

PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI TERMOBLOKOVA JP ELEKTROPRIVREDA BIH I NJIHOVA ANALIZA SA EKONOMSKOG ASPEKTA

CALCULATION AND ECONOMIC ANALYSIS OF RELIABILITY INDICATORS OF JP ELEKTROPRIVREDA BIH THERMAL UNITS

Damir Aganović¹, Irfan Penava¹, Nermin Palić¹

Sažetak: Većinski dio proizvodnje JP EP BiH otpada na termoblokove koji su po svojoj prirodi, kao i po starosti, skloni kvarovima i iznenadnim ispadima. U takvim uslovima, da bi se osigurala maksimalna dobit, potrebno je analizirati pouzdanost blokova, naročito kada se radi trgovina u kratkoročnim vremenskim okvirima. U ovom radu je na osnovu historijskih podataka načinjena analiza vjerovatnoća ispada svakog bloka s obzirom na vrijeme provedeno u pogonu. Na osnovu tih podataka predložen je algoritam za proračun troškova, odnosno isplativosti određene kratkoročne trgovine u različitim scenarijima ispada, te je napravljena analiza jednog konkretnog primjera.

Cljučne riječi: pouzdanost, termoblok, kratkoročna, trgovina

Abstract: A larger part of JP EP BiH energy production portfolio is consisted of old thermal units, which are prone to failures and sudden outages. In order to maximize the profits in such conditions, it is necessary to analyze reliability of those units. This especially affects short-term trading. In this paper, an analysis of outage probabilities for each unit is made in relation to unit's operating time. On that basis, trade profitability calculation algorithm is suggested and applied on a specific case.

Keywords: reliability, thermal, unit, short-term, trading

UVOD

Elektroenergetski sistem (EES) je po svojoj prirodi složen spoj različitih elemenata koji se ponašaju po nedeterminističkim zakonitostima. Dešavaju se mnoge neplanirane situacije koje se jedino mogu opisati teorijom vjerovatnoće. Da bi se ostvarili najbolji mogući finansijski rezultati, a da pri tome nije ugrožena sigurnost isporuke električne energije krajnjim kupcima, potrebno je kvantificirati rizike pojave različitih kvarova koji mogu bitno utjecati na kratkoročne rezultate elektroprivredne kompanije.

U ovom radu je fokus stavljen na termoproizvodne jedinice, koje su po svojoj prirodi sklonije kratkoročnim kvarovima. Kvarovi hidroagregata dovoljno su rijetki da bi se zanemarili, a rezultati analiza bili zadovoljavajuće preciznosti. Također, kvarovi dalekovoda rijetko ograničavaju proizvodnju, te se neće uzimati u obzir.

Postavlja se pitanje da li je u određenom trenutku, bolje proizvodnju držati na maksimumu, bez rotirajuće rezerve, i podnijeti rizik eventualnog ispada termobloka, odnosno plaćanja time uzrokovanih penala. Drugim riječima, pitanje je koja je to granična cijena za koju bi se isplatilo pro-

dati električnu energiju i snositi finansijske posljedice nakon eventualnog ispada.

Na osnovu podataka o radu u prošlosti pojedinih termoblokova, moguće je za svaki pojedinačno, sa zadovoljavajućom tačnošću, predvidjeti vjerovatnoću kvara/ispada.

1. TRGOVINA

Godišnja proizvodnja JP EP BiH (Javno preduzeće Elektroprivreda Bosne i Hercegovine) iznosi oko 7.000 GWh, u zavisnosti od planiranih remonata i hidroloških prilika. S druge strane, ukupna godišnja potrošnja električne energije iznosi oko 5.100 GWh, što ostavlja višak električne energije za trgovinu u iznosu od oko 1.900 GWh. Ovi brojevi ovise o mnogo različitih faktora, te predstavljaju izrazito grube procjene navedene samo radi sticanja ukupne slike prodajnih mogućnosti JP EP BiH.

Elektroprivredna kompanija prodaje električnu energiju na osnovu različitih ugovora. Po vremenskom okviru mogu se razlikovati:

- godišnji,
- mjesečni,
- sedmodnevni,
- day-ahead,
- i intra-day ugovori.

¹ JP EP BiH, Bosna i Hercegovina
d.aganovic@elektroprivreda.ba

Rad dostavljen: avgust 2014. Rad prihvaćen: novembar 2014.

Dugoročni ugovori se rade na osnovu bilansa za predstojeću godinu, gdje se kao ulazni podaci uzimaju samo općeniti planovi. Kratkoročni ugovori (posebno *day-ahead* i *intra-day*) se, s druge strane, rade u skladu s trenutnom situacijom u proizvodnim pogonima. Uzima se u obzir hidrološka situacija, stanje termoblokova u pogonu, planirani ulasci/izlasci blokova u pogon, očekivana potrošnja, obaveze prema specifičnim ugovorima. itd.

Međutim, čak i u takvim uslovima dešavaju se nepredviđene situacije među kojima je najozbiljnija ispad termobloka.

Ugovori se razlikuju i po proizvodu kojim se trguje. To ne mora nužno biti energija, nego može biti i njen zakup, odnosno sposobnost elektroprivredne kompanije da isporuči određenu energiju u bilo kojem trenutku. Tako postoje ugovori prema kojem je proizvođač dužan započeti isporuku dodatne energije u vrlo kratkom roku (npr. 15 min nakon naloga kupca).

Osim toga, postoje dugoročni ugovori za tzv. negarantovanu energiju gdje proizvođač, u slučaju problema u proizvodnji, ima mogućnost obustave isporuke električne energije kupcu. Pri tome je proizvođač dužan to najaviti onoliko ranije koliko je to definisano ugovorom (obično 4 sata).

2. POMOĆNA USLUGA TERCIJARNE REGULACIJE

Nezavisni operator sistema u BiH (NOS) obezbjeđuje tercijarnu rezervu od tri elektroprivredne kompanije u BiH. Tercijarna rezerva treba biti tolika da može pokriti ispad najveće proizvodne jedinice u EES-u BiH [1].

Elektroprivrede dostavljaju satne mogućnosti proizvodnih jedinica za pružanje usluga tercijarne regulacije do 12:00 dana D-1 [2]. Zavisno od tih mogućnosti, a u skladu sa godišnjim planom raspodjele tercijarne rezerve, NOS odobrava elektroprivredama obim snage za ovu uslugu za dan D.

Kriterij za angažovanje tercijarne rezerve je ispad veće proizvodne jedinice iz pogona i odstupanje kontrolnog područja BiH veće od 50 MW u trajanju od 15 minuta. Ukoliko elektroprivreda nije u mogućnosti da nadoknadi svoj deficit uzrokovan ispadom proizvodne jedinice, NOS izdaje nalog za angažovanje tercijarne rezerve pružaocu usluge i to za potrebe EES-a BiH. Prioritetno se angažuje rezerva od one elektroprivrede kod koje se desio ispad. Tercijarna rezerva će se angažovati u roku od 15 minuta od trenutka davanja dispečerskog naloga [1], [2].

Vrijeme jednog angažovanja može minimalno trajati od trenutka angažovanja do kraja prvog narednog sata. Maksimalno jednokratno trajanje može biti 6 sati. Jedan pružalac može biti angažovan najviše 4 puta mjesečno u punom iznosu i vremenu, a minimalno vrijeme između dva angažovanja tercijarne rezerve je 48 sati (osim ako je sam pružalac dao saglasnost tako što je dan ranije nominovao svoje proizvodne jedinice za pružanje ove usluge) [2].

Na početku svakog mjeseca vrši se obračun angažovanja. Energija tercijarne rezerve koja je angažovana za potrebe EES-a BiH raspoređuje se proporcionalno na elektroprivrede koje su imale manjak energije veći od 15 MWh/h za vrijeme angažovanja. Nepoštivanje naloga su slučajevi gdje pružalac usluge u toku pojedinog angažovanja tercijarne rezerve ne angažuje najmanje 80% tražene rezerve [2]. U slučaju nepoštivanja naloga, pružaocu neće biti isplaćena naknada za uslugu za taj mjesec.

Tarifa pomoćne usluge rezerve kapaciteta za tercijarnu regulaciju frekvencije i snage iznosi 5,584 KM/kW mjesečno. Tarifa za električnu energiju koja se isporučuje u režimu tercijarne regulacije u iznosu 24,712 Kf/kWh kao trostruka vrijednost cijene električne energije najskuplje proizvodne jedinice u sistemu [3].

Elektroprivreda BiH pruža pomoćnu uslugu tercijarne regulacije u rasponu od 25 MW do 140 MW u zavisnosti od sopstvenih mogućnosti i nominacija ostalih elektroprivreda [3].

3. PROIZVODNI KAPACITETI JP EP BIH

Proizvodne kapacitete JP EP BiH čine tri hidroelektrane i sedam termoblokova u okviru dvije termoelektrane. Ukupna instalisana snaga iznosi 1.558 MW, a godišnja proizvodnja oko 7.000 GWh, u zavisnosti od planiranih remonata i hidroloških prilika. Učešće hidroelektrana u ukupnoj godišnjoj proizvodnji iznosi oko 20%, a termoelektrana 80%.

Na termoblokove otpada ukupno 1.054 MW instalisane snage. Blokovi su različite starosti, odnosno različitih godina rekonstrukcije, te samim tim nisu ni jednako pouzdani. U eksploataciji se javljaju različita ograničenja njihovog rada. U zimskoj sezoni obavezan je rad ili bloka G3 (bar jednog kotla) ili bloka G4, jer se s njih odvaja para koja služi za grijanje grada Tuzle. Također, često se javljaju manji kvarovi koji se rješavaju u hodu bez izlaska bloka iz pogona, ali obično uz smanjenu proizvodnju.

Tabela I: Pregled termoblokova JP EP BiH

TE Tuzla				
Blok	Godina ulaska u pogon	Godina rekonstrukcije	Instalisana snaga (MW)	Maksimalna snaga na pragu (MW)
G3	1966.	2000.	100	91
G4	1971.	2002.	200	182
G5	1974.	2008.	200	182
G6	1978.	2012.	215	198
TE Kakanj				
Blok	Godina ulaska u pogon	Godina rekonstrukcije	Instalisana snaga (MW)	Maksimalna snaga na pragu (MW)
G5	1969.	2004.	110	92
G6	1977.	2011.	110	101
G7	1988.	2005.	230	208

Proizvodne cijene za svaki blok pojedinačno se procjenjuju i utvrđuju jednom godišnje na osnovu performansi bloka, cijena energenata koje blok troši u procesu proizvodnje i drugih parametara.

Tri hidroelektrane u vlasništvu JP EP BiH hidraulički su spregnute u seriju (kaskada), s ukupnom instalisanom snagom od 504 MW. Hidroelektrana Jablanica je akumulacijska, dok su HE Grabovica i HE Salakovac protočne hidroelektrane ("dnevne akumulacije").

Tabela II: Pregled hidroelektrana JP EP BiH

HE na Neretvi		
HE	Instalisana snaga (MW)	Korisna zapremina Akumulacije (hm ³)
Jablanica	6 x 30	288
Grabovica	2 x 57	5,43
Salakovac	3 x 70	15,6

Proizvodnja HE uveliko ovisi o hidrološkim prilikama. Također, o istim ovise i viškovi električne energije. Pošto se u ovom radu vrše analize u kraćim vremenskim okvirima od nekoliko dana, uzimaju se u obzir samo kratkoročne hidrološke prilike (do 7 dana). U slučaju povišenih dotoka potrebno je na odgovarajući način evakuisati dotoke vode, te obično tada hidroelektrane rade blizu svog maksimuma, a ostatak potrebne proizvodnje podmiruje se iz termoelektrana.

Osim hidroloških prilika, bitan ograničavajući faktor u radu hidroelektrana su vodoprivredne dozvole. U ljetnom periodu godine postoji ograničenje minimalnog ispuštanja, dok za vrijeme velikih voda ispuštanje ne smije biti veće nego što bi bilo da objekti nisu izgrađeni. Pored navedenih, HE Salakovac ima dodatna ograničenja. S obzirom da sljedećom elektranom nizvodno (HE Mostar) upravlja druga elektroprivreda, poželjno je da postoji stalna međusobna komunikacija, te da se proizvodnja eventualno prilagodi potrebama jedne ili druge elektroprivrede. Također, zbog kupaca i ribara, ljeti se ne smiju vršiti nagle promjene proizvodnje.

Hidroagregati se za razliku od termoblokova vrlo rijetko kvare. Najčešće se dešavaju kratkoročni ispadi agregata pod djelovanjem različitih zaštita, nakon kojih se agregat vrlo brzo (cca. 30 min) vraća u pogon. U slučaju ozbiljnijeg kvara, obično su potrebne zahtjevnije popravke koje traju znatno duže (nekoliko mjeseci), te se u tom slučaju taj agregat svakako izbacuje iz kratkoročnog planiranja na duži period. Osim toga, u slučaju ispada dalekovoda preko kojih su hidroelektrane vezane s ostatkom sistema, može se nametnuti ograničenje u proizvodnji da bi se ispunio "n-1" kriterij. Međutim, s obzirom na rijetkost navedenih pojava, u ovom radu one se neće analizirati.

4. ANALIZA PODATAKA O POUZDANOSTI

Mogućnost kvantificiranja vjerovatnoće iznenadnog ispada termobloka, odnosno rizika pojave kvara, od velike je

koristi za osoblje koje se, unutar elektroprivredne kompanije, bavi trgovinom i planiranjem. Bez obzira da li se radi o prodaji *day-ahead* (trgovina za sutrašnji dan) ili *intra-day* (trgovina za tekući dan), poznavanje ovih podataka može pomoći da se donesu bolje odluke koje će dugoročno donijeti veći profit.

Vodi se i redovno osvježava evidencija osnovnih pokazatelja pouzdanosti svih blokova. Za svaki dan se evidentiraju, između ostalog, sati rada, kvara, remonta, održavanja, te rezerve svih blokova, tako da je moguće odrediti sva pojedinačna vremena koja blok provede od ulaska u pogon do izlaska ili ispada. Upravo takvi podaci za 2012. i 2013. godinu su iskorišteni za analize napravljene u ovom radu.

4.1. Weibullova distribucija

Weibullova distribucija jedna je od najšire korištenih distribucija životne dobi u inženjerstvu pouzdanosti. Riječ je o svestranoj distribuciji koja promjenom parametra β , može poprimiti i karakteristike drugih distribucija [4]–[6].

Funkcija gustoće vjerovatnoće (*pdf*) Weibullove distribucije data je kao:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (1)$$

gdje su:

$\eta > 0$ – parametar skale ili karakteristični život,

$\beta > 0$ – parametar oblika ili nagib.

Funkcija kumulativne gustoće (*cdf*) Weibullove distribucije dana je kao:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2)$$

Ova se funkcija često naziva funkcija nepouzdanosti. Budući da je suma pouzdanosti i nepouzdanosti jednaka jedinici, slijedi da je funkcija pouzdanosti Weibullove distribucije jednaka:

$$R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (3)$$

Uvjetna pouzdanost predstavlja vjerovatnost uspješnog obavljanja naredne misije koja slijedi nakon što je kompletirana prethodna misija. U proračunu uvjetne pouzdanosti figurirat će i vrijeme prethodne misije i vrijeme misije koju treba poduzeti. Funkcija uvjetne pouzdanosti dana je izrazom:

$$R(T, t) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{e^{-\left(\frac{T+t}{\eta} \right)^{\beta}}}{e^{-\left(\frac{T}{\eta} \right)^{\beta}}} = e^{-\left[\left(\frac{T+t}{\eta} \right)^{\beta} - \left(\frac{T}{\eta} \right)^{\beta} \right]} \quad (4)$$

Funkcija stope kvara $\lambda(t)$ za Weibullovu distribuciju data je kao:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (5)$$

Sve prethodno navedene relacije važe za dvoparametarski oblik Weibullove distribucije, koji je izveden iz troparametarskog oblika [7].

Zahvaljujući svojoj svestranosti, Weibullova distribucija široko se koristi u pouzdanosti i analizi životne dobi. Ovisno o vrijednosti njezinih parametara, Weibullova distribucija može se primijeniti za modeliranje različitih životnih ponašanja.

4.2. Procjena parametara Weibullove distribucije – metoda maksimalne vjerodostojnosti

Metoda maksimalne vjerodostojnosti (*Maximum Likelihood Estimation* – MLE) je zbog svojih izrazito povoljnih svojstava često korišten postupak [8]. Detaljan se opis i princip rada metode ovdje neće navoditi, nego će akcenat biti stavljen na njenu primjenu. Za detaljnije upoznavanje pogledati [6]–[9]. Metoda MLE ima mnogo svojstava koja ju čine atraktivnom za primjenu. Asimptotski je konzistentna, što znači da kada raste veličina uzorka procjene konvergiraju k pravim vrijednostima. Također, metoda je asimptotski nepolarizirana, odnosno kod velikih uzoraka se, u prosjeku, mogu očekivati prave vrijednosti.

Nažalost, za postizanje naprijed navedenih svojstava nužna je prilično velika dimenzija uzorka – trideset do pedeset, do više od stotine egzaktnih vremena do kvara, ovisno o aplikaciji. Poznato je, naprimjer, da su u slučaju malih uzoraka MLE procjene parametara oblika za Weibullovu distribuciju jako polarizirane, što može prouzročiti nesaglasnosti prilikom analize.

Međutim, još jedna prednost MLE je ta što je u stanju operirati sa suspendiranim i intervalnim podacima, posebno kad imamo posla s jako cenzuriranim skupom podataka [9].

Podaci o životnoj dobi mogu biti kompletni, desno cenzurirani, intervalno cenzurirani i lijevo cenzurirani. Kompletni podaci se odnose na slučajeve kada jedinice koje su bile podvrgnute testu dožive kvar i kada je vrijeme do kvara poznato. Desno cenzurirani podaci, također nazivani suspendirani podaci, sastoje se iz jedinica koje tokom provođenja testa nisu doživjele kvar.

Budući da je čest slučaj da izlazak bloka iz pogona nije uzrokovan kvarom, nego npr. nemogućnošću plasiranja energije ili planiranim održavanjem, dolazi se do mnoštva desno cenzuriranih podataka. Vrijeme ulaska u pogon je uvijek poznato, tako da se svi podaci koji se analiziraju u ovom radu mogu svrstati u kompletne i desno cenzurirane.

U slučajevima kada se ima mnogo cenzuriranih podataka i kada je prisutna velika disproporcija u intervalima i/ili kada je dimenzija uzorka dovoljna, preferira se primjena MLE metode.

Za obradu podataka iskorišten je programski paket MATLAB. Određivanje parametara Weibullove distribucije može se izvršiti funkcijom `wblfit(data,alpha,censoring)` koja koristi MLE metodu. Funkcija uobziruje, osim kompletnih, i desno cenzurirane podatke.

4.3. Obrada podataka

Iz dostupnih podataka su za svaki blok posebno izdvojena vremena od ulaska do izlaska bloka iz pogona u 2012. i 2013. godini. Razlikujemo dvije vrste izlaska iz pogona – izlazak uslijed kvara i planirani izlazak zbog problema u radu, redovnog održavanja ili viška električne energije. U slučaju kada dođe do kvara, vrijeme pogona može se posmatrati kao kompletan podatak. Izlazak koji nije uzrokovan kvarom može se posmatrati kao desno cenzurirani podatak, jer vrijeme kvara nije poznato, odnosno jer bi se kvar desio u vremenu nakon izlaska bloka iz pogona. Radi lakšeg pregleda, polja označena zelenom bojom predstavljaju desno cenzurirane, a polja označena crvenom kompletne podatke. Također, zbog sintakse MATLAB funkcije `wblfit`, u drugoj koloni tabela je navedeno cenzuriranje, gdje su sa "0" označeni kompletni, a sa "1" desno cenzurirani podaci.

Podaci o trajanju kvarova, odnosno vremenu provedenom van pogona, nisu izdvojeni jer to nije predmet analize u ovom radu. Dakle, nije bitna ozbiljnost i trajanje kvara, nego samo činjenica da se desio. Ipak, jedan kvar koji se desio tokom 2012. godine i koji je trajao manje od 15 min nije uzet u obzir, jer je to vremenski period za koji se toleriše odstupanje u proizvodnji, odnosno nije postojala mogućnost plaćanja penala u vidu tercijarne regulacije.

Jednom godišnje svaki blok bude podvrgnut redovnom održavanju u trajanju od oko mjesec dana. Tokom prvih nekoliko dana nakon završetka održavanja vrše se završna ispitivanja i podešavanja, te nije neuobičajeno da blok tada doživi nekoliko ispada iz pogona. Tako se nakon održavanja bloka G7 u TE Kakanj (TEK) desilo 7 ispada u prva dva dana. Slično, prvi dan eksploatacije nakon održavanja bloka G4 u TE Tuzla desila su se 2 ispada. Ovi podaci ne daju pravu sliku rada bloka, niti su dovoljni za analize "dječije smrtnosti", te su zato zanemareni.

Blok G6 u TE Tuzla (TET) je samo do početka maja 2012. godine bio u pogonu, nakon čega je započeta njegova rekonstrukcija. Budući da se rekonstrukcijom mijenjaju njegove karakteristike, podaci prije rekonstrukcije nisu relevantni i nisu uzeti u obzir. Blok je pušten u pogon početkom 2013. godine, pa će se analize moći provesti tek nakon što protekne dovoljan period vremena.

Za dalje bi istraživanje bilo interesantno, uz dovoljno velike uzorke prije i poslije rekonstrukcije ili nekog drugog zahvata, sprovesti analize poboljšanja operativnosti bloka, što ova distribucija omogućava. Zatim se ti podaci mogu staviti u ekonomski kontekst, te tako dobiti ocjena isplativosti investicije.

4.4. Rezultati u MATLAB-u

Koristeći programski paket MATLAB, za prethodno navedene podatke o vremenima kvarova, možemo dobiti parametre Weibullove distribucije. Koristi se slijedeća sintaksa:

```
[parmhat, parmci] = wblfit(Z, 0.05, Zc)
```

parmhat je vektor od dva elementa koji predstavljaju maksimalno vjerodostojne parametre distribucije, gdje je prvi element parametar skale, a drugi parametar oblika.

parmci je matrica 2x2 koja sadrži granične vrijednosti definisanog intervala povjerenja za tražene parametre distribucije.

Ulazni podaci funkcije wblfit su vektor vremena do kvara određenog bloka (u navedenoj sintaksi označen sa Z), zatim koeficijent intervala povjerenja (koeficijent 0,05 odgovara 95% intervalu povjerenja), te odgovarajući vektor cenzurisanosti podataka (Zc).

Za dobijene parametre sada je moguće formirati funkciju gustoće vjerovatnoće (pdf) koristeći slijedeću sintaksu:

```
f = wblpdf(t, parmhat(1), parmhat(2))
```

gdje je t unaprijed definisan vektor vremena (npr. t=0:0.1:1500).

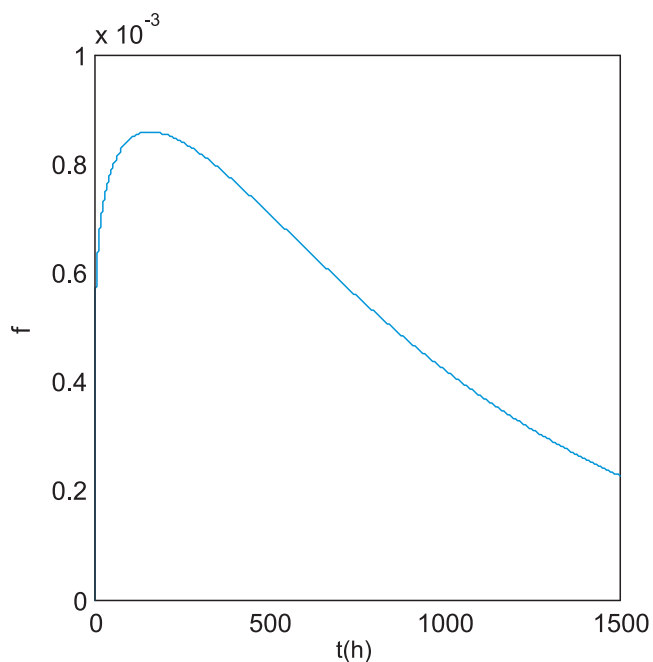
Slično, ali korištenjem funkcije wblcdf, se može dobiti funkcija kumulativne gustoće (cdf):

```
F = wblcdf(t, parmhat(1), parmhat(2))
```

Na Slici 1 i Slici 2, grafički su prikazane funkcije gustoće vjerovatnoće f (pdf) i kumulativne gustoće F (cdf) bloka G7 u TE Kakanj za proračunate parametre distribucije:

$$\eta = 895.6491, \beta = 1.1608$$

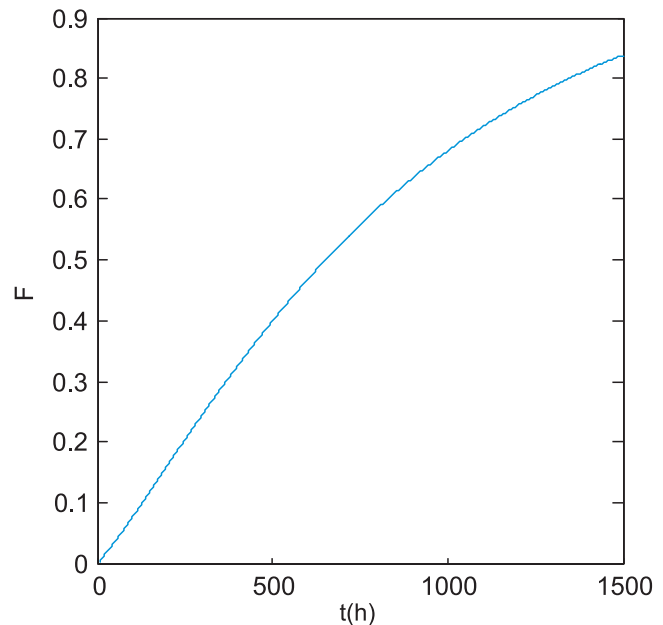
Za primjer je odabran G7 u TE Kakanj zbog veličine uzorka, a uz to i malog broja cenzuriranih podataka.



Slika 1: Funkcija gustoće vjerovatnoće f (pdf) bloka G7 u TE Kakanj

Dalje, na osnovu dobijenih rezultata, može se odrediti funkcija pouzdanosti:

$$R = 1 - F$$



Slika 2: Funkcija kumulativne gustoće F (cdf) bloka G7 u TE Kakanj

Od značaja za analizu koja je tema ovog rada je funkcija uvjetne pouzdanosti. Ova funkcija daje pouzdanost obavljanja nove misije bloka koji je prije njezinog početka već proveo izvjesno vrijeme u radu. Dakle, provjerava se sposobnost bloka da uspješno obavi misiju ispravnog pogona na bazi činjenice da je blok već akumulirao T sati uspješnog rada. Sintaksa korištena za proračun ove funkcije je napravljena na slijedeći način:

```
pom1 = (T+t)/parmhat(1)
pom2 = T/parmhat(1)
RT = exp(-(pom1.^parmhat(2) -
pom2.^parmhat(2)))
```

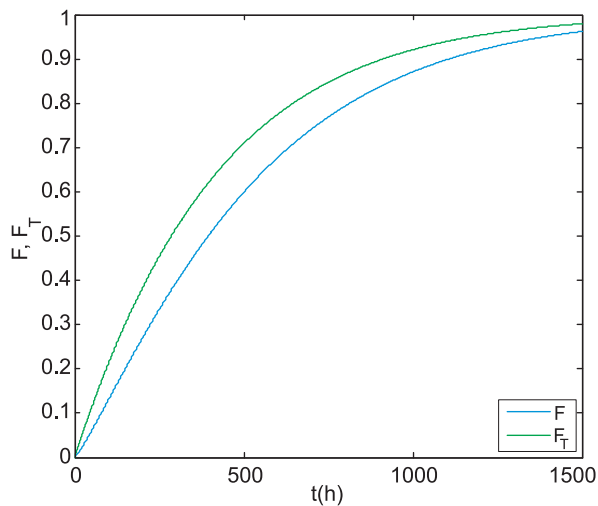
Radi načina rada MATLAB-a i bolje preglednosti, formirani su pomoćni vektori pom1 i pom2 koji su poslije uvršteni u konačni izraz za proračun uvjetne pouzdanosti.

Funkcija uvjetne nepouzdanosti se može dobiti iz relacije:

$$F_T = 1 - RT$$

Na Slici 3 su prikazane funkcije kumulativne gustoće (nepouzdanosti) i uvjetne nepouzdanosti na primjeru bloka G7 u TE Kakanj nakon što je proveo $T = 1000$ h u pogonu.

Sada je moguće odrediti vjerovatnoću ispada bloka, koji je u pogonu već T sati, u narednih x sati – jednaka je vrijednosti funkcije uvjetne nepouzdanosti $F_T(t)$ u tački $t=x$.



Slika 3: Funkcije nepouzdanosti F i uvjetne nepouzdanosti F_T ($T = 1000$ h) bloka G7 u TE Kakanj

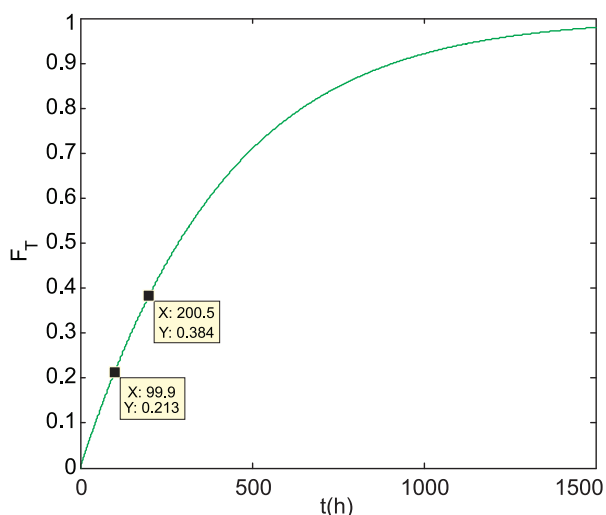
Tako, recimo, blok G7 u TE Kakanj, nakon što je u pogonu proveo $T = 1000$ h, ima vjerovatnoću ispada od 21,30% u narednih 100 h, odnosno 38,31% u narednih 200 h:

$$F^T(200/0.1) = 0.3831$$

$$F^T(100/0.1) = 0.2130$$

Da bi se dobila odgovarajuća vrijednost funkcije, argument se dijeli sa vremenskim korakom, koji je usvojen na početku proračuna. U ovom slučaju on iznosi 0,1.

Programski paket MATLAB pruža mogućnost i grafičkog određivanja vrijednosti funkcije F_T u bilo kojem trenutku, međutim zbog slabije preciznosti može se koristiti samo za ilustraciju (Slika 4).



Slika 4: Grafičko određivanje vrijednosti funkcije F_T u programskom paketu MATLAB

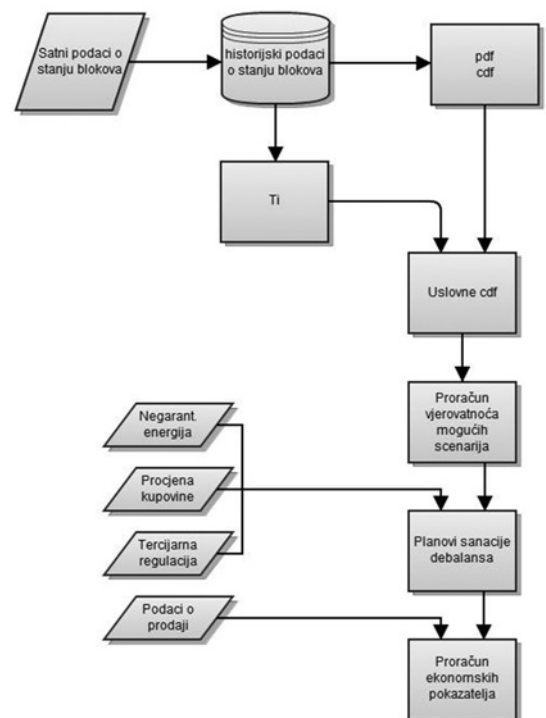
5. ALGORITAM ZA EKONOMSKU ANALIZU

Poznavajući funkcije uvjetne nepouzdanosti za sve blokove koji su u tom trenutku u pogonu, može se izračunati vjerovatnoća ispada bloka ili više njih u različitim kombinacijama tokom vremenskog perioda od interesa. Funkcije uvjetne nepouzdanosti određuju se na osnovu

ulaznih podataka o dosadašnjem radu blokova. Podaci bi se trebali svakog sata automatski dopunjavati novim, a funkcije uvjetne nepouzdanosti osvježavati na osnovu njih. Također, iz ovih podataka se može izvesti trenutno vrijeme pogona T_i svakog bloka.

S druge strane, da bi se načinila ekonomska analiza, potrebni su ulazni podaci o prodaji električne energije koja se razmatra (cijena, vremenski period). Također, potrebni su podaci o cijeni električne energije iz negarantovanih ugovora i o tercijarnoj rezervi (cijena mjesečnog zakupa i energije), kao i procjena cijene po kojoj bi se kupovala električna energija u slučaju ispada. Na osnovu ovih podataka moguće je napraviti plan sanacije debalansa nastalog ispadom bloka.

Koristeći navedene ulazne podatke i postupke, moguće je odrediti vjerovatnoću svih mogućih scenarija ispada blokova i dugoročni trošak određene *intra-day* trgovine u okviru željenog vremenskog intervala od momenta pravljenja proračuna.



Slika 5: Dijagram toka opisanog algoritma

5.1. Primjena algoritma na konkretan slučaj

Pretpostavimo da je stanje u proizvodnji kao u Tabeli III.

Tabela III: Stanje u proizvodnji u posmatranom primjeru

Blok	Snaga (MW)	Vrijeme u pogonu (h)
G5 TEK	100	500
G6 TEK	100	300
G7 TEK	200	700
G4 TET	200	100
G5 TET	200	600

Radi jednostavnijeg prikaza proračuna pretpostavljeno je da su blokovi snage ili 100 ili 200 MW, a da G3 i G6 u TE Tuzla nisu u pogonu.

Rezultati proračuna vjerovatnoća ispada u slijedećih 12 sati svih blokova pojedinačno su dati u Tabeli IV.

Tabela IV: Rezultati proračuna vjerovatnoća ispada

Blok	Snaga (MW)	Vjerovatnoća ispada u narednih 12 h (%)
G5 TEK	100	1,54
G6 TEK	100	3,42
G7 TEK	200	2,64
G4 TET	200	1,24
G5 TET	200	1,44

Potrebno je razmotriti više različitih scenarija. Neka je S_1 scenario ispada ukupno 100 MW proizvodnog kapaciteta. Do njega može doći u slučaju ispada samo G5 u TE Kakanj ili ispada samo G6 u TE Kakanj, a da su pri tom sve ostale proizvodne jedinice i dalje u pogonu. Dakle,

$$S_1 = \{(g5k, G6K, G7K, G4T, G5T), (G5K, g6k, G7K, G4T, G5T)\}$$

$$\Pr(S_1) = \Pr\{(g5k \cap G6K \cap G7K \cap G4T \cap G5T) \cup (G5K \cap g6k \cap G7K \cap G4T \cap G5T)\}$$

$$\Pr(S_1) = \Pr(g5k) \cdot \Pr(G6K) \cdot \Pr(G7K) \cdot \Pr(G4T) \cdot \Pr(G5T) + \Pr(G5K) \cdot \Pr(g6k) \cdot \Pr(G7K) \cdot \Pr(G4T) \cdot \Pr(G5T) \quad (6)$$

Usvojeno je intuitivno obilježavanje stanja blokova, gdje je malim slovima obilježeno stanje bloka van pogona, a velikim slovima stanje pogona. S obzirom na komplementarnost navedenih stanja (blok je ili u pogonu ili van pogona) vrijedi da je:

$$\Pr(G) + \Pr(g) = 1 \quad (7)$$

odnosno:

$$\Pr(G) = 1 - \Pr(g) \quad (8)$$

Koristeći proračunate vjerovatnoće ispada blokova, odnosno vjerovatnoće da budu van pogona, može se odrediti vjerovatnoća dešavanja scenarija S_1 u određenom periodu vremena. Na sličan se način mogu odrediti i vjerovatnoće pojave ostalih mogućih scenarija. U Tabeli V, date su iste i za ispad od ukupno 200 MW, 300 MW i 400 MW za period od 12 h od momenta proračunavanja.

Interesantno je analizirati dobijene rezultate s ekonomskog aspekta. Postavlja se pitanje isplativosti prodaje viška energije po određenoj cijeni, odnosno čuvanja određene količine rezerve.

Tabela V: Rezultati proračuna za četiri scenarija ispada

S	Ispad (MW)	Ispad bloka/ova (ostali u pogonu)		Vjerovatn. ispada	Vjerovatn. scenarija (%)
1	100	g5k		0,014095	4,60
		g6k		0,031912	
2	200	g5k	g6k	0,000499	4,94
		g7k		0,024436	
		g4t		0,011315	
		g5t		0,013167	
3	300	g5k	g7k	0,000382	0,25
		g5k	g4t	0,000177	
		g5k	g5t	0,000206	
		g6k	g7k	0,000865	
		g6k	g4t	0,000401	
		g6k	g5t	0,000466	
4	400	g7k	g4t	0,000307	0,08
		g7k	g5t	0,000357	
		g4t	g5t	0,000165	

Kao primjer, razmotrimo situaciju u kojoj operativno osoblje prodaje višak električne energije na dnevnom nivou (*intra-day*). Neka je količina energije koja se isporučuje 50 MWh/h, a period isporuke 14:00 – 24:00 (10 sati). Isporučka energije može početi tek nakon 2 sata od sklapanja dogovora o trgovini, tako da je proračun obavljen za narednih 12 sati, a period isporuke je 10 sati. Cijena zavisi od uslova na tržištu i u proizvodnji u okolini, ali za potrebe ove analize uzeta je cijena od 50 €/MWh. Bitno je primijetiti da u slučaju čuvanja rezerve nema ni varijabilnih troškova proizvodnje tih 50 MW viška, a za koje je u ovom primjeru pretpostavljeno da iznose 35 €/MWh za svaki blok.

Proračuni bi bili mnogo mjerodavniji kada bi se troškovi proizvodnje određivali češće od jednom godišnje, kakva je trenutna praksa, s obzirom na stalne promjene cijena energenata koji se troše u procesu proizvodnje. Čak bi bilo moguće dograditi algoritam da automatski proračunava troškove uzimajući u obzir aktuelne cijene energenata kao ulazne podatke, time dobivajući najpreciznije moguće rezultate. Međutim, za takvo nešto potrebno je promijeniti pravila i politiku unutar firme.

Tabela VI: Primjer *intra-day* trgovine

Period (h)	Količina (MWh/h)	Cijena (€/MWh)	Troškovi (€/MWh)	Profit (€)
14–24	50	50	35	7.500

Neka je proračun napravljen neposredno prije obavljanja trgovine. Prema njemu, vjerovatnoća ispada ukupno 100 MW u narednih 12 h iznosi 4,60%. Ukoliko se on zaista desi, višak energije koji je prodat ne može biti iskorišten za sanaciju nastalog debalansa u proizvodnji, već se ona

mora izvršiti angažovanjem tercijarne rezerve, kupovinom električne energije ili otkazivanjem negarantovane isporuke električne energije.

Angažovanje tercijarne rezerve od strane operatora sistema se vrši u roku od 15 min, a cijene te energije iznosi 126,34 €/MWh. Može se pretpostaviti da će angažovanje trajati najmanje 2 sata s obzirom da isporuka eventualno kupljene energije na tržištu može početi tek 2 sata nakon ugovorene trgovine. U praksi, najčešće je cijena kupovine energije mnogo viša od cijene po kojoj se vršila prodaja. U ovom proračunu je uzeto da ona iznosi 75 €/MWh. Treći korak predstavlja otkaz isporuke negarantovane energije (ako je sklopljen dugoročni ugovor ovog tipa) koji može nastupiti 4 sata nakon najave. Za cijenu ove energije je uzeto 50 €/MWh.

Tabela VII: Sanacija debalansa

Period (h)	Količina (MWh/h)	Cijena (€/MWh)	Troškovi (€/MWh)	Deficit (€)
14–16	50	126,34	-50	7.634
16–18	50	75	-50	2.500
18–24	50	50	-50	0
Σ				10.134

U proračunu je pretpostavljen najnepovoljniji slučaj gdje se ispad dešava malo prije početka isporuke energije. Za dalje istraživanje, mogao bi se napraviti model koji će uobziriti i vjerovatnoće ispada u pojedinačnim satima za određeni interval, te na osnovu toga formirati adekvatan plan sanacije debalansa i precizniji račun troška.

Naravno, ukupni troškovi sanacije debalansa bit će veći od gore navedenih jer se dešava ispad od ukupno 100 MW. Međutim, predmet razmatranja u ovom slučaju je samo višak od 50 MW, odnosno ekonomske posljedice njegove prodaje ili čuvanja u rezervi. S obzirom na to, isti račun bi se dobio i za ostale slučajeve (ispade 200 MW, 300 MW i 400 MW), uz odgovarajuće vjerovatnoće pojave tih događaja u periodu od 12 sati poslije prodaje.

Dakle, dugoročno gledano, trošak načinjen prodajom viška energije u ovom slučaju, odnosno neostavljanjem rezerve, iznosi:

$$0,046 \cdot 10.134 \text{ €} + 0,0494 \cdot 10.134 \text{ €} + 0,0025 \cdot 10.134 \text{ €} + 0,0008 \cdot 10.134 \text{ €} = 1.000,23 \text{ €}$$

Situacija je mnogo nepovoljnija u slučaju da u razmatranom periodu elektroprivredna kompanija pruža uslugu tercijarne regulacije, a da je prodani višak energije bio namijenjen upravo za slučaj angažovanja te usluge od strane operatora sistema. U slučaju ispada bloka rezerva se prioritarno angažuje od one elektroprivrede kod koje se desio ispad, pa u slučaju nepoštivanja ovog naloga kompanija gubi ukupni prihod od mjesečnog zakupa kapaciteta. Taj prihod je različit za svaki mjesec i zavisi od prijavljenih kapaciteta svih elektroprivreda, ali neka u

ovom primjeru on iznosi 200.000 €. Dakle, trošak gubitka naknade zakupa kapaciteta dugoročno iznosi:

$$(0,046 + 0,0494 + 0,0025 + 0,0008) \cdot 200.000 \text{ €} = 19.740 \text{ €}$$

Tabela VIII: Pregled rezultata analize

Prodaja	7.500 €
Sanacija debalansa	- 1.000 €
Gubitak naknade za terc. rezervu	- 19.740 €

Zaključuje se da je trošak sanacije debalansa značajan, ali da i dalje, naravno, ne dovodi u pitanje isplativost prodaje. Međutim, prilikom računanja ukupnog profita od prodaje, trebalo bi ga računati kao i svaki drugi trošak. S druge strane, evidentno je da se u slučaju pružanja usluge tercijarne regulacije, prodaja tome namijenjenog viška ne isplati, te da se isplata mjesečne naknade za zakup kapaciteta ne smije dovesti u pitanje.

Da je višak električne energije, odnosno iznos zakupljenog kapaciteta za tercijarnu rezervu, drastično veći, mogla bi se razmatrati isplativost prodaje u odnosu na rizik gubitka naknade za tercijarnu regulaciju. Međutim, ti iznosi graniče s nerealnošću, a uz to bi vjerovatno i prihod od mjesečnog zakupa bio veći od pretpostavljenih 200.000 €.

Isplativost prodaje upitna je za niže cijene koje su bliske varijabilnim troškovima rada blokova. Ponovimo prethodnu analizu za prodajnu cijenu od 38 € (zbog niže prodajne cijene pretpostavljena je i nešto niža kupovna cijena u odnosu na prvobitnu analizu):

Tabela IX: Primjer *intra-day* trgovine, 2. slučaj

Period (h)	Količina (MWh/h)	Cijena (€/MWh)	Troškovi (€/MWh)	Profit (€)
14–24	50	38	35	1.500

Tabela X: Sanacija debalansa, 2. slučaj

Period (h)	Količina (MWh/h)	Cijena (€/MWh)	Troškovi (€/MWh)	Deficit (€)
14–16	50	126,34	-38	8.834
16–18	50	70	-38	3.200
18–24	50	50	-38	3.600
Σ				15.634

$$0,046 \cdot 15.634 \text{ €} + 0,0494 \cdot 15.634 \text{ €} + 0,0025 \cdot 15.634 \text{ €} + 0,0008 \cdot 15.634 \text{ €} = 1.543,08 \text{ €}$$

Tabela XI: Pregled rezultata analize, 2. slučaj

Prodaja	1.500 €
Sanacija debalansa	- 1.543 €

Dakle, prodaja električne energije po cijeni ispod 38 € se, u datom slučaju, dugoročno ne isplati.

Bitno je napomenuti da su prethodne analize vršene bez bloka G3 u TE Tuzla u pogonu, a čiji su troškovi proizvodnje veći nego kod ostalih blokova. U suprotnom, granična cijena isplativosti bi bila nešto viša.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analizirana pouzdanost termoproizvodnih jedinica, koje su po svojoj prirodi sklone kratkoročnim kvarovima, i razmatran njihov efekat na kratkoročne ekonomske rezultate elektroprivredne kompanije.

U radu je dat prijedlog algoritma koji bi obrađivao podatke o stanju blokova u realnom vremenu i na osnovu toga određivao *pdf* i *cdf* karakteristike blokova, odnosno uslovne *cdf* karakteristike. Uz ograničenja u vidu različitih ugovora u prodaji električne energije, tercijarne rezerve, dnevnih kretanja na berzi trgovanja električnom energijom, kao konačni izlaz dobija se ekonomska analiza različitih scenarija ispada blokova za određene vremenske periode od trenutka pravljenja proračuna.

Za opis pouzdanosti blokova korištena je Weibullova distribucija, dok je za procjenu parametara distribucije korištena metoda maksimalne vjerodostojnosti (*Maximum Likelihood Estimation*). Prednost MLE je u tome što je u stanju operirati s cenzuriranim podacima, kakvih imamo mnogo o radu blokova (svaki planski izlazak iz pogona može se posmatrati kao desno cenzurirani podatak).

Za postizanje što tačnijih rezultata nužna je prilično velika dimenzija uzorka. Algoritam predložen u radu konstantno osvježava i dopunjuje uzorak, te samim ti povećava i tačnost rezultata.

Pravac daljeg istraživanja ove problematike bi mogao biti detaljno raščlanjivanje fiksnih i varijabilnih troškova u proračunima ili unaprjeđenje algoritma tako da uzima u obzir vjerovatnoće ispada u pojedinačnim satima za određeni interval, te na osnovu toga formira adekvatan plan sanacije debalansa i precizniji račun troška. Osim toga, predloženi algoritam bi bilo jednostavno modifikovati tako da daje druge izlazne podatke, odnosno da predložene ulazne podatke daje kao izlazne i obrnuto. Također, uz adekvatne podatke mogle bi se uraditi analize "dječije smrtnosti" poslije rekonstrukcije bloka, kao i analize

poboljšanja operativnosti bloka, odnosno isplativosti rekonstrukcije i drugih zahvata.

LITERATURA

- [1] Mrežni kodeks, NOS BiH, 2011.
- [2] Pomoćne usluge za 2012. godinu – procedure, NOS BiH, 2012.
- [3] Odluka o određivanju tarifa za pomoćne usluge, DERK BiH, 2011.
- [4] NIST/SEMATECH, e-Handbook of Statistical Methods, 2012.
- [5] C. Singh, Engineering Reliability: New Techniques & Applications, John Wiley & Sons, 1981.
- [6] N. Mann, R. Schafer, N. Singpurwalla, Methods for statistical analysis of reliability and life data, John Wiley and Sons, 1974.
- [7] X. Peng, P. Jirutitijaroen, A Stochastic Optimization Formulation of A Unit Commitment Problem with Reliability Constraints, IEEE Transactions on Smart Grid, Special Issue, Vol. 4, No. 4, 2200-2208, November 2013.
- [8] M. Al-Fawzan, Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution, InterStat, May 2000.
- [9] H. Harter, A. Moore, Maximum likelihood estimation of the parameters of Gamma and Weibull populations from complete and from censored samples, Technometrics, Vol. 7, No. 4, November 1965.

BIOGRAFIJA

Damir Aganović završio je prvi ciklus studija na Odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu 2008. godine, a 2010. godine i drugi ciklus studija. Trenutno pohađa treći ciklus studija (doktorski) na istom fakultetu. Zaposlen je u JP Elektroprivreda BiH kao stručni saradnik za operativno upravljanje. Područja njegovog interesovanja su operativno upravljanje proizvodnim jedinicama i distribuirani izvori električne energije.

Irfan Penava završio je prvi ciklus studija na Odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu 2008. godine, a 2010. godine i drugi ciklus studija. Trenutno pohađa treći ciklus studija (doktorski) na istom fakultetu. Zaposlen je u JP Elektroprivreda BiH kao rukovodilac službe za održavanje mreža i postrojenja. Oblasti njegovog interesovanja su pametne mreže i obnovljivi izvori energije.

Nermin Palić završio je prvi ciklus studija na Odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu 2008. godine, a 2010. godine i drugi ciklus studija. Trenutno pohađa treći ciklus studija (doktorski) na istom fakultetu. Zaposlen je u JP Elektroprivreda BiH kao stručni saradnik za elektroodržavanje. Područje njegovog interesovanja su nove strukture i funkcije zaštite i automatike EES.