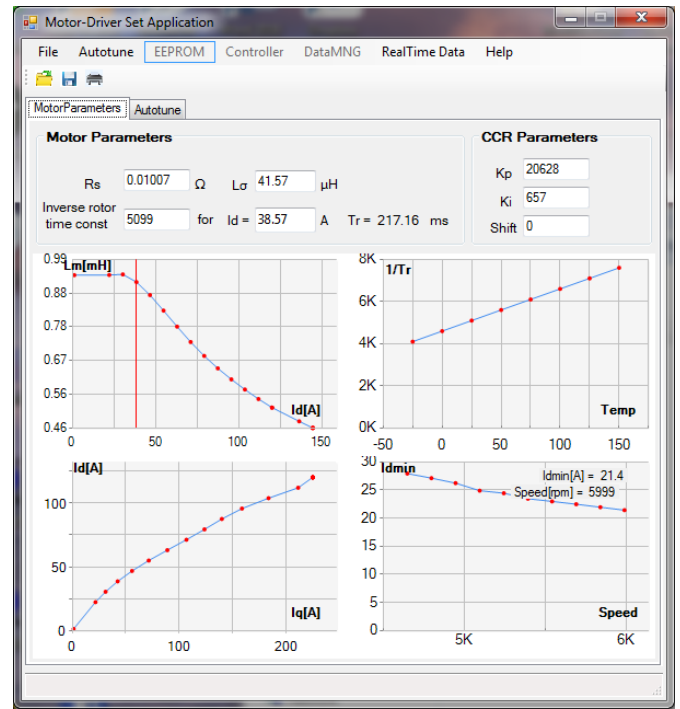


Fig. 4. Motor parameter dashboard in separate window

3.2. Modifying of the self-commissioning results

The self-commissioning results are prone to measurement and system noise. The best way is to inspect the results, and if needed, perform necessary data correction and trimming. All that is offered by this GUI application.

Parameters R_s , L_σ and $1/Tr$ can be changed directly in the corresponding field labels, if needed, before the parameters are saved on the disk or send back to controller EEPROM. The parameter can be changed by directly entering the new value in the label box.

Magnetizing $L_m(I_d)$ characteristic and optimal MTPA curves can be modified in separate advanced widows. By using this option, possible shortcomings and drawbacks of the introduced self-commissioning methods and imperfections of the measuring equipment used in the process of tuning the drive can be avoided by the operator action.

3.2.1. Modifying of L_m curve

The motor magnetizing $L_m(I_d)$ characteristics is received from the controller for the purposes of editing in separate window. Before editing, the user must cope with the few additional details regarding the magnetizing conditions within the real drive:

1. The magnetizing characteristics must be *smooth* and *monotonically decreasing* throughout the entire I_d range
2. The upper threshold defines the constant magnetizing inductance before the first saddle point (point of zero second order derivative)
3. Second saddle point is in the area of deep saturation

Due to measurement imperfection, especially at very low voltage level, raw L_m curve usually does not have perfect upper threshold around zero, and it is not smooth as anticipated.

Typical L_m result is shown on Fig 5.

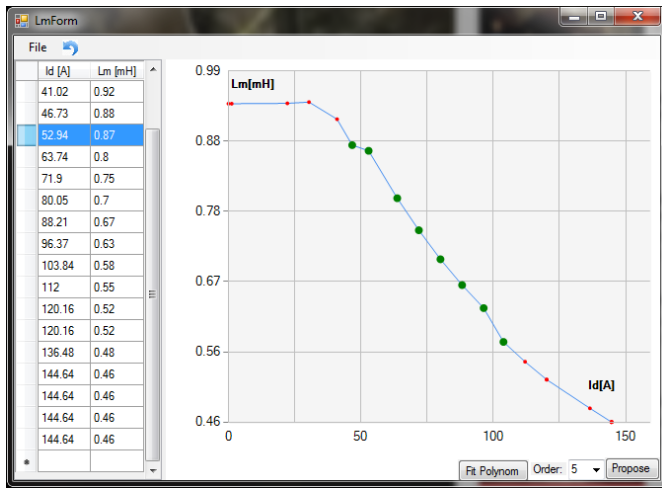


Fig. 5. Typical Lm curve after the self-commissioning

Of course, even with those imperfections, Lm curve trends are quite clear and it carries enough information about saturation of induction motor magnetic circuits. At this point, operator can use two options 1. to fit the Lm(Id) data manually (simply change the position of individual data points of Lm curve) and 2. to using Polynomial Function:

1. User can choose Order of Polynomial, from the dropdown menu,
2. When button Propose is clicked, the Green line will be shown, this is only proposed line for fit,
3. If the user is satisfied with the proposed Green line fit, then he should press button Fit Polynom,
4. If the user is in some way not satisfied with the proposed dependency, he is able to move points, and press button Propose, as many times as he wants; when finally, he is satisfied with the proposed line, he should press button Fit Polynom,
5. When button Fit Polynom is pressed, data at Lm(Id) are changed,
6. If Lm curve is changed, the MTPA curve proposal, according to [1], is also updated accordingly within the Charts and Tables.
7. User can repeat this process indefinitely,

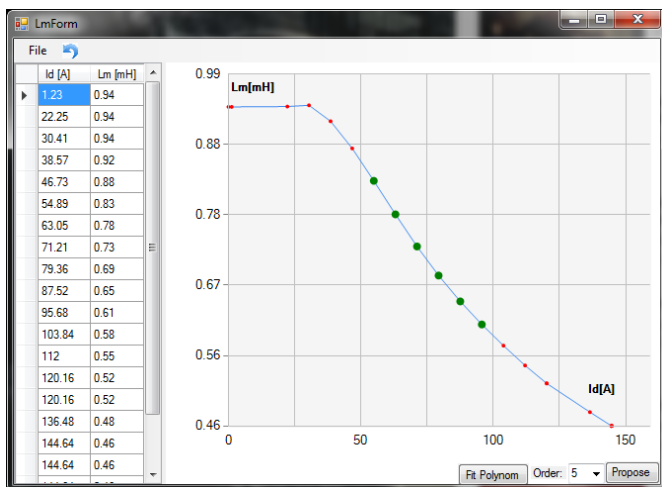


Fig. 6. Lm curve after polynomial fitting

Example of Lm curve after the fitting is shown in Fig 6. One can find that after the fitting of the all the measured points, the systematical errors will be removed and magnetizing curve will be more appropriate for the future use.

3.2.2. Modifying of MTPA curve

Maximum torque per ampere is the control mode mostly used during the typical electrical vehicle operation. That is the reason why rotor time constant and MTPA curve are the most important parameters to be tuned to insure energy efficient operation of electrical vehicle.

The GUI application can define the MTPA curve of unknown induction motor in two ways: 1. It can simple receive it from drive after the self-commissioning is finished. The drive is using the method described in [1], 2. GUI can also calculate analytical MTPA, based on the polynomial fit of Lm curve. Also described in [1]. The curves are always similar, but it is up to operator to design which curve is more accurate. In that process, one must know that optimal MTPA characteristics must be 1. smooth and monotonically increasing throughout the entire Iq range, 2. The curve angle in the vicinity of the point (0,0) must be 45°. 3. At some point MTPA curve has to saturate, reach maximum Id current value. Separate MTPA curve window is opened by double clicking the Id(Iq) chart within the Motor Parameter tab, Fig 4.

Typical MTPA Id(Iq) curve (blue and red) is shown in Fig 7. Identified maximum and minimum Id current values are also shown using green vertices. For convenient reasons, mostly for backward compatibility with old firmware, the linear fit of MTPA curve is also shown. Linear fit approximates MTPA curve using $I_d = K_0 + K_1 \cdot I_q$. GUI calculates the K0 and K1 parameters as a best fit candidate to presented MTPA curve.

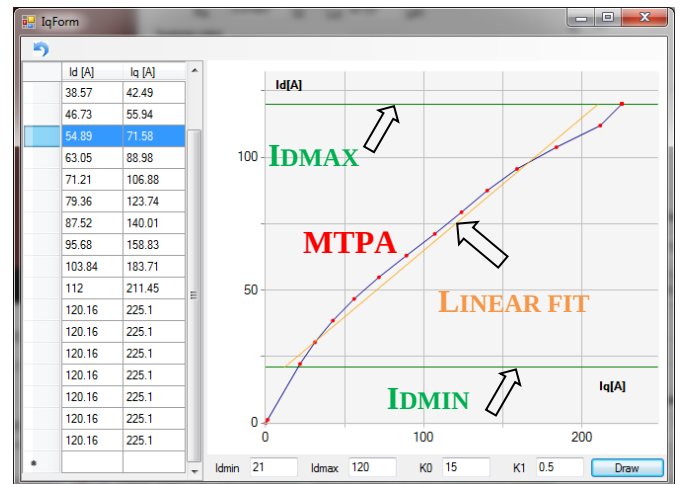


Fig. 7. MTPA curve after self-commissioning and fitting

MTPA data can be changed in various ways:

1. In IqForm window, user can directly change the Table with MTPA data. When user clicks Enter, the MTPA graphic is changed accordingly.
2. In the MTPA chart, user can select one (by clicking on the point) or multiple points (by selecting the area where they are situated) of the Chart, and to change the values by moving and dragging them,
3. Additionally, user can generate linear interpolation fit of the MTPA curve regarding predefined flux current limits. Fig7 depicts this process:

- i. Enter the propositions for the minimum I_{dmin} and maximum I_{dmax} flux currents, current offset $K0$ and slope $K1$
- ii. Click on the button *Draw* to generate the linear curve of the proposed parameters

4. CONCLUSION

In this paper newly developed self-commissioning GUI application is presented. The application is created to support the self-commissioning process of unknown induction motor drive using vector control. The application controls the autotuning process via CAN bus, and reads and displays the resulting data from controller. GUI has powerful tools for data editing, and even mathematical tools to support data fitting and theoretical MTPA curve proposal. Finally, the application offers motor and controller data to be saved on the disk, and/or written in EEPROM memory. With current globalization, this application is attended to be used at different motor factories around the globe, to retrieve the data to distant research centers for further analysis and inspection. Moreover, all this allows operator to tune the controller to unknown motor and perform some initial onsite demos with new electrical vehicles. Still, this is an early stage of this program development, some settings and suggested input values are currently under the test and with each new test data from the field the program is learning and evolving.

5. LITERATURE

- [1] V. Popović, M. Kukić, Đ. Oros, R. Varga, D. Marčetić, "Optimalno upravljanje asinhornom mašinom u pogonu električnih vozila", ENEF, Banja Luka, 2017.
- [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] Jingchuan Li, Longya Xu and Zheng Zhang, "A New Efficiency Optimization Method on Vector Control of Induction Motors," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005., San Antonio, TX, 2005, pp. 1995-2001.
- [4] 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.
- [5] S. Lim and K. Nam, "Loss-minimizing control scheme for induction motors," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -* , vol.151, no.4, pp.385-397, 7 July 2004
- [6] C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, and Pramod Agarwal, "Energy efficient control of three-phase Induction motor - a review", *International Journal of Computer and Elect. Eng.*, vol. 1, no.1, pp. 61-70, Apr 2009.
- [7] D. Marcetic, V. Popovic and P. Matic, "Simple procedure for self-commissioning of IM drive," 2018 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2018, pp. 1-6.

Садржај – Овај рад описује графички кориснички интерфејс који је начињен као подршка за аутоматско подешавање параметара непознатог трофазног асинхорног мотора напајаног са 48V батеријом. Апликација је направљена за персоналне рачунаре са Windows оперативним системом и има опције да подеси и покрене процедуру за аутоматско подешавање параметара мотора. Такође, по завршетку процедуре апликација преузима параметре и нуди њихову инспекцију и корекцију, по потреби. Апликација користи CAN Open интерфејс да комуницира са Nidec/Kinetek погоном за електрична возила који ради са STM32F303 процесором чији програм има верзију IFOC V1012 ATUN 1.09 или већу.

ГРАФИЧКИ ПРОГРАМ ЗА АУТОМАТСКО МЕРЕЊЕ ПАРАМЕТАРА АСИНХРОНОГ МОТОРА ЧИМЕ СЕ ОМОГУЋУЈЕ ВИСОКА ЕФИКАСНОСТ ЕЛЕКТРИЧНОГ ВОЗИЛА

Рената Србљанин, Владимир Поповић, Роберто Варга,
Дарко Марчетић, Петар Матић

Telekom je lider u energetskej efikasnosti

Praktično iskustvo

Milan Paripović

„Mtel“ a.d., Banja Luka, Republika Srpska

Sažetak—U vremenu u kojem živimo, kada smo zakoračili u novu industrijsku revoluciju (Industrija 4.0), potreba za štednjom i pronalaženjem svih načina kako štednju ostvariti, jedan je od strateških ciljeva cijelog društva i prisutna je u svim svjetskim kompanijama uslužnim djelatnostima (telekomunikacije, informatika), budući da troškovi energije čine znatan udio u sveukupnoj strukturi troškova poslovanja. Deklarativno su svi članovi uprava, izvršni direktori i rukovodioci svjesni te potrebe i načelno uvijek daju podršku svakoj inicijativi. Problematici treba pristupiti sistemski i organizovano, a da postoji dio kompanije koji bi u svojem „opisu poslova“ imao zadatak da predlaže, planira i provodi program ušteda. Tema ovog rada je kako se u telekomu implementirala energetska politika kroz jedan dugi period.

Ključne riječi – industrijska revolucija; energetska politika; energetska efikasnost; kvalitetno napajanje; diodni ispravljač; tiristori ispravljač; impulsni ispravljač; UPS; aku-baterije; elektroagregat; industrija 4.0; industrija 5.0; evolucija veze; Atys p sklopka; Power Logic;

I. UVOD

Svrha aktivnosti koje kompanija telekoma preduzima je da se putem optimizovanja ukupne potrošnje svih oblika energije koja se koristi u svakodnevnom poslovanju, povećanjem energetske efikasnosti kao i većom upotrebom energije iz obnovljivih izvora, ostvare povoljni ekološki efekti kroz smanjenje emisije stakleničkih gasova i ekonomski efekti kroz smanjenje operativnih troškova kompanije. Izuzetno je važno upoznati svakog zaposlenog da je energija postala najveći trošak u realizaciji proizvoda ili usluge koju njegova kompanija telekoma nudi na tržištu. Također treba naglasiti činjenicu da na globalnom nivou svjetska konkurencija stalno nastoji pronaći jeftiniju energiju i time postići svoju bolju poziciju na tržištu. Sve su to osnovni razlozi zbog kojih se kompanija telekoma odlučuje definisati vlastitu energetska politiku i reorganizovati se na način da se tako definisana politika i provodi u realnom poslovnom okruženju u kojem kompanija postoji.

Nakon usvajanja Energetske politike unutar kompanije telekoma potrebno je istu i implementovati u postojeće procese, jer se ona ne odnosi samo na neke od procesa već na sve koji postoje unutar firme. Zbog toga je prvi korak upoznavanje svakog zaposlenog sa namjerom kompanije da pokrene procese poboljšanja energetske efikasnosti sa ciljem ostvarenja potencijalnih ušteda. A to će biti realno moguće ostvariti tek kada se razvije svijest svakog pojedinca – zaposlenog da je provođenje te politike u interesu kompanije i društva u cjelini, jer energija je nešto bez čega kompanija telekoma ni moderno civilizacijsko društvo ne mogu opstati, a

njezini izvori nisu neiscrpni i potrebno je racionalizovati njezinu upotrebu.

II. AUTOMATIKA ELEKTROENERGETSKIH POSTRIJENJA

Četvrta industrijska revolucija, ili kako se danas uglavnom naziva industrija 4.0, inicirana je od strane Njemačke 2011. i predstavlja podsticaj razvoju industrije automatizacijom procesa proizvodnje korištenjem svih modernih proizvodnih sredstava nazvanih kibernetičko-fizičkim sistemima. Oni integrišu računarsku tehniku, prenos i obradu podataka te savremene mehaničke sisteme. Već 2015. godine pojavljuje se novi pojam industrija 5.0, kao odgovor na industriju 4.0. U početku to je neka vrsta bunta protiv dehumanizacije industrije, a potom prerasta u koncept saradničkog rada čovjeka i robota u specifičnim poslovima.

Prateći svetski trend uvođenja strategije energetske efikasnosti uopšte, a naročito u smislu smanjenja troškova električne energije, poboljšanja neprekidnosti i kvaliteta napajanja Schneider Electric je razvio Power Logic sistem koji obezbeđuje: podatke o potrošnji električne energije, krivama opterećenja, smetnjama, harmonijskim izobličenjima u sistemu [1].



Sl. 1. Power Logic sistemi

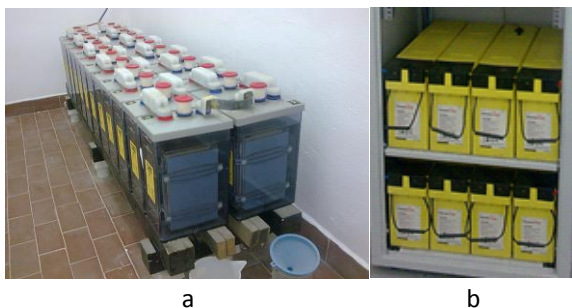
Upotreba Power Logic sistema omogućava kontrolno merenje potrošnje energije, upravljanje vršnim opterećenjem, praćenje faktora snage, nadgledanje drugih komunalnih, nadzor električne instalacije u realnom vremenu... Multimetri i analizatori mreže iz Power Logic serije PM9, PM700, PM800, CM3000, CM4000 imaju mnogobrojne primjene u oblasti kontrole merenja i praćenja troškova, nadzora instalacija i analize kvaliteta napajanja (Sl. 1.). Stari NN (Nisko Naponski) razvodni ormari (Sl. 2. a) nisu bili automatizovani kao novi (Sl. 2. b)



Sl.2 Niskonaponski razvod juče a. i danas b.

III. PROMJENA TEHNOLOGIJE

Aku-baterije su do kraja 80.ih godina bile smještane u prostorije minimalne nosivosti podne konstrukcije od 15 kN/m^2 , pod je morao biti obložen keramičkim pločicama otpornim na kiselinu i velike čvrstoće (Sl. 3.). Zidovi su do visine 2m morali biti obloženi kiselootpornim pločicama i premazani kiselootpornom bojom te završno kiselootpornim lakom. Ispod aku-baterija je morala biti poseban kada za eventualno izlivenu kiselinu, a morao je biti izveden i slivnik obložen kiselootpornim materijalom uz obavezan nagib poda prema tom slivniku. Vrata prostorije su također morala biti premazana kiselootpornom bojom i lakom. Minimalna visina prostorije je bila 2,7m uz predviđene otvore za aku-baterijske vodove koji su morali bi zatvoreni nakon polaganja vodova.



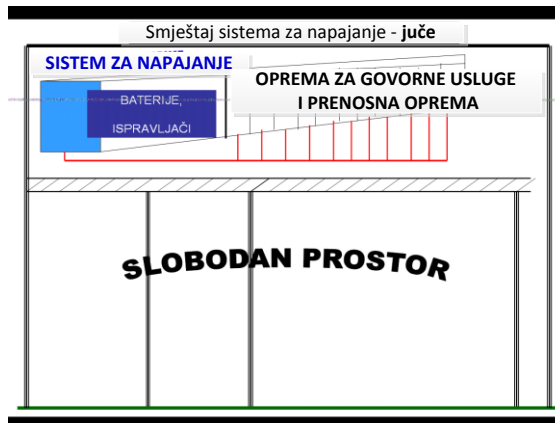
Sl. 3. Klasične otvorene kiselinske baterije a.i nove b.

Prostorija je morala biti suha i ventilirana minimalno sa pet izmjena vazduha po satu. Električno izvedena instalacija u prostoriji aku-baterija je morala zadovoljavati propise za eksplozivno opasne prostore ("S" izvođenje). Prostorija je morala biti grijana posebnim radijatorima u "S" izvođenju, a u istoj je izvedbi morala biti i rasvjeta prostorije te ventilacija cjelokupnog prostora. Neposredno uz prostoriju morao je biti izveden umivaonik sa instalacijom za vodu i po mogućnosti tuš za ispiranje zaposlenih u slučaju dodira sa kiselinom kod redovnog ili interventnog rada na aku-baterijama. Stalci aku-baterija su morali biti drveni i zaštićeni kiselootporno bojom, te izolovani od ostalog dijela poda ili zida. U prostoriji je postojala i mogućnost eksplozije pojavom plina "praskavca" – vodonik, koji se razvijao kod punjenja odnosno pražnjenja aku-baterija [2].

Ispravljački sistemi su morali biti u posebnoj prostoriji, neposredno uz prostoriju aku-baterija, kako bi i trase kabla bile što kraće. Tehnološki urađeni ispravljačkih sistemi bile su glomazni, teški i skupi, a koristili su se ili stari transformatorski sa ugrađenim transformatorima ili tiristorski ispravljači sa

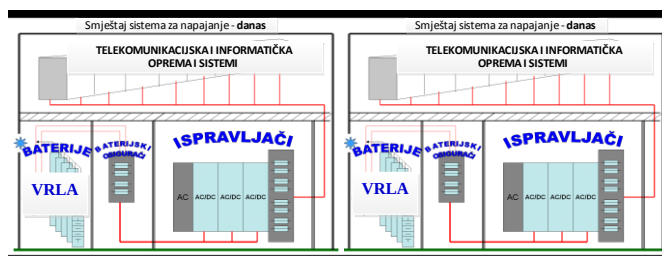
upravljačkim sklopovima i sklopovima zaštite te mjernim instrumentima za kontrolu postavljenih veličina. Uključenje ispravljača je bilo u početku stepenasto, zavisno o opterećenju potrošača, što je zahtijevalo posebne elemente za zaštitu od iskenja i sprječavanja mogućeg požara

Na slijedećim je slikama prikazan jedan takav raspored prostorija za objekte kako je izgledao juče „Sl. 4.“ i raspored prostorija kakav izgleda danas (Sl. 5.) [3].



Sl. 4. Smještaj sistema za napajanje – juče

Promjena tehnologije je dovela do toga da se koristili ispravljači koji rade na visokim frekvencijama, bez glomaznih su transformatora, velike stabilnosti napona, visoke pouzdanosti i energetski efikasnih parametara, a aku-baterije se smještaju zajedno sa ispravljačima u istu prostoriju sa svom ostalom opremom, odnosno u iste prostorije u kojima borave i ljudi. To je moguće zato jer su moderne, profesionalne aku-baterije takve konstrukcije i izvedbe da ne mogu eksplodirati, ne mogu se zapaliti, ne ispuštaju opasne količine gasova.



Sl. 5. Smještaj dvostranog sistema napajanja – danas

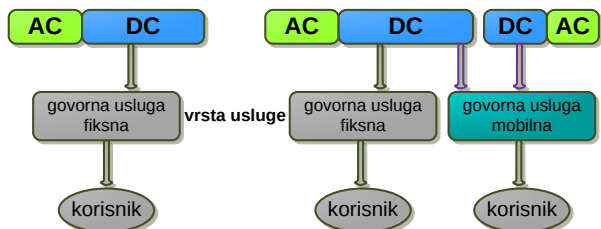
Danas je kod nas dvostrani sistem napajanja jer je to puno pouzdaniji sistem napajanja. Prije je 70% kvarova u telekomu bilo zbog napajanja, pa je taj problem riješen primjenom dvostranog napajanja..

IV. PROMJENA KONCEPCIJE NAPAJANJA

Kao što je već spomenuto, do kraja 80.ih godina prošlog vijeka uglavnom su telekom operatori nudili samo govornu uslugu putem fiksne bakrene žice ili radio signalom. Naglim razvojem tehnologije pojavile su se i nove usluge, u prvom redu to su bile usluge mobilne telefonije čiji su se sistemi u početku primjene spajali na neki od postojećih sistema za napajanje fiksne mreže i sva se oprema smještala u iste pro-

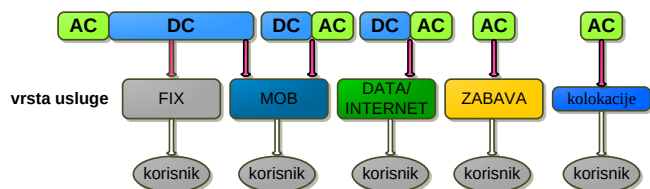
store sa već postojećim sistemima. Kada se početkom 99.tih godina pokazala potreba za naglim investiranjem u mobilne mreže, sva se oprema, pa i sistemi za napajanje počeli smještati u posebne prostorije, a potom i u posebne objekte.

Sljedeća slika pokazuje kako je evolucija sistema za napajanje i tehnologija izgledala do 1980.tih godina i nakon 1999 godine (Sl. 6.).



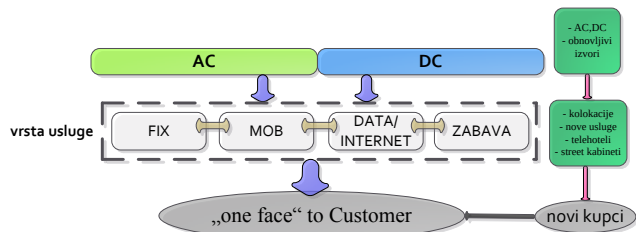
Sl. 6. EVOLUCIJA veze: NAPAJANJE – USLUGE u period 1980 do 1999 godine

Na slici u nastavku je prikazana situacija na jednoj lokaciji nakon 2002. godine (Sl. 7.).



Sl. 7. EVOLUCIJA veze: NAPAJANJE – USLUGE 2002 godine

Početkom novog vijeka dogodio se i nagli razvoj informatičke tehnologije što je rezultat nove usluge (internet, mreže podataka, kabelska televizija, video usluge,...), a koje su se mogle realizovati instaliranjem nove opreme i sistema. Za tu su namjenu također nabavljani i ugrađivani posebni sistemi za napajanje, pa je danas situacija da u istim zgradama i prostorima imamo instalirane različite tehnologije i svaka ima posebni sistem za napajanje, svoje aku-baterije, svoje UPS sisteme i svoje stacionarne diesel-električne agregate. Sve je to prikazano na prethodne dvije slike na kojima je vidljiva razlika koja se događala od 80.tih godina do početka novog vijeka.



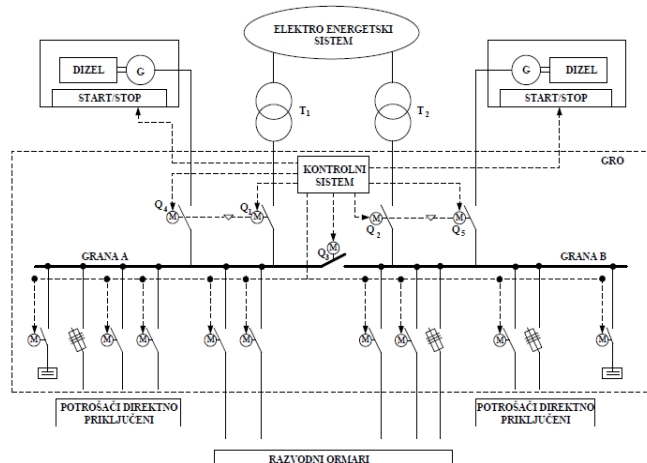
Sl.8. EVOLUCIJA veze: NAPAJANJE – USLUGE Proekcija 2015 godine

Danas, kada se počinje voditi računa o svim troškovima, pa tako i troškovima za energiju, traže se rješenja koja optimizuju sve navedeno uz povećanje energetske efikasnosti i smanjenje troškova energije (Sl. 8.). Jedan od efikasnih načina je i ponovna centralizacija sistema za napajanje kojim bi se omogućilo osiguranje potrebne električne energije iz zajedničkog sistema, osigurala besprekidnost iz zajedničkih aku-baterija i omogućila nezavisnost o prisutnosti javne elektro distribucijske mreže korištenjem zajedničkih agregata.

V. DVOSTRANO NEPREKIDNO NAPAJANJE DANAS

Napajanje elektroenergetskog sistema je dvostrano. U elektroenergetskom sistemu imamo na jednoj strani transformator i agregat i na drugoj strani imamo identično transformator i agregat [4].

Smetnje ili nestanak mrežnog napajanja sa jedne ili druge strane su nepredvidljivi, stohaistički događaji, stoga dizel-agregat mora biti stalno u stanju pripravnosti kako bi mogao preuzeti napajanje u što kraćem vremenu. Često se kaže da je dizel-agregat u standby stanju.



Sl. 9. Dvostrano neprekidno napajanje električnom energijom objekta telekoma

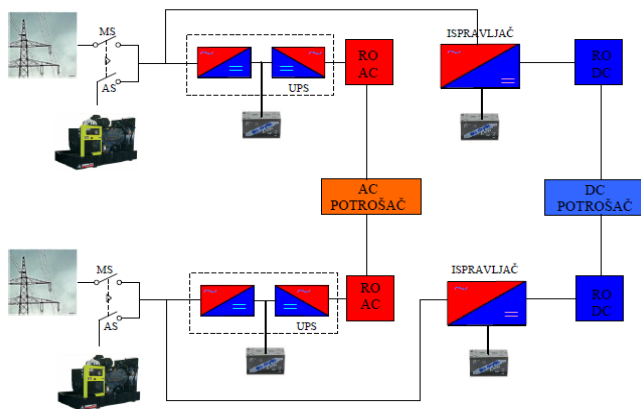
U cilju povećanja pouzdanosti i izbjegavanja raspada napajanja potrošača, sistem napajanja treba da bude oko deset puta pouzdaniji od opreme samog potrošača. U tu svrhu se uvodi redundandnost u sistemu napajanja. Da bi se olakšala implementacija redundandnosti sistema napajanja, neki kritični telekomunikacioni i informacion sistemi se implementiraju sa dvostrukim ulazom za napajanje (dual input) (Sl. 9.).

U svom osnovnom obliku, distribuirana redundansa podrazumijeva stvaranje dva (redundandna) sabirnička systemska zaštićenog napajanja i dva redundandna sistema za distribuciju napajanja. To eliminiše mnoge tačke kao mogući izvor greške, cijelim putem od prijema energije iz mreže sve do napojnih priključaka potrošača. Da bi se obezbijedila zadovoljavajuća tolerancija na greške ("fault tolerance") mora se omogućiti da potrošač dobija energiju sa oba sistema sabirnica.

Da bi se zaštitili od brzih ispada napajanja, kao naprimjer kratki spojevi ili ispad sistema napajanja, moraju biti imple-

mentirani ili potrošač sa dvostrukim ulazom ili koristiti veoma brze prekidače izeđu dva nezavisna izvora napajanja.

Danas postoji više konfiguracija za distribuirana redundantna napajanja. Za današnje velike, moderne uobičajene telekomunikacione objekte, odnosno one sa visokim nivoom zastupljenosti informacione tehnologije, implementira se dual redundandi UPS sa redundantnim AC napajanjem.



Sl. 10. Sistem dvostranog neprekidnog napajanja električnom energijom potrošača telekoma

U velikim uobičajenim telekomunikacionim objektima opcija napajanja koja se razvija je korištenje redundantnih DC ispravljača i dual redundand AC UPS sistema (Sl. 10). [5]. Samostalni DC ispravljači, zajedno sa AC razvodom napajanja su locirani duž cijelog postrojenja. Najbolja praksa u većim informacionim data centrima je kombinovanje AC sa DC napojnim sistemima od telekomunikacionog operatera opreme u cilju smanjenja cijene i povećanja pouzdanosti. Redundandni, uvijek spremni (standby) generatori se mogu koristiti kao zamjena u slučaju ispada glavnoga AC napajanja..

Specificiranje i održavanje visokog nivoa raspoživosti napajanja zahtijeva pristup određenom broja servisa za podršku. Preventivno održavanje je od krucijalnog značenja za višegodišnje održavanje sistema napajanja. To uključuje redovno testiranje, ispitivanje aku-baterijskog postrojenja, verifikovanje da UPS i ispravljači rade ispravno i termografički nadzor izabrane opreme i kablova u cilju predupređivanja ispada u električnim sistemima [6]. Telekomunikaciona mjesta, posebno ako su bez operatora ili udaljena, zahtijevaju detaljne periodične provjere. Te provjere moraju biti uključene u program zaštite napajanja da bi se izbjegli problemi ili predložile korektivne akcije

Aku-baterije moraju osigurati pouzdan izvor električne energije za potrošače koji moraju kontinuirano raditi za vrijeme nestanka napajanja. Često su potrošači u istosmjernim razvodima zahtijevaju napajanje relativno velikom strujom u kratkom vremenu, a aku-baterije koje ih napajaju često nemaju visoke performanse. Postoje dva razloga za to. Prvi je u tome što većinu ostalih potrošača, kojima treba trajno napajanje, zadovoljavaju aku-baterije srednjeg kvaliteta. Drugi i mnogo važniji razlog je zbog toga što visoko kvalitetne aku-baterije imaju tanje ploče, time i kraći životni vijek od aku-baterija srednjeg kvaliteta, što bi smanjilo pouzdanost sistema isto-

smjerne distribucije. Slično razmišljanje vrijedi za naizmjenični sistem besprekidnog napajanja.

VI. POSTROJENJA ENERGETSKE ELEKTRONIKE

Stari diodni ispravljač (Sl. 11. a.) koji je bio dimenzija 60x60x108 cm imao je snagu 5W/dm³, tiristorski ispravljač istog nazivnog napona i struje je specifična snaga je 25W/dm³. Ispravljači sa impulsnim upravljanjem specifične su snage 48W/dm³, dok današnja najnovija tehnologija omogućava specifičnu snagu iznad 100W/dm³.



a

b

Sl. 11. Diodni a) i tiristorski b) ispravljač

Kako se takva gustina snage po jedinici zapremine mogla ostvariti? Na mrežni transformator otpada približno 50% težine starog titistorskog ispravljača. Zadatak mrežnog transformatora jeste pretvoriti mrežni naizmjenični napon 230V na niži nivo, pogodan za ispravljanje tiristorima. Drugi mu je važan zadatak galvansko odvajanje izlaznog dijela ispravljača od mreže, kako bi se povećala sigurnost cijelog sistema odnosno onemogućio povremeni negativni utjecaj s mreže na potrošače i isti dodatno zaštitio. Kako se preko transformatora prenosila cjelokupna snaga izvora, on je nužno imao velike dimenzije i težinu,

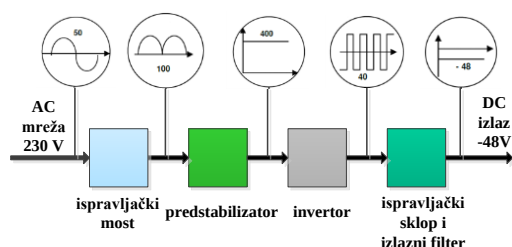
Tipični sistem takvog napaja je ispravljačem proizvodnjer „Iskra“, proizveden 1986. godine, tip UT 48/30 AB. Radi se o tiristorski regulisanom ispravljaču u mostnom spoju, nazivne struje 30 A, koji uz održavanje pune aku-baterije osigurava da na potrošaču napon nikada ne bude iznad 52 V (Sl.11. b.).

Ovisno o struji punjenja akumulatorske baterije, ispravljač automatski prelazi iz režima održavanja aku-baterije u režim nadopunjavanja i obratno. Ispravljač se napaja naizmjeničnim naponom 230 V iz ormara razvoda RO sa sabirnica naizmjeničnog napona i pretvara ga u istosmjerni. Istovremeno napaja paralelno potrošače, te puni i održava akumulatorsku bateriju. Maksimalna struja koju ispravljač može dati je 33 A.

Ispravljač puni akumulatorsku bateriju IU metodom punjenja. Na početku punjenja aku-baterija se puni konstantnom strujom. Kada napon punjenja dosegne postavljenu vrijednost, struja punjenja počinje padati sve do vrijednosti dovoljne za održavanje aku-baterije potpuno punom.

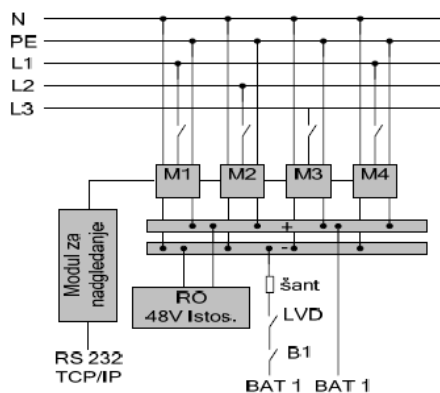
Kod impulsnih ispravljača mrežni transformator ne postoji, nego se mrežni napon direktno ispravlja Grecovim mostom, tako da se dobije istosmjerni pulsirajući napon, koji se potom filtrira u sklopu koji se zove predstabilizator i koji služi kao

jedna vrsta impulsnog pretvarača. Osobina mu je da je istosmjerni napon koji on generiše veći od vršne vrijednosti ulaznog napona. Na svom izlazu predstabilizator generiše stabilan istosmjerni napon 400V, kojim se napaja sledeći sklop inverter čiji je zadatak da taj napon pretvori u širinski modularne impulse koji se onda transformišu na niži napon, ispravljaju i filtriraju, da bi se na izlazu dobio stabilni istosmjerni napon (24, 48, 60V). Radna je frekvencija invertora je 40 – 100 kHz pa ispravljač sa takvom tehnologijom nazivamo impulsni ispravljač. Sve navedeno prikazano je na slici.



Sl. 13 Impulsni ispravljač

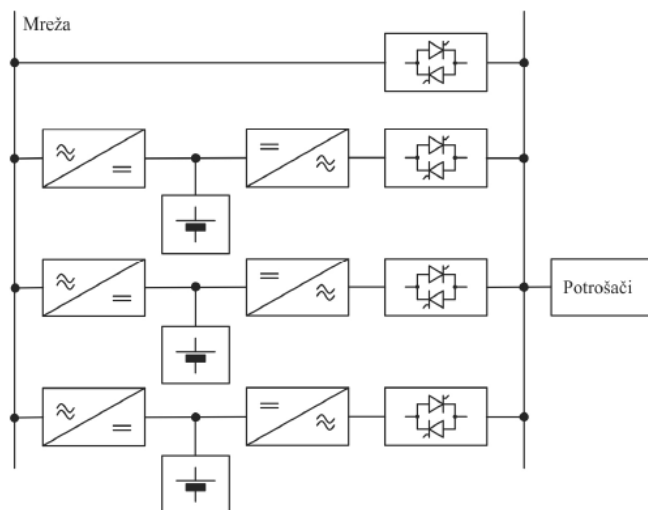
Za transformisanje impulsa i galvansko odvajanje izlaza ispravljača od mreže služi transformator snage, no kako je zapremina transformatora za istu snagu obrnuto proporcijalna radnoj frekvenciji, očigledno da je zapremina transformatora za istu snagu obrnuto proporcionalan radnoj frekvenciji, očigledno je da je zapremina transformatora kod impulsni ispravljača biti neusporedivo manji od onog kod tiristorskih ispravljača s radnom frekvencijom 50 Hz. Na radnim frekvencijama od 40 – 100 kHz nije više moguće upotrebljavati transformatore sa željeznom jezgrom, nego se koriste posebne feritne jezgre koje moraju imati velike indukcije zasićenja i vrlo uske petlje histereze. Zahvaljujući visokoj radnoj frekvenciji induktivitet prigušnice i kapacitet kondenzatora izlaznog filtera mogu biti mali, što se vrlo povoljno odražava na brzinu regulacije i dinamički odziv kod promjene veličine tereta na izlazu ispravljača, što je važno kod uključivanja sistema nakon ponovnog dolaska mreže. Svi ispravljači mogu raditi paralelno i pritom aktivno i jednoliko djeliti opterećenje [7].



Sl. 13. Šema povezivanja ispravljačkog sistema

Ispravljački sistem (Sl.13.) mora da obezbjedi adekvatne uslove rada za aku-baterije stoga mora imati sljedeće funkcije režima rada:

- Automatsku korekciju napona prema aku-baterijama zavisno od temperature ambijenta u kome se aku-baterije nalaze, a u skladu sa zahtjevom proizvođača aku-baterija. Obim korekcije mora biti podesiv u granicama koje propisuje proizvođač aku-baterija.
- Ograničenje struje punjenja aku-baterija zavisi od njihovog kapaciteta, tipa i preporuka proizvođača aku-baterija.
- Podnaponsku zaštitu priključenih aku-baterija, koja ih isključenjem štiti od praznjenja ispod granica dozvoljenog napona i automatski uključuje u rad po dolasku stabilnog naizmjeničnog napona napajanja. Te naponske granice (pragovi) za isključenje i ponovo automatsko uključivanje aku-baterija treba da budu podesive, zavisno od tipa predviđene autonomije u napajanju i preporuka proizvođača aku-baterija



Sl. 14. Redundantni UPS sa statičkim prekidačima

Kada se zahteva najveći stepen sigurnosti, upotrebljavaju se dva ili više nezavisnih UPS-ova kao što je prikazano na (Sl. 14.) pri čemu svaki sistem ima svoju aku-bateriju. Ovakva topološka struktura koja se često naziva i UPS (Sl. 14.) s dvostrukom konverzijom nudi mnoge prednosti kod ostvarivanja besprekidnog napajanja potrošača. U normalnom režimu rada kada je prisutan napon glavnog izvora napajanja, aktivni su ispravljač i inverter. U tom slučaju potrošači su zaštićeni od smetnji u glavnom izvoru napajanja preko ispravljača i invertora koji predstavljaju barijeru za električne smetnje prolazne propade napona ili prenapona. Ukoliko napon glavnog izvora napajanja izađe izvan dozvoljenih granica (obično preko 10% ili ispod 20% nazivnog napona), inverter preuzima napon iz baterije. Prelaz je plastičan, izbjegnuta je beznaponska pauza. Ako se ne uspostavi napon glavnog izvora napajanja, a prošlo je vrijeme autonomije aku-baterije, inverter se isključuje, te se pokušava pomoću statičke sklopke preusmjeriti potrošače na izvor napajanja koji je priključen na bajpas. Bajpas za potrebe održavanja osigurava napajanje potrošača dok se na UPS siste-

mu provede operacija održavanja. Potrošači su tada bez zaštite od smetnji u napajanju

VII. ELEKTRO AGREGAT

Stacionarnim agregatima upravlja njihova automatika preko koje se osigurava kvalitetan napon i frekvencija na sabirnicama prioritetnih potrošača u GRN (Glavni Razvodni Nužna). Broj agregata je najmanje dva ili više i njima se proizvodi energija najmanje za sedam dana rada svih prioritetnih potrošača. Zbog te je namjene u objektu ugrađen i sezonski rezervoar goriva, kapaciteta za deset dana rada, a pristupni put cisternom goriva mora biti uvijek raspoloživ.

Ponekad može doći do problema u kompatibilnosti između UPS-a i dizel-agregata. Izlazni napon dizel agregata može biti zadovoljavajući za UPS, ali često puta interval u kojem se mijenja izlazna frekvencija dizel-agregata, nije u granicama koje zadovoljava UPS. U najgorem slučaju oscilacije frekvencije dizel agregata su tolike da nije moguća sinhronizacija sa UPS-om. Sinhronizacija je onemogućena ili zbog izlaska frekvencije izvan dozvoljenih granica, ili se prebrzo mijenja tako da UPS ne može pratiti tako brze promjene. U tom slučaju UPS daje alarm operatoru da nije moguće prebaciti napajanje na dizel-agregat, te potrošači ostaju na napajanju iz aku-baterija.



Sl. 15. Atys p sklopka

U slučaju kada imamo dva izvora napajanja (u našem slučaju agregat i transformator) koji napajaju jedan zajednički potrošač (opremu TK centra) potrebno je da obezbijedimo priključno mjesto za predmetne potrošače koji će u toj zajedničkoj tački napajanja imati mogućnost napajanja i sa dizel-agregata i sa mreže tj. transformatora. Za obezbjeđivanje gore potrebnih uslova napajanja predviđen je tzv. ormar ATS-a (Automatic Transfer Switch Sl. 15).

Prilikom dimenzionisanja dizel-agregata koji će biti ugrađen u kombinaciji sa UPS-om, treba voditi računa da će takav dizel-agregat osim čistih nužnih potrošača napajati i nužnu rasvjetu, rashladne uređaje, određene alarme i sl. Gruba procjena veličine dizel-agregata je sledeća:

- $2 \times \text{nazivna snaga nužnih potrošača} + 3 \times \text{nazivna snaga rashladnih uređaja}$

Stvarni proračun snage dizel-agregata treba provesti mjerenjem snage svih potrošača, uzimajući u obzir i faktor sigurnosti.

VIII. ZAKLJUČAK

Osim napretka u uvođenju novih tehnologija i nudi novih usluga i sistemi za napajanje i besprekidno napajanje su također tehnološki napredovali, pa su današnje izvedbe tih sistema energetske efikasnije, gabaritno puno manje, operativno efikasnije i troškovno ekonomičnije. U praksi se svaka nova tehnološka usluga snadbjevala svojim novim sistemom za napajanje, pa je posljedica toga da na istoj lokaciji često imamo više različitih sistema, različitih tehnoloških generacija i različitih troškova eksploatacije i troškova za energiju. Sve je to postalo neracionalno i skupo, pa se danas traže rješenja koja će biti energetske efikasnija a troškovno isplativija

Iz prakse je poznato da su ispravljači u pravilu opterećeni svaki sa po 50 – 60 % nazivnog opterećenja, da su aku-baterije u stvarnom pogonu većeg kapaciteta od realno potrebnog, pa je cijeli energetske sistem neke lokacije koji je sastavljen od parcijalnih sistema napajanja energetske neracionalno opterećen, pa radi u režimu ispod 75% opterećenja čime mu je i stepen iskorištenja nešto manji na račun gubitaka, što sve uzrokuje povećane troškove za energiju.

Centralizacijom će se postići racionalnija i efikasnija upotreba i smanjiti troškovi energije u cjelini.

LITERATURA

- [1] Electrical instalation guide 2016 Schneider Electric
- [2] Milan Paripović „Prednosti uštede zamjene klasičnih aku-baterija novim tehnolo-gijama (VRLA, GEL)“, 28 međunarodni ELEKTROINŽENJERSKI SIMPOZIJ EIS 2014 Šibenik 04-07. 05. 2014 god.
- [3] Ivan Galetić, Hrvatski Telekom d.d., Zagreb, "Optimizacija prostora i smanjenje troškova energije i eksploatacije centralizacijom sustava za besprekidno napajanje" EIS Šibenik svibanj 2012
- [4] Milan Paripović „Dvostrano neprekidno napajanje električnom energijom u telekomu“, SONT 2015, Zagreb, 11-12.05.2015
- [5] Merlin Gerin, "High Power UPS Systems – Design Guide"
- [6] Merlin Gerin, "High Power, UPS Systems – Installation Guide"
- [7] <http://www.power-one.com/power/news-events>

ABSTRACT

In the times we live in, when we have stepped into the new industrial revolution (Industry 4.0), the need to save and find all the ways to make savings is one of the strategic goals of the entire society and is present in all the global service companies (telecommunications, informatics), since energy costs make a significant part of the overall cost structure of the business. Declaratively, all board members, CEOs and managers are aware of this need and in principle always support each initiative. Issues should be approached systemically and in an organized manner, with the existence of a part of the company which, in its "job description", would have the task of pre-empting, planning and implementing the savings program. The topic of this paper is how energy policy was implemented in telecom over a long period of time.

TELECOM IS A LEADER IN ENERGY EFFICIENCY PRACTICAL EXPERIENCE

Milan Paripović

Regeneracija kinetičke i potencijalne energije u industrijskim sistemima

Slobodan Lubura

Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, Republika Srpska, BiH
slobodan.lubura@etf.ues.rs.ba

Sažetak— U ovom preglednom radu opisane su mogućnosti regeneracije energije u industrijskim sistemima (pogonima). Dat je osvrt na tri osnovna načina iskorištenja te regenerisane energije, te je ukazano na to da motorni pogoni koji se najčešće koriste u industriju moraju biti pogonjeni sa bidirekcionim pretvaračima energetske elektronike (*back to back*) da bi regeneracija bila moguća. Na primjerima jednostavnih pogona napravljena je analiza regeneracije kinetičke i potencijalne gravitacione energije.

Ključne riječi—*regeneracija energije; kinetička energija; potencijalna energija; bidirekciono pretvaranje energetske elektronike;*

I. UVOD

Danas se gotovo polovina proizvedene električne energije u industrijskim sistemima pomoću elektromotornih pogona pretvara se u mehaničku energiju [1], [2]. Da bi se povećala energetska efikasnost ovih pogona danas se sve više primjenjuje koncept integralne optimizacije pogona kao ključne strategije, koja obuhvata pravilno dimenzionisanje svih komponenti sistema, koje istovremeno moraju da imaju veliku efikasnost. Međutim, najveći potencijal uštede energije u industrijskim sistemima sa elektromotornim motornim pogonima povezana je sa smanjenjem snage potrebne za pokretanje radnog opterećenja putem kontrole brzine/momenta i/ili sa djelomičnim regeneracijom kinetičke/potencijalne energije koja je nagomilana u radnom opterećenju pogona. U ovom preglednom radu opisane mogućnosti regeneracije kinetičke i potencijalne energije radnih opterećenja kod elektromotornih pogona, koje omogućavaju bidirekciono pretvaranje energetske elektronike (EE) kojima se motori u industrijskim sistemima (pogonima) napajaju [3].

II. MOGUĆNOSTI REGENERACIJE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POGONIMA

Regeneracija energije je veoma korisna opcija kod industrijskih sistema (pogona) gdje su radna opterećenja takve prirode da je u njima konzervirana (skoncentrirana) velika količina kinetičke ili potencijalne energije. Kod industrijskih pogona gdje imamo obrtno kretanje, u toku pokretanja ili ubrzavanja pogona dolazi do gomilanja kinetičke energije u zamajnim masama koje imaju velike momente inercije J , dok se kod dizanja tereta potencijalna gravitaciona energija gomila u masi samog tereta m , u zavisnosti od visine dizanja h . Ukoliko se za pogon radnog opterećenja u ovim sistemima

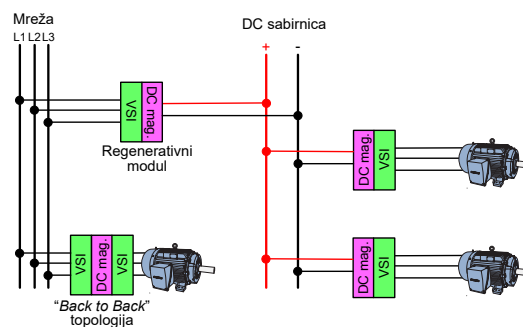
koristi električni motor onda je moguće dio nagomilane energije bilo da je ona kinetička ili potencijalna pomoću motora u fazama usporenja ili kočenja pogona pretvoriti u električnu energiju. Naime, u tim fazama rada pogona električni motor može da radi u generatorskom režimu u drugom ili četvrtom kvadrantu i na taj način pretvara dio mehaničke energije u električnu. Međutim da bi se taj dio energija mogao ponovo koristiti električni motor mora biti napajan sa bidirekcionim pretvaračem EE koji radi bar u dva, a u najboljem slučaju u sva četiri kvadranta. U tom slučaju kažemo da imamo regenerativni pogon.

Efikasnost ovakvog jednog regenerativnog pogona jednaka je proizvodu efikasnosti η_k svih komponenti koje učestvuju u procesu regeneracije: efikasnosti motora η_{mot} koji radi u generatorskom režimu, efikasnosti invertora za pogon motora η_{invmot} koji radi u režimu kontrolisanog ispravljača i efikasnosti $\eta_{invmreža}$ još jednog dodatnog invertora koji energiju iz DC međukola prebacuje u mrežu, a koji u ovoj složenoj topologiji bidirekcionog pretvarača EE (*back to back*) radi u invertorskom režimu. Ukoliko se kod složenog sistema, koga čine na primjer sistem sa više pokretnih stepenica i komponente za regeneraciju energije, koristi DC sabirница sa koje se napajaju svi pretvarači EE za pogon motora onda u takvom konfiguracijama koristi dodatni regenerativni modul (inverter) koji će višak energije sa DC sabirnice prebaciti u mrežu. Ovaj regenerativni modul ne mora stalno biti u funkciji [4].

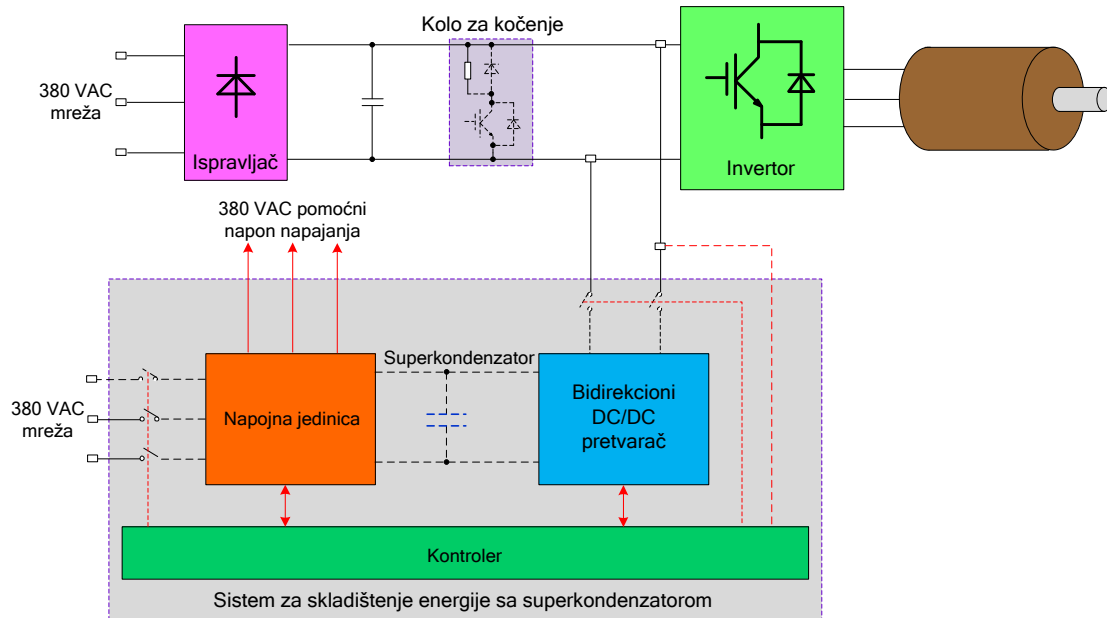
Regenerisana energija može se ponovo iskoristiti na tri načina:

1. prebacivanjem u mrežu,
2. prebacivanjem na zajedničku DC sabirnicu,
3. skladištenjem u baterije/superkondenzatore.

Prvi i drugi način prikazani su na slici 1, a treći na slici 2.



Sl. 1. Dvije različite strategije za regeneraciju energije



Sl. 2. Regeneracija energije skladištenjem u superkondenzatoru

Prvo se rješenje mnogo koristi u praksi, a količina regenerisane energija je ograničena maksimalnom snagom bidirekcionog pretvarača koju on može isporučiti u mrežu. Srednja vrijednost regenerisane snage koja se isporučuje u mrežu inverzno je proporcionalna periodu trajanja tog regenerativnog procesa.

Primjenljivost drugog rješenja zavisi od odnosa režima rada pogona, tj. od odnosa između motornog i generatorskog režima. Ukoliko je količina energije pogona u režimu kočenja tolika da se ne može potrošiti u pogonima koji rade u motornim režimima, onda se u rad mora uključiti regenerativni modul (Sl. 1.), koji će tu energiju sa DC sabirnice prebaciti u mrežu. Međutim, bez obzira na postojanje ovog regenerativnog modula, regenerativnim sistemima sa DC sabirnicom po pravilu iz preventivnih razloga se dodaje kolo kočionog otpornika na kome se disipira višak energije u DC međukolu.

Ukoliko regenerativni period relativno dugačak, onda primjena regenerativnih sistema sa superkondenzatorima (Sl. 2.) ili baterijama imaju potpuno opravdanje [5],[6],[7]. Energija se iz ovih sistema za skladištenje može vratiti motornom pogonu u fazama pokretanja i zalijetanja motora.

III. REGENERACIJA KINETIČKE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POGONIMA

Kinetička energija koju posjeduje neko tijelo pri linearnom i obrtnom kretanju data je sa:

$$E_{lin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_{lin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

$$E_{obr} = \frac{1}{2}J\omega^2, E_{obr} = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (2)$$

gdje su m – masa tijela, v – linearna brzina, J – moment inercije tijela, ω – ugaona obrtna brzina, respektivno.

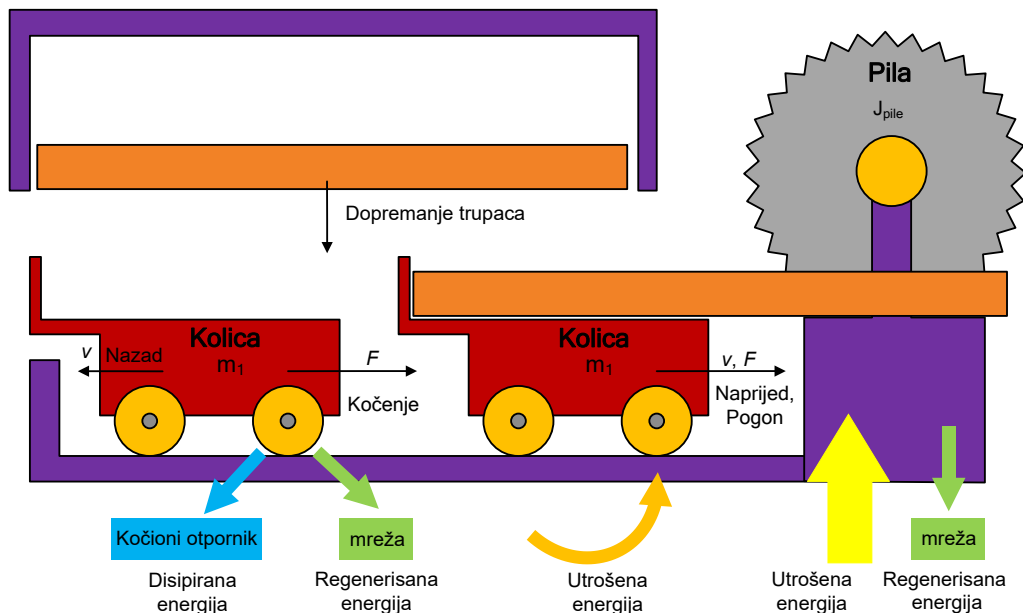
Kako pogoni u industrijskim sistemima dominantno imaju obrtno kretanje, iz izraza (2) može se zaključiti da kinetička energija kod industrijskih sistema (pogona) sa velikim zamajnim masama (J - inercija) kao radnim opterećenjem i/ili kod visokobrzinskih pogona (ω^2) može imati velike vrijednosti, te može iskoristiti za regeneraciju, odnosno investicija u regenerativni sistem može potencijalno biti dobro rješenje [7], [8].

Drugim riječima, značajan dio kinetičke energije koji se uskladišti u radnom opterećenju pogona (zamajnim masama) u toku njegove faze pokretanja (ubrzavanja) može se djelimično regenerisati u fazi zaustavljanja pogona, naravno ukoliko za to postoje pretpostavke. Ako pretpostavimo da se u industrijskim sistemima (pogonima) najviše koriste električni motori, funkcija regeneracije kinetičke energije ostvaruje se bidirekcionim pretvaračem energetske elektronike (EE) kojim se motor napaja. Ta energija pomoću ovih pretvarača može biti vraćena u mrežu, jednosmjernu sabirnicu (DC bus) ili se može uskladištiti u baterijama ili super kondenzatorima, ako što je već napomenuto u uvodnom dijelu ovog rada.

U većini industrijskih pogona bez mogućnosti regeneracije kinetičke energije, korisnici izbjegavaju česta isključenja pogona i kad je on u ne opterećenom stanju, da bi uštedjeli vrijeme i dodatnu energiju koja je potrebna pri ponovnom pokretanju pogona. Na taj način se umanjuju i mehanička naprezanja pogona koja smanjuju životni vijek komponenti pogona kao što su: zupčanici, remenice, ležajevi i sl.

A. Regeneracija kinetičke energije kod pogona pile

Mogućnosti uštede energije (novca) biće pokazan na primjeru regeneracije kinetičke energije kod pogona pile. Tako na primjer kod velikih pila za rezanje trupaca u pasivnom dijelu procesa rezanja, kada se kolica za dopremu trupaca pomjeraju u lijevo da bi se pripremila nova faza rezanja, pogon pile je i dalje aktivan i pila nastavlja da se obrće istom



Sl. 3. Pila za rezanje trupaca sa sistemom za njihovu dopremu

brzinom iako je neopterećena. Sličan scenario se dešava kod presa za velikim zamajnim masama i drobilicama. Ukoliko su ovi pogoni pogonjeni asinhronim kaveznim motorima uštedu energije bilo bi moguće napraviti kontrolom momenta motora ili kontrolom fluksa magnetizacije, što se izvodi jednostavnom regulacijom linijskog napona ili promjenom spoja statorskih namotaja [30], [31].

Kolica za dopremu trupaca na slici 1. predstavljaju jedan jednostavan primjer linearnog sistem kretanja gdje je moguće regenerisati dio kinetičke energije u fazi usporenja kretanja kolica u lijevo u odnosu na pilu. Prvo u toku faze rezanja trupca kolica guraju trupac ka pili i u zavisnosti od instalisanog postrojenja za rezanje trupaca taj proces može da traje od 5 – 20 s. U sljedećoj fazi kolica se vraćaju nazad da prihvate novi trupac za rezanje i to vrijeme trebalo bi biti što kraće da cijeli proces rezanja trupaca bio optimalan. Bez umanjnja opštosti, pretpostavimo da se masa kolica za dopremu trupaca kreće u granicama od 1- 6 t, a dužina puta kretanja kolica 5 -20 m.

Evidentno je, da kraće vrijeme kretanja kolica nazad (u lijevo od pile) zahtijeva što veće ubrzanje kolica i mali zaustavni put. Ukoliko pretpostavimo da je brzina kretanja kolica neposredno prije trenutka zaustavljanja $v = 15 \text{ m/s}$ i masa kolica $m = 6,000 \text{ kg}$, kinetička energija koju posjeduju kolica u tom trenutku prema jednačini (1) data je sa:

$$E_{lin} = \frac{1}{2} \cdot 6,000 \cdot (15)^2 = 675,000 \text{ J} = 675 \text{ kWs} = 0.1875 \text{ kWh} \quad (3)$$

Pretpostavimo da kolica dnevno do pile za rezanje dopreme do 500 trupaca, što iznosi 93,75 kWh/dnevno kinetičke energije pogona koja se potencijalno može regenerisati. Ukoliko pogon radi 300 dana u godini dolazi se do 28,125 kWh/godišnje. Ako uzmemo da je efikasnost regenerativnog pogona svega oko 50 % i iznosi 0.075 €/kWh,

skoro 1054.6 €/godišnje može biti uštedeno instalacijom sistema za regeneraciju.

IV. REGENERACIJA POTENCIJALNE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POGONIMA

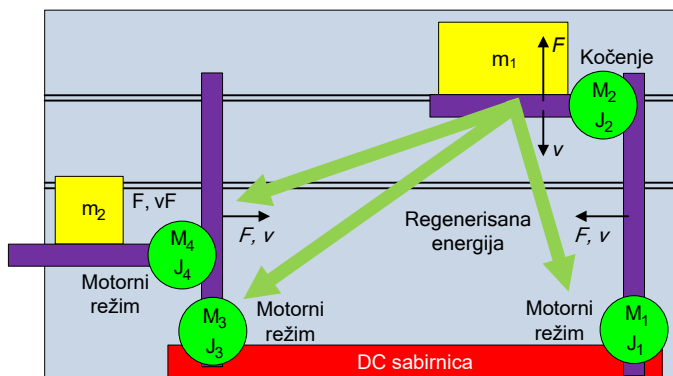
U potencijalnom gravitacionom polju, potencijalna energija data je izrazom:

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (4)$$

gdje su m – masa tijela, g – ubrzanje zemljine teže i h – visina na kojoj se tijelo nalazu u odnosu na referentnu tačku (visinu). Iz izraza (4) intuitivno je jasno, da svako tijelo podignuto na visinu h posjeduje potencijalnu energiju, koja se na neki način može regenerisati [1], [9]. Klasičan primjer sistema (pogona) sa mogućnošću regeneracije potencijalne energije su liftovi, pokretne stepenice i različiti tipovi dizalica. U svim pomenutim sistemima mehanička energija (4) koja se utroši za podizanje mase m na visinu h ostaje konzervirana u masi tijela i može se djelimično regenerisati tokom spuštanja mase, naravno ukoliko se koristi regenerativni pogon. Kao primjer uzmimo da je kabina lifta mase od 800 kg podignuta na visinu od 30 m. Potencijalna energija konzervisana u kabini lifta iznosiće $E_p = 235,440 \text{ J}$, odnosno $E_p = 65,4 \text{ Wh}$. Pretpostavimo da se kabina lifta u toku jedne godine 6,000 puta podigne i spusti sa ove visine, što daje 392,4 kWh energije koja se potencijalno može regenerisati. Ukoliko se uzme da je efikasnost regenerativnog sistema 50 % uz cijenu kilovata energije 0.075 €/kWh dobije se 14.75 €/godišnje uštede.

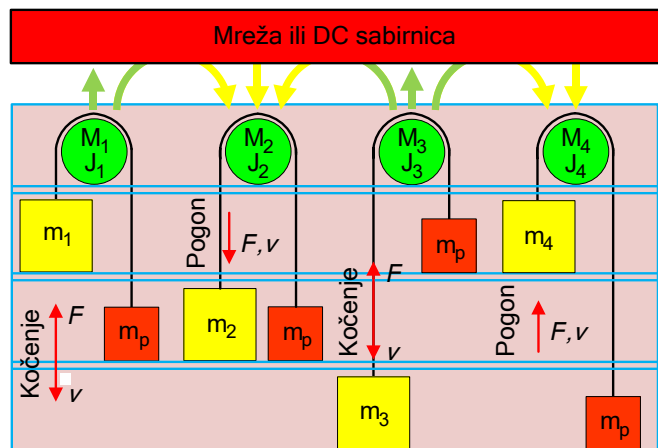
Na slici 2. dat je prikaz jednog sistema sa mogućnošću regeneracije potencijalne energije. Sistem u osnovi čine dvije dizalice koje su pogonjene motorima M1, M2 i M3, M4 respektivno. Neka je svaki od motora pogonjen bidirekcionim pretvaračem EE koji radi u sva četiri kvadranta. Jedan od scenarija regeneracije potencijalne energije može biti sljedeći:

pri spuštanju tereta mase m_1 motor dizalice M2 radi u regenerativnom režimu i preko bidirekcionog pretvarača vraća energiju u zajedničku DC sabirnicu i napaja motor M1 koji služi za translatorno pomjeranje dizalice. Takođe, na primjer preko zajedničke DC sabirnice mogu se napajati i motore M3 i M4 manje opterećene dizalice.



Sl. 2. Dvije dizalice povezane na DC sabirnicu

Ušteda potencijalne energije moguća je i kod liftova pri njihovom kretanju naniže, što je slučaj kada je težina kabine sa putnicima veća od težine protutega. Tada, obrtni moment motora ima suprotan znak od znaka brzine obrtanja motora, motor se nalazi u generatorskom režimu i regeneracija energije je moguća, uz pretpostavku da se motor lifta (PMSM) napaja iz bidirekcionog pretvarača. Isti princip važi i pri kretanju praznog lifta naviše. Tada se protuteg lifta kreće naniže i koči se motorom, koji ponovo preko bidirekcionog pretvarača energiju vraća u mrežu ili u zajedničku DC sabirnicu. Korištenjem regenerativnih pogona kod liftova može se uštedjeti od 40% do 50% energije.

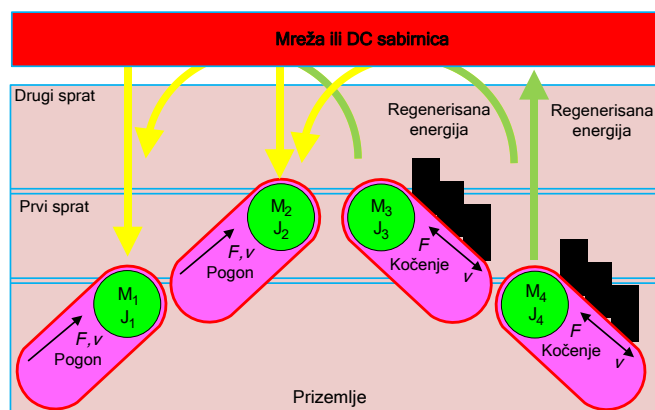


Sl. 3. Četiri lifta pogonjena bidirekcionim pretvaračima povezanih na mrežu ili DC sabirnicu

Mogućnost regeneracije energije pored dizalica i liftova postoji i kod pokretnih stepenica (elevatora). Na slici 4 prikaz je primjer jednog takvog sistema koji se sastoji od četvoro pokretne stepenice, od toga dvoje voze putnike naviše, a preostale dvoje naniže. Za pogon pokretnih stepenica koja voze putnike naviše ne postoji mogućnost regeneracije energije jer elektromotorni pogon radi samo u motornom režimu i pogoni se jednokvadrantnim pretvaračem EE.

Eventualna ušteda energije može se ostvariti start/stop režimom rada stepenica ili pogonima promjenljive brzine. Međutim, kod pokretnih stepenica koji voze putnike naniže postoji mogućnost regeneracije, jer tada elektromotorni pogoni mogu da rade u režimu kočenja/generisanja energije i preko dvokvadrantnih pretvarača EE dio energije regenerišu u mrežu ili DC sabirnicu. Ova energija dalje se može iskoristiti za pogon pokretnih stepenica koje voze putnike naviše, kao što je to prikazano na slici 4.

Postojanje DC sabirnice u ovim sistemima predstavlja nešto jeftinije rješenje, jer se u tom slučaju koriste pretvarači EE koji ne moraju imati spregu sa mrežom. Međutim, s druge strane, kod ovih jeftinih rješenja postoji opasnost pojave previsokog napona na DC sabirnici, uslijed viška regenerisane energije u sistemu. Problem se može riješiti na dva načina. Prvi način je korištenje kočionih otpornika za disipaciju viška regenerisane energije, što svakako smanjuje efikasnost cjelokupnog sistema, a drugi način je uključivanje u rad regenerativnog modula (dvokvadrantni pretvarač EE) koji će višak energije regenerisati u mrežu ili neki drugi sistem sa smještanje energije (baterije ili superkondenzatori).



Sl. 4. Sistem sa četiri elevatora povezanih na mrežu ili DC sabirnicu

Takođe, treba napomenuti da je vrijednost trenja kod pokretnih stepenica koja voze putnike naniže jako velika, što ograničava mogućnosti regeneracije energije u ovakvim sistemima. Isti principi se mogu primijeniti za čekrke i kranove, s tim da u takvim sistemima ne postoje protutegovi, tako da je mogućnost regeneracije moguća samo pri spuštanju tereta naniže.

ZAKLJUČAK

Iz navedene diskusije i datih primjera može se zaključiti da se pored kontrole brzine u pogonima što je već dokazano, značajna ušteda energije može se ostvariti i sistemima za regeneraciju energije. Ključnu komponentu sistema za regeneraciju energije čine bidirekcionim pretvarači EE koji imaju mogućnost da rade najmanje u dva, a često je poželjno i u sva četiri kvadranta. Na kraju se može zaključiti da motorni pogoni koji su pogonjeni sa VSD (*variable speed drive*) pretvaračima, koji pored kontrole brzine pogona imaju sposobnost regeneracije energije pogona bilo u mrežu, DC sabirnicu ili u neki sistem za skladištenje predstavljaju budućnost primjene u industrijskim sistemima.

LITERATURA

- [1] F. J. T. E. Ferreira and A. T. de Almeida, "Reducing Energy Costs in Electric-Motor-Driven Systems: Savings Through Output Power Reduction and Energy Regeneration," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 24, no. 1, pp. 84-97, Jan.-Feb. 2018. doi: 10.1109/MIAS.2016.2600685
- [2] T. Vaimann, A. Kallaste, A. Kilk and A. Belahcen, "Lifecycle-based design and optimization of electrical motor-drives - Challenges and possibilities," 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Istanbul, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1109/EPECS.2013.6713037.
- [3] A. Paugurs and A. Senfelds, "Design of a motor drive system for bidirectional DC power flow control," 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/RTUCON.2015.7343145
- A. de Almeida, F. Ferreira, and D. Both, "Technical and economical considerations to improve the penetration of variable speed drives for electric motor systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 188-199, Jan./Feb. 2005.
- [4] E. D. Mitronikas, D. V. Spyropoulos, N. P. Papanikolaou, E. C. Tatakis and N. Spyropoulos, "Energy saving during modern lift operation," 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, 2014, pp. 756-761. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960266
- [5] V. Zarikas, N. Papanikolaou, M. Loupis, N. Spyropoulos, "Intelligent Decisions Modelling for energy Saving in Lifts: An Application for Kleeman Hellas elevators", *Energy and Power Engineering*, Vol. 5, No. 3, May 2013, pp. 236-244.
- [6] Estanis Oyarbide, Ivan Elizondo, Abelardo Martínez-Iturbe, Carlos Bernal, Javier Irisarri "Ultracapacitor-based plug & play energyrecovery system for elevator retrofit", 21th Annual Conference of the IEEE

Industrial Electronics, (ISIE'2011), Berkeley, California, USA, 7-10 Jun 2011, pp. 462-467.

- [7] I. Karatzaferis, E. C. Tatakis and N. Papanikolaou, "Investigation of Energy Savings on Industrial Motor Drives Using Bidirectional Converters," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17952-17961, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2748621
- [8] A. R. Rao, M. Mahesh and B. K. Keshavan, "Analysis of Energy during Regenerative modes," 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707455
- [9] T. Wang and Q. Wang, "Optimization Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Potential Energy Recovery System," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 856-863, Dec. 2012. doi: 10.1109/TEC.2012.2211080

ABSTRACT

This paper describes the roads of energy regeneration in industrial systems (plants). Three basic ways of utilizing this regenerated energy are outlined, and it is pointed out to make regeneration possible, the electrical motor as most commonly used drive in industry must be powered by bidirectional power electronics converters (back to back). On the examples of simple drives, an analysis of the regeneration of kinetic and potential gravitational energies were done.

REGENERATION OF KINETIC AND POTENTIAL ENERGY IN INDUSTRIAL SYSTEMS

Slobodan Lubura

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

620.9(082)
621.311(082)

НАУЧНО-стручни симпозијум Енергетска ефикасност (2019 ; Бања
Лука)

Zbornik radova [Електронски извор] / Naučno-stručni
simpozijum Energetska efikasnost ENEF 2019 ; uređivački odbor
Branko Blanuša ... [i dr.] ; glavni urednik Branko Blanuša ; odgovorni
urednik Čedomir Zeljković. - Banja Luka : Univerzitet u Banjoj Luci,
Elektrotehnički fakultet, 2019. - 105 стр. : илустр. ; 30 cm

Način pristupa (URL): <http://enef.etfbl.net/2019/p10.html>. -
Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-99955-46-39-7

COBISS.RS-ID 8485912

Sponzori i partneri



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



UN
DP

*Empowered lives.
Resilient nations.*

MAKOPRINT
STAMPARIJA

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.etf.unibl.org
E-mail: enef@etf.unibl.org