

MODELOVANJE NAPONSKI OVISNE POTROŠNJE NA OSNOVU EKSPERIMENATA U EES-U BIH

MODELLING OF VOLTAGE DEPENDENT LOAD BASED ON THE EXPERIMENTS IN EPS OF BIH

Ernad Jabandžić¹, Tatjana Konjić², Lidija Korunović³

Sažetak: Modelovanje naponski ovisne potrošnje je tema koja je uvijek aktuelna zbog toga što je adekvatni model opterećenja polazni osnov za proračun ustaljenih stanja i za analizu prijelaznih režima elektroenergetskog sistema. Imajući u vidu potrebu i značaj poznavanja parametara modela došlo se na ideju da se mjerenja obave u elektroenergetskom sistemu Bosne i Hercegovine (EES BiH). Cilj je ustanoviti da li se vrijednosti snage potrošnje dobijene eksperimentima promjene napona u dijelu EES-a BiH mogu predstaviti najčešće korištenim statičkim modelima potrošnje. U radu su opisani ovi modeli, prezentovane su reprezentativne srednje karakteristike i određeni koeficijenti samoregulacije aktivne i reaktivne snage za zimsku i ljetnu sezonu.

Ključne riječi: modelovanje potrošnje, mjerenje u elektroenergetskom sistemu, parametri statičkog modela potrošnje, distributivna mreža

Abstract: Modelling of voltage dependent load is a continuously current topic due to the fact that adequate load model is a starting point for the calculation of stationary state and for the analysis of transient regimes of power systems. Taking into the account the need and importance of knowing the parameters of load models, the idea is to perform the measurements in electric power system of Bosnia and Herzegovina (EPS of BiH). The aim is to determine whether it is possible to present the values of load power obtained by experiments of voltage changes in the part of the EPS of BiH by most frequently used static load models. This paper describes these static load models, presents the representative mean characteristics and determines the voltage exponents of real and reactive power for winter and summer seasons.

Keywords: load modelling, measurement in power system, parameters of static load model, distribution network

UVOD

Modelovanje naponski ovisne potrošnje je polazni osnov za proračun ustaljenih stanja i za analizu prijelaznih režima u elektroenergetskom sistemu. Zbog svoje aktuelnosti, modelovanje potrošnje već duže vrijeme zaokuplja pažnju svjetske naučne javnosti. Kao rezultat toga razvijeni su brojni statički i dinamički modeli potrošnje. Složenost modela potrošnje zavisi od sastava potrošnje, vrste pojava koje se žele analizirati i zahtijevane tačnosti izlaznih rezultata.

Statička potrošnja se modeluje statičkim karakteristikama aktivne i reaktivne snage po naponu i frekvenciji u nekom vremenskom trenutku. Najčešće korišteni statički modeli potrošnje su: polinomski ZIP model, eksponencijalni model, linearni model i njihove kombinacije. Korištenje statičkih modela potrošnje je opravdano kada je odziv opterećenja na promjenu napona brz pa se ustaljeno

stanje postiže nakon veoma kratkog intervala, kao i u slučajevima kada razmatranje dinamike nije od interesa.

Postoji mnogo slučajeva kada je potrebno uzeti dinamiku komponenti potrošnje, naprimjer kada je odziv opterećenja na promjenu napona relativno spor. Tada se koriste dinamički modeli potrošnje. Postoji nekoliko dinamičkih modela potrošnje: eksponencijalni dinamički model, dinamički model asinhronog motora i složeni model potrošnje.

Za pravilno modelovanje potrošnje neophodan je pravilan izbor modela i pravilna identifikacija parametara modela. Izbor pravilnog modela potrošnje za mjerenja u elektroenergetskoj mreži opisan je u [1], [2], pri čemu je autor Li u [2] ustanovio da se statički polinomski ZIP model može koristiti za potrebe analize tranzijentne stabilnosti.

Parametri modela potrošnje niskonaponskih potrošača mogu se odrediti laboratorijskim mjerenjima. Mnogo složenije je određivanje parametara potrošnje na srednjem naponu, do kojih je, također, moguće doći na osnovu mjerenja. Objavljeni su mnogi članci i studije [3-6] koji se bave modelovanjem potrošnje na osnovu mjerenja. Autori Navarro [7] i Karlsson [8] u svojim istraživanjima identifikuju parametre potrošnje, te ih razvrstavaju po

¹ Elektrotehnička škola za energetiku, Sarajevo, Bosna i Hercegovina
ernad.jabandzic@gmail.com

² Fakultet elektrotehnike, Univerzitet u Tuzli, Bosna i Hercegovina

³ Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Republika Srbija
Rad dostavljen: april.2015. Rad prihvaćen: juni 2015.

sezonom. Identifikovani parametri modela potrošnje predstavljani su pojedinačnim vrijednostima koje se u nekim slučajevima prilično razlikuju između dva susjedna eksperimenta zbog utjecaja smetnji [9].

Korunović u [10] pored ostalog daje opsežnu statističku obradu identifikovanih parametara dinamičkog modela potrošnje, te na osnovu toga dobija reprezentativne karakteristike potrošnje. U toj disertaciji je također razvijen detaljan postupak za dobijanje reprezentativnih statičkih karakteristika, a statičke karakteristike tranzijentnog perioda i ustaljenog stanja posebno su prezentovane.

Da bi se ustanovilo koliko je odstupanje pojedinih modela potrošnje od izmjerenih vrijednosti na primjeru potrošačkog čvora u EES-u BiH, izvršeni su eksperimenti u TE Tuzla na TM1 transformatoru 110/35/10 kV s promjenljivim prijenosnim odnosom koji se, osim automatski, može mijenjati i ručno. Eksperimenti ručnog mijenjanja prijenosnog odnosa izvršeni su u ljetnoj i zimskoj sezoni. Pri tome se napon na sekundaru transformatora mijenjao u granicama od 0,96 do 1,07 p.u., te su snimane karakteristike zavisnosti snage od napona. Na osnovu tako dobijenih odnosa između snage i napona izvršeno je modelovanje ekvivalentne potrošnje razmatranog čvora, te je urađena usporedba karakteristike dobijene modelovanjem i izmjerenih vrijednosti. Na osnovu rezultata nekoliko eksperimenata dobijene su srednje karakteristike zavisnosti aktivne i reaktivne snage od napona za zimsku i ljetnu sezonu.

Rad je koncipiran na sljedeći način: poglavlje 1. daje opis najčešće korištenih statičkih modela potrošnje; poglavlje 2. opisuje način vršenja eksperimenata u realnoj distributivnoj mreži; u poglavlju 3. prezentovani su parametri statičkog modela potrošnje na 35 kV strani transformatora; u poglavlju 4. predstavljene su srednje karakteristike potrošnje na 35 kV strani transformatora; u poglavlju 5. su izvedeni zaključci.

1. STATIČKI MODELI POTROŠNJE

Ukupna potrošnja svakog čvora elektroenergetske mreže može se analizirati na osnovu podataka o učešću pojedinih kategorija u ukupnoj potrošnji čvora i udjela pojedinih komponenti potrošnje u svakoj od kategorija potrošnje [3]. Postoje tri osnovne kategorije potrošnje: stambena potrošnja, komercijalna (trgovačka) potrošnja i industrijska potrošnja. Jedna od najčešće korištenih podjela komponenti potrošnje je na termičku potrošnju, osvjetljenje i asinhronu motore [4]. IEEE TF [11] je dao detaljnu kategorizaciju komponenti potrošnje i to na osnovu odziva potrošnje na promjenu napona. Naprimjer, termička potrošnja je dominantna komponenta stambene potrošnje i približno je konstantne otpornosti.

Način modelovanja naponski ovisne potrošnje zavisi prije svega od sastava potrošnje, i od svrhe upotrebe modela. Tako se za statičku potrošnju (koju čine elektrotermički

uređaji, osvjetljenje, stambena potrošnja, odnosno potrošnja u koju nisu uključeni veliki asinhroni motori niti elektromotorni pogoni) i kada razmatranje dinamike nije od interesa koriste statički modeli potrošnje. Ovi modeli izražavaju karakteristike aktivne snage, P , i reaktivne snage, Q , opterećenja u bilo kojem vremenskom trenutku kao algebarske funkcije amplitude napona, U , i frekvencije, f , u tom trenutku [6]:

$$P = f_p(U, f) \quad (1)$$

$$Q = f_q(U, f) \quad (2)$$

Zavisnost od frekvencije često se zanemaruje budući da se napon mreže obično mnogo više mijenja od frekvencije. U nastavku je dat pregled najčešće korištenih statičkih modela potrošnje.

1.1. Eksponencijalni statički model potrošnje

Najčešće korišten statički model potrošnje je eksponencijalni model u kojem su zavisnosti aktivne i reaktivne snage od frekvencije zanemarene [19],

$$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \quad (3)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} \quad (4)$$

gdje su:

P_n i Q_n - aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri nazivnom naponu U_n ,

k_{pu} i k_{qu} - koeficijenti samoregulacije (osjetljivosti) aktivne i reaktivne snage po naponu, respektivno.

1.2. Polinomski model drugog reda

Polinomski model drugog reda, odnosno polinomski ZIP model je također statički model. Postoji nekoliko varijanti ovog modela. Varijanta u kojoj se zavisnost od frekvencije ne uzima u obzir je [20]:

$$P = P_n \left[p_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + p_3 \right] \quad (5)$$

$$Q = Q_n \left[q_1 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + q_2 \left(\frac{U}{U_n} \right) + q_3 \right] \quad (6)$$

gdje su:

p_1 i q_1 - parametri koji predstavljaju relativna učešća opterećenja konstantne impedanse u ukupnom opterećenju,

p_2 i q_2 - parametri koji predstavljaju relativna učešća opterećenja konstantne struje u ukupnom opterećenju,

p_3 i q_3 - parametri koji predstavljaju relativna učešća opterećenja konstantne snage u ukupnom opterećenju.

1.3. Linearni model

U literaturi [12] opisan je linearni model. Ovaj model se uglavnom koristi za male promjene napona u okolini njegove nazivne vrijednosti:

$$P = P_n + \alpha(U - U_n) \quad (7)$$

$$Q = Q_n + \beta(U - U_n) \quad (8)$$

gdje su:

α i β - koeficijenti proporcionalnosti.

2. OPIS IZVRŠENIH EKSPERIMENTATA

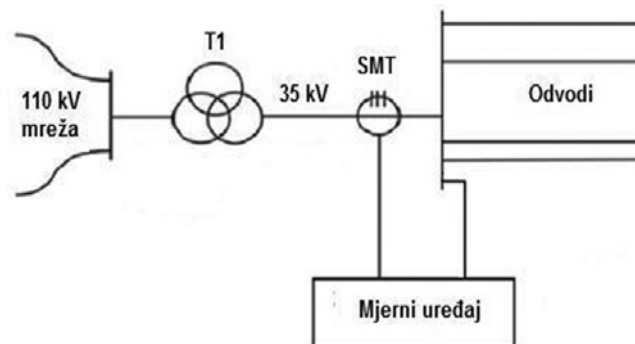
Metodom koja je bazirana na mjerenjima može se doći do parametara modela potrošnje. Do istih se dolazi kontinualnim mjerenjima kojim se prikupljaju podaci iz radnih režima ili periodičnim mjerenjima za vrijeme vršenja eksperimenata u elektroenergetskom sistemu. Posljednjih godina moguće je primijetiti trend porasta istraživanja o modelovanju naponski ovisne potrošnje baziranih na podacima koji odgovaraju normalnim radnim režimima. Tome je doprinijelo usavršavanje mjerne opreme koja može prikupljati i/ili obrađivati veliku količinu podataka. Pored toga, uvođenjem standarda koji su vezani za kvalitet električne energije i uvođenjem deregulisanog tržišta električne enegije, smanjuje se mogućnost izvođenja eksperimenata u elektroenergetskom sistemu.

Najveći broj eksperimenata izvršenih radi modelovanja potrošnje sastojao se u mijenjanju prijenosnog odnosa regulacionog transformatora [13]. Ukupna promjena napona koja je na ovaj način dobijena sastoji se od niza koračnih promjena napona koje odgovaraju svakom od uzastopnih položaja regulatora napona.

Kako je rečeno u Uvodu, eksperimenti potrebni za izradu ovog rada izvršeni su u TE Tuzla, na TM1 transformatoru 110/35/10 kV s promjenljivim prijenosnim odnosom koji se može mijenjati bilo ručno, bilo automatski, a čija je instalirana snaga 40 MVA. U cilju utvrđivanja konkretnih parametara najčešće korištenih statičkih modela potrošnje izvršeno je nekoliko vrsta mjerenja. Mjerenja su obuhvatala snimanje napona i snaga (aktivne i reaktivne) tokom promjene napona transformatora. Promjene napona na sekundaru transformatora bile su u opsegu od 0,96 do 1,07 p.u. Promjena napona u okviru navedenih granica vršena je zbog toga da se ne bi narušili uslovi vezani za kvalitet napona najudaljenijih potrošača u posmatranoj mreži.

Na Slici 1 prikazana je shema mjerenja na 35 kV strani transformatora TM1 čiji je prijenosni odnos $115 \pm 10 \times 1,5\%/36,75/6,3$ kV. Za ova mjerenja korišten je mjerni uređaj Fluke 434 [14] koji je vezan preko naponskog mjernog transformatora prijenosnog odnosa 35/0,1 kV i strujnog mjernog transformatora 500/5A. Uređaj ima vrijeme usrednjavanja 500 ms i bilježi, između ostalog, srednje

vrijednosti napona i proračunate srednje vrijednosti aktivne i reaktivne snage, te ispisuje navedene veličine u obliku trend karakteristika.



Slika 1: Shema mjerenja na 35 kV strani transformatora TM1 u TE Tuzla

Eksperimenti promjene prijenosnog odnosa u ljetnoj sezoni su urađeni u utorak 9.7.2013. godine, a također i u zimskoj sezoni u utorak 14.1.2014. godine. U periodu vršenja eksperimenata u ljetnoj sezoni temperatura se kretala od 22 do 29 °C, vrijeme je bilo suho i bez padavina. U periodu zimskih eksperimenata vrijeme je također bilo suho i bez padavina, a temperatura se kretala od -1 do 5 °C.

S transformatora TM1 u TE Tuzla dijelom se napajaju industrijski potrošači, dijelom stambeni potrošači i ostala potrošnja. Na dan vršenja eksperimenata, s transformatora su napajani industrijski potrošači: Rudnik soli Tušanj, Solana Tuzla, Dita Tuzla i Cementara Lukavac. Osim industrijskih potrošača s ovog transformatora se napajaju i prigradska naselja koja nemaju daljinsko grijanje, a to su: Ljubače, Bukinje, Lipnica, Dobrnja i Tinja. Drugi potrošači, koji se ubrajaju u ostalu potrošnju, a koji se napajaju s ovog transformatora su: Univerzitet u Tuzli, Univerzitetski klinički centar Tuzla, zgrada Općine Tuzla, hoteli, tržni centri i drugi slični potrošači.

Na osnovu utroška električne energije na godišnjem nivou za 2013. godinu izračunata je potrošnja po kategorijama. Ukupan utrošak električne energije u 2013. godini za transformator TM1 u TE Tuzla iznosio je 188.966.371 kWh. Od ukupne potrošnje udio stambene potrošnje iznosi 74.682.758 kWh što je 39,52%, udio industrijske potrošnje je 85.193.784 kWh što je 45,08% , a udio ostale potrošnje je najmanji i iznosi 29.089.829 kWh, odnosno 15,40%.

Svi su eksperimenti izvršeni u periodu od 11 do 15 sati. Snaga je imala brze slučajne promjene koje su posljedica uključenja i isključenja manjih potrošača, kao i veće promjene koje su karakteristika dnevnog dijagrama opterećenja. Utjecaj promjene opterećenja na određivanje parametara modela potrošnje je smanjen izborom onih vremenskih intervala za vršenje eksperimenata kada se potrošnja relativno malo mijenjala, dok su se slučajne

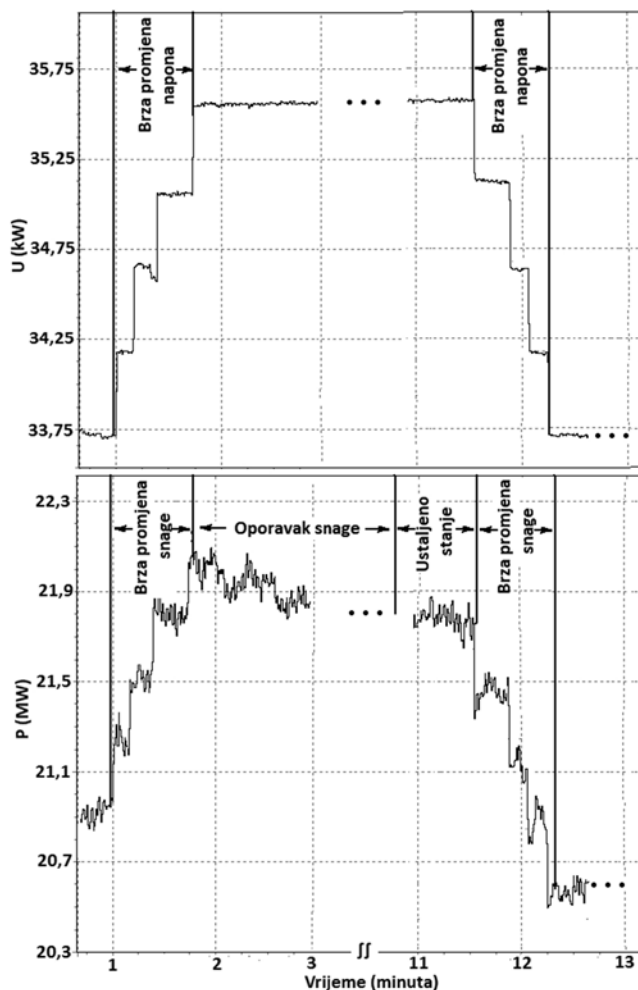
promjene opterećenja prilikom određivanja ovih parametara tretirale kao bijeli šum.

3. PARAMETRI STATIČKOG MODELA POTROŠNJE

U ovom odjeljku analizirane su tranzijentne i stacionarne zavisnosti aktivne i reaktivne snage od napona dobijene na osnovu eksperimenata povećanja i smanjenja napona transformatora. Eksperimenti su vršeni tako da se napon na sekundaru mijenjao za oko 0,35 kV (0,01 p.u.) gore/dolje u granicama 0,96 do 1,07 p.u. Analizirane su zavisnosti aktivne i reaktivne snage od napona dobijene na osnovu svih eksperimenata povećanja i smanjenja napona, u ljetnoj i zimskoj sezoni. Osim toga, analizirana je adekvatnost upotrebe različitih modela potrošnje.

Promjene aktivne snage tokom dvaju uzastopnih eksperimenata promjene napona predstavljene su na Slici 2. Inače, svaki proces promjene aktivne (i reaktivne) snage s promjenom napona detaljno je istražen na način da je cjelokupan proces podjeljen u tri faze:

- brza promjena napona i snage (tranzijentna faza) - faza u kojoj snaga prati promjenu napona koji se mijenja u koracima, pri čemu svaki korak traje nekoliko sekundi usljed inercije regulatora napona. Ova faza se završava posljednjim korakom kojim se uspostavlja nova vrijednost napona.



Slika 2: Odziv snage na promjene napona

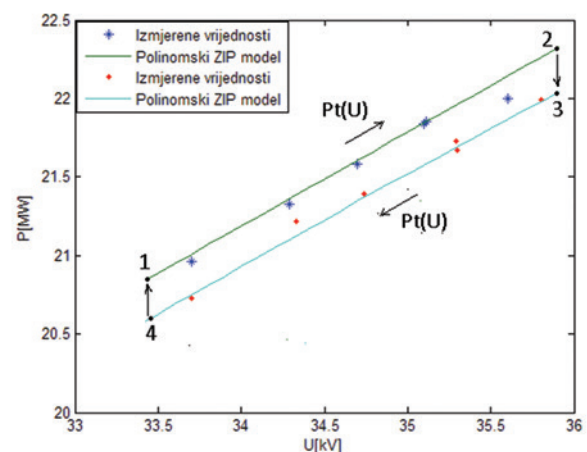
- oporavak snage - faza dugog oporavka snage koji počinje uspostavljanjem nove vrijednosti napona, a završava se ulaskom snage u ustaljeno stanje i
- ustaljeno stanje.

U ovom radu prikazani su rezultati analize tranzijentne faze i ustaljenog stanja.

Tranzijentna faza promjene snage s promjenom napona modelovana je polinomskim modelom drugog reda (ZIP modelom), eksponencijalnim modelom i linearnim modelom. Ustaljeno stanje je opisano matematičkom relacijom između snage i napona nakon ulaska snage u ustaljeno (stacionarno) stanje. I kod tranzijentne faze i kod faze ustaljenog stanja cilj je bio utvrditi koji je od nabrojanih modela (ZIP, eksponencijalni ili linearni model) najbolji za modelovanje i kakvi su parametri ovih modela u različitim režimima rada mreže.

3.1. Analiza tranzijentnih karakteristika

Na Slici 3 prikazane su promjene aktivne snage u zavisnosti od napona u P-U ravni, u toku dvaju uzastopnih eksperimenata povećanja i smanjenja napona. Prva promjena je povećanje napona s vrijednosti 33,708 kV na 35,563 kV, a druga promjena je smanjenje napona s vrijednosti 35,679 kV na 33,789 kV. Tačka 1 odgovara stacionarnom stanju prije poremećaja. Brzi tranzijentni proces u kome se mijenjaju napon i snaga odvija se po tranzijentnoj krivi $P_t(U)$, od tačke 1 do tačke 2. Ova krivaj je dobijena fitovanjem izmjerenih vrijednosti polinomiima drugog reda po metodi najmanjih kvadrata [15]. Radna tačka 2 je nestabilna zbog nejednakosti snage izvora i potrošnje. Tada slijedi proces oporavka aktivne snage pri približno konstantnom naponu, od tačke 2 do tačke 3. Novo stacionarno stanje postiže se u tački 3. Povratak u staro stacionarno stanje (tačka 1) odvija se najprije od tačke 3 do tačke 4 po tranzijentnoj karakteristici, a potom od tačke 4 do tačke 1, pri konstantnom naponu uz oporavak aktivne snage.



Slika 3: Izmjerene vrijednosti tokom niza od dvaju uzastopnih eksperimenata povećanja i smanjenja napona i odgovarajuće $P_t(U)$ karakteristike

Relacijama (9) i (10) date su tranzijentne karakteristike aktivne snage u polinomskom obliku koje opisuju ponašanje potrošnje tokom povećanja i smanjenja napona, respektivno:

$$P_f(U) = -0,0017 \cdot U^2 + 0,7155 \cdot U - 1,1745 \quad (9)$$

$$P_f(U) = -0,009 \cdot U^2 + 1,2118 \cdot U - 9,8676 \quad (10)$$

koje su dobijene primjenom metode najmanjih kvadrata.

Na analogan način na osnovu ista dva uzastopna eksperimenta porasta i smanjenja napona dobijene su tranzijentne karakteristike reaktivne snage koje opisuju ponašanje potrošnje tokom povećanja i smanjenja napona, respektivno:

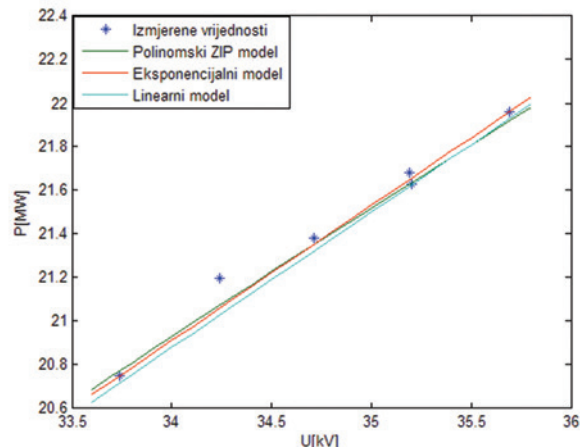
$$Q_f(U) = 0,0072 \cdot U^2 + 0,5080 \cdot U - 20,2875 \quad (11)$$

$$Q_f(U) = 0,0790 \cdot U^2 - 4,4010 \cdot U + 63,5236 \quad (12)$$

U relacijama (9)-(12) napon je u kV, a aktivna i reaktivna snaga u MW i MVar, respektivno. Koeficijent uz kvadratni član je mali u odnosu na druga dva koeficijenta, što je slučaj i kod drugih tranzijentnih karakteristika aktivne i reaktivne snage dobijenih na osnovu eksperimenata. Međutim, pokazuje se da kvadratni član nije zanemarljiv. Naprimjer, koristeći ZIP model iz jednačine (10) u slučaju postojanja kvadratnog člana za napon 35 kV snaga iznosi 21,52 MW, dok za isti iznos napona u slučaju zanemarenja kvadratnog člana snaga je 32,54 MW. Sličan se odnos vrijednosti snage sa i bez kvadratnog člana dobije i za ostale vrijednosti napona. Analizom relacija također se može ustanoviti da je nagib tranzijentnih karakteristika reaktivne snage veći od nagiba tranzijentnih karakteristika aktivne snage, tj. da je u tranzijentnoj (prvoj) fazi promjena reaktivne snage s promjenom napona veća u odnosu na promjenu aktivne snage s promjenom napona. Ova osobina reaktivne snage potrošnje je veoma bitna za stabilnost napona u elektroenergetskom sistemu, jer su napon i reaktivna snaga u jednom EES-u u čvrstoj međusobnoj vezi. Ako u okolini stabilne radne tačke jednog EES-a dođe do povećanja napona, doći će do značajnog porasta reaktivnog opterećenja većeg od porasta generisane reaktivne snage, što uzrokuje smanjenje napona, čime će se sistem vratiti u ravnotežno stanje [16]. Obrnuto, ako napon u sistemu padne, reaktivno opterećenje će se smanjiti više nego reaktivna generisana snaga, što će dovesti do porasta napona i vraćanja sistema u ravnotežno stanje.

Da bi se dobio odgovor na pitanje koji je od najčešće korištenih statičkih modela najbolji za modelovanje razmatranog opterećenja ispitane su sve tranzijentne karakteristike aktivne i reaktivne potrošnje u ljetnoj i zimskoj sezoni za povećanje i smanjenje napona. Primjera radi, na Slici 4 prikazane su polinomska, eksponencijalna i linearna tranzijentna karakteristika aktivne potrošnje u

ljetnoj sezoni za slučaj smanjenja napona od vrijednosti 35,69 kV do 33,74 kV.



Slika 4: $P_f(U)$ karakteristike pri smanjenju napona sa 35,69 kV na 33,74 kV

Sa Slike 4 vizuelno je nemoguće ustanoviti koja od karakteristika je najbliža izmjerenim vrijednostima. Iz tog razloga je urađena statistička analiza usporedbe položaja karakteristika u odnosu na položaj tačaka dobijenih mjerenjem.

Rezultati korelacione analize pokazali su da su vrijednosti dobijene mjerenjem i vrijednosti dobijene modelovanjem u pozitivnoj i jakoj korelaciji. Statističkom analizom t-test došlo se do zaključka da ne postoje statistički značajne razlike između izmjerenih vrijednosti i pojedinih modela.

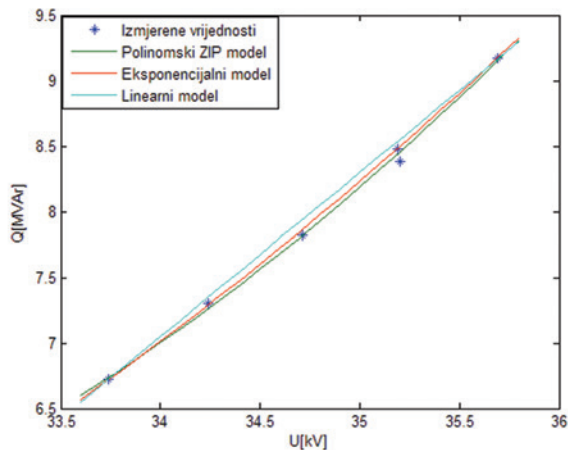
Osim korelacione analize i t-test analize urađena je i srednja vrijednost odstupanja modela od izmjerenih vrijednosti. Srednja vrijednost odstupanja je aritmetička sredina apsolutnih vrijednosti odstupanja dobijenih modelovanjem od izmjerenih vrijednosti.

Srednja vrijednost odstupanja urađena je za sve modele. Analizom je dobijeno da je srednja vrijednost odstupanja za polinomski ZIP model 0,0383 MW, za eksponencijalni model 0,1267 MW i za linearni model 0,085 MW. Odavdje se da zaključiti da je srednja vrijednost odstupanja najmanja za polinomski ZIP model što znači da su vrijednosti dobijene ovim modelom najbliže izmjerenim vrijednostima. Relacija (10) predstavlja polinomski ZIP model sa Slike 4, a relacijama (13) i (14) date su karakteristike eksponencijalnog i linearnog modela, respektivno:

$$P_f(U) = 21,96 \cdot \left(\frac{U}{35}\right)^{1,0087} \quad (13)$$

$$P_f(U) = 21,5 + 0,6207 \cdot (U - 35) \quad (14)$$

Na Slici 5 prikazane su polinomska, eksponencijalna i linearna tranzijentna karakteristika reaktivne potrošnje u ljetnoj sezoni za slučaj smanjenja napona od vrijednosti 35,69 kV do 33,74 kV.



Slika 5: $Q_r(U)$ karakteristike pri smanjenju napona sa 35,69 kV na 33,74 kV

Statističkom analizom podataka i ovdje se došlo do zaključka da se vrijednosti polinomskog ZIP modela najbolje poklapaju s izmjerenim vrijednostima, jer je srednja vrijednost odstupanja za polinomski ZIP model 0,0083 MVar, za eksponencijalni model ona iznosi 0,015 MVar, a za linearni model 0,1516 MVar. Polinomski ZIP model sa Slike 5 je

$$Q_r(U) = 0,1253 \cdot U^2 - 7,4616 \cdot U + 115,85 \quad (15)$$

a eksponencijalni i linearni model su opisani relacijama (16) i (17), respektivno:

$$Q_r(U) = 9,17 \cdot \left(\frac{U}{35}\right)^{5,532} \quad (16)$$

$$Q_r(U) = 8,3 + 1,25 \cdot (U - 35) \quad (17)$$

Na osnovu navedenog zaključuje se da je modelovanje snage opterećenja razmatranog čvora, u ispitivanom opsegu napona, najtačnije polinomskim modelom, ali se mogu koristiti i jednostavniji modeli, tj. modeli sa manjim brojem parametara. Kod aktivne snage to su najprije linearni, a potom i eksponencijalni model, uz srednje vrijednosti odstupanja koje su reda veličine nekoliko promila vrijednosti aktivne snage. U slučaju reaktivne snage, kod primjene eksponencijalnog modela srednja vrijednost odstupanja je približno dva promila izmjerene reaktivne snage, a kod primjene linearnog nešto veća – aproksimativno dva posto.

3.2. Analiza karakteristika ustaljenog stanja

Statičke karakteristike ustaljenog stanja odgovaraju nizu tačaka u ustaljenom stanju koje su dobijene iz više uzastopnih eksperimenata. Da bi se dobile P-U karakteristike potrošnje ustaljenog stanja analizirani su naponi i njima odgovarajuće snage nakon dovoljno dugih vremenskih intervala poslije svakog od eksperimenata kada se smatra da je snaga ušla u ustaljeno stanje. Kada se snaga prestane oporavljati nakon promjene napona smatra se da je ušla u ustaljeno stanje. Na osnovu analize odziva snage iz svih izvršenih eksperimenata utvrđe-

no je da je za ulazak u ustaljeno stanje aktivne snage potrebno oko 450s i nešto manji vremenski period 400s kod reaktivne snage.

Izmjerene vrijednosti napona i snage, aktivne i reaktivne, nakon ulaska snage u ustaljeno stanje prikazane su na Slici 6 i Slici 7, respektivno.

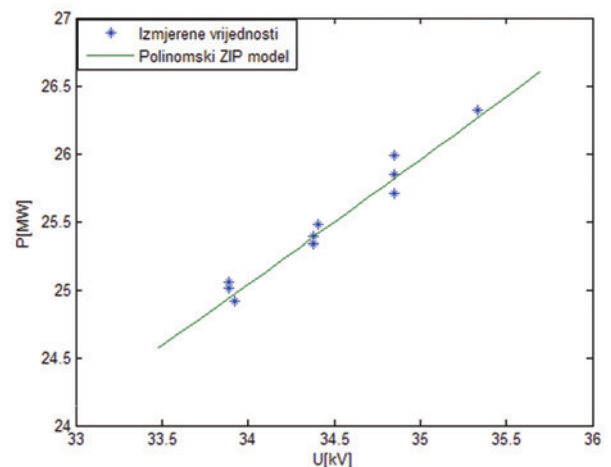
Fitovanjem izmjerenih vrijednosti polinomskim krivim po metodi najmanjih kvadrata dobiju se P-U i Q-U karakteristike ustaljenog stanja:

$$P_s(U) = 0,0087 \cdot U^2 + 0,3145 \cdot U + 4,2898 \quad (18)$$

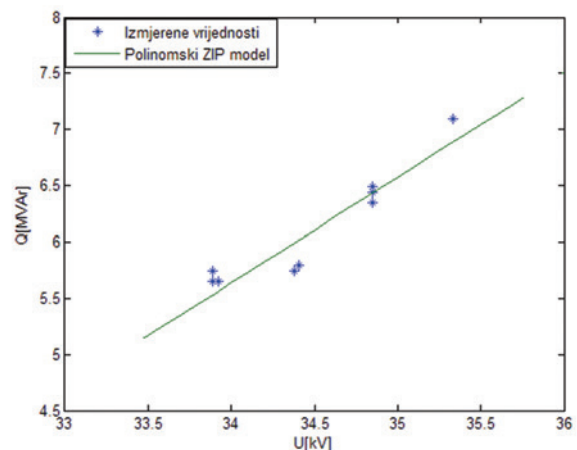
$$Q_s(U) = 0,0009 \cdot U^2 + 0,8749 \cdot U - 25,1497 \quad (19)$$

u kojima je napon u kV, a aktivna i reaktivna snaga u MW i MVar, respektivno.

Tranzijentne karakteristike se dobijaju na osnovu vremenskih intervala od približno pola minuta, jer je taj vremenski period potreban za smanjenje ili povećanje napona u koracima, unutar granica od 0,96 do 1,07 p.u. regulatorom napona koji ima svoju inerciju. Za utvrđivanje karakteristika ustaljenog stanja neophodan je duži vremenski period potreban da napon i snaga uđu u ustaljeno stanje. Zbog toga se kod utvrđivanja karakteristika



Slika 6: Karakteristika ustaljenog stanja aktivne snage



Slika 7: Karakteristika ustaljenog stanja reaktivne snage

ustaljenog stanja ima veći utjecaj slučajnih i regularnih promjena potrošnje, nego kod tranzijentnih karakteristika, usljed promjene nivoa potrošnje tokom dana.

4. SREDNJE KARAKTERISTIKE

Srednje karakteristike dobijaju se primjenom metode najmanjih kvadrata na niz ulaznih tačaka koje odgovaraju pojedinim tranzijentnim karakteristikama u određenim opsezima napona. Postupak dobijanja srednjih karakteristika ustaljenog stanja isti je kao kod srednjih karakteristika tranzijentnog stanja. Razlika je samo u izmjerenim vrijednostima napona i snage koji se u slučaju ustaljenog stanja dobijaju mjerenjem nakon dovoljno dugih vremenskih perioda kada napon i snaga uđu u ustaljeno stanje. Zbog obimnosti rada u nastavku će biti prezentovane samo srednje karakteristike tranzijentnog stanja aktivne i reaktivne snage u zimskoj sezoni.

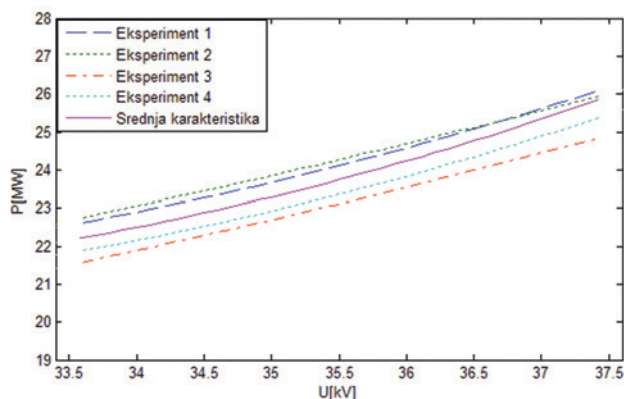
Na Slici 8 predstavljene su četiri tranzijentne karakteristike aktivne snage dobijene na osnovu četiriju eksperimenata u zimskoj sezoni, kao i odgovarajuća srednja tranzijentna karakteristika dobijena kao srednja vrijednost tranzijentnih karakteristika četiri eksperimenta. Relacijom (20) dat je matematički opis srednje karakteristike aktivne snage u zimskoj sezoni polinomskim ZIP modelom,

$$P_i(U) = 0,0771 \cdot U^2 + 4,5267 \cdot U + 87,275 \quad (20)$$

koji je validan u opsegu od 33,6 kV do 37,45 kV, tj. od 0,96 do 1,07 p.u.

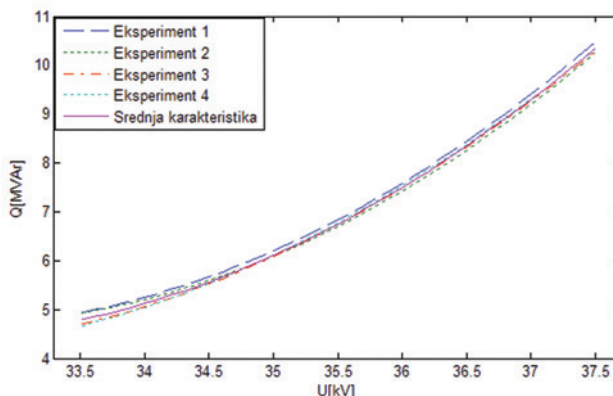
Na Slici 9 predstavljena je srednja tranzijentna karakteristika reaktivne snage u zimskoj sezoni dobijena na osnovu ista četiri eksperimenta u ovoj sezoni (kao i kod aktivne snage) koji daju odgovarajuće četiri tranzijentne karakteristike reaktivne snage prikazane na istoj slici. Relacija (21) predstavlja srednju tranzijentnu karakteristiku reaktivne snage sa Slike 9 u polinomskom ZIP modelu,

$$Q_i(U) = 0,2044 \cdot U^2 + 13,121 \cdot U + 214,95 \quad (21)$$



Slika 8: Četiri tranzijentne karakteristike aktivne snage u zimskoj sezoni i odgovarajuća srednja tranzijentna karakteristika

validnom također za napone od 0,96 do 1,07 p.u., a koja je dobijena na isti način kao i srednja tranzijentna karakteristika aktivne snage.



Slika 9: Četiri tranzijentne karakteristike reaktivne snage u zimskoj sezoni i odgovarajuća srednja tranzijentna karakteristika

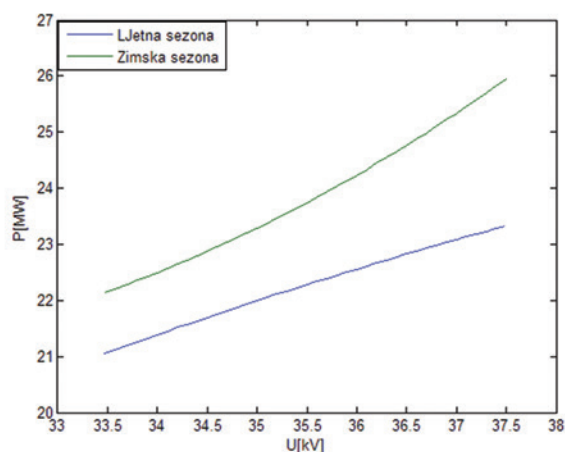
S obzirom na to da su statičke karakteristike 35 kV mreže identifikovane u obje sezone, one su u ovom radu međusobno poređene, a njihove razlike diskutovane. Koeficijenti samoregulacije za aktivnu i reaktivnu snagu računaju se na osnovu relativizovanih karakteristika aktivne i reaktivne snage, respektivno:

$$k_{pu} = \left. \frac{dP}{dU} \right|_{U=1 p.u.} \quad (22)$$

$$k_{qu} = \left. \frac{dQ}{dU} \right|_{U=1 p.u.} \quad (23)$$

Tako se na osnovu tranzijentnih karakteristika (20) i (21), nakon njihove relativizacije nominalnim naponom $U_n=35\text{kV}$ i snagom P_n i Q_n koje na osnovu ovih jednačina odgovaraju nominalnom naponu, dobijaju vrijednosti koeficijenta samoregulacije za aktivnu i reaktivnu snagu: 1,322 i 6,812, respektivno.

Poređenja radi, na Slici 10 prikazane su srednje tranzijentne karakteristike u zimskoj i ljetnoj sezoni za aktivnu snagu. Karakteristika aktivne snage u zavisnosti od napona zimske sezone nalazi se iznad karakteristike ljetne sezone, jer je potrošnja aktivne snage u zimskoj sezoni veća nego u ljetnoj. Zavisnost promjene aktivne snage s promjenom napona ovih dviju karakteristika može se opisati koeficijentom samoregulacije k_{pu} . Koeficijent k_{pu} daje procentualnu promjenu aktivne snage pri promjeni napona za 1% u okolini nazivne vrijednosti napona. Zbog toga je i naziv ovog koeficijenta - koeficijent samoregulacije aktivne snage, jer izražava značajnu karakteristiku opterećenja potrošnje, npr. smanjenjem napona u tački priključka smanjuje se i aktivna snaga koju potrošači angažuju, što ima za posljedicu efekat regulacije napona. Vrijednosti koeficijenta samoregulacije tranzijentnih karakteristika aktivne snage u ljetnoj i zimskoj sezoni su 0,9232 i 1,322, respektivno.



Slika 10: Poređenje srednjih tranzijentnih karakteristika aktivne snage

Srednje karakteristike reaktivne snage u obje sezone su također nađene i utvrđeno je da se zavisnost promjene reaktivne snage s promjenom napona može opisati koeficijentom samoregulacije reaktivne snage, k_{qu} , čija je vrijednost u ljetnoj sezoni 5,349, a u zimskoj sezoni 6,812. Ovaj koeficijent daje procentualnu promjenu reaktivne snage pri promjeni napona za 1%, u okolini nazivne vrijednosti napona.

Radi preglednosti, u Tabeli I prezentovane su vrijednosti koeficijenata samoregulacije k_{pu} i k_{qu} u zimskoj i ljetnoj sezoni dobijene ovim istraživanjem, a radi poređenja navedene su i vrijednosti istih koeficijenata iz literature [10] i [3]. Zbog usporedbe, ukupno učešće stambene potrošnje u ukupnoj potrošnji u ovom istraživanju je 39,52 %, industrijske 45,08 %, a ostale potrošnje 15,40 %, u istraživanju iz [10] sastav razmatrane potrošnje na 35 kV nivou je: 86,02 % stambena, 7,09 % industrijska i 6,89 % ostala potrošnja, dok je u literaturi [3] udio stambene potrošnje u ukupnoj potrošnji 32 %, industrijske 30 % i komercijalne 38 %.

Pokazuje se da se odgovarajući koeficijenti u dvije sezone razlikuju po vrijednosti. Naprimjer, koeficijenti tranzijentne karakteristike i karakteristike ustaljenog stanja aktivne i reaktivne snage su generalno veći u zimskoj u odnosu na ljetnu sezonu. Uzrok ovakvih razlika između istoimenih koeficijenata su različite vremenske prilike u danima zimske i ljetne sezone kada su vršeni eksperimenti koje dovode do promjene strukture potrošnje razmatranog čvora. Međusobno bliske vrijednosti odgovarajućih koeficijenata u dvije sezone identifikovane su u [10], jer su mjerenja bila izvršena u danima koji pripadaju različitim sezonama, ali su vremenske prilike bile slične. Tako su srednje vrijednosti maksimalnih dnevnih temperatura krajem marta (zimski sezona) i krajem septembra (ljetna sezona) bile 15,5 °C i 14 °C, respektivno.

Tabela I: Koeficijenti samoregulacije aktivne i reaktivne snage u zimskoj i ljetnoj sezoni

Literatura	Koeficijent samoregulacije	Tranzijentna karakteristika		Karakteristika ustaljenog stanja	
		Zima	Ljeto	Zima	Ljeto
Ovaj rad	k_{pu}	1,322	0,9232	1,3057	0,7936
	k_{qu}	6,812	5,349	6,211	5,679
[10]	k_{pu}	1,543	1,546	1,185	1,254
	k_{qu}	5,053	4,998	4,836	4,592
[3]	k_{pu}	1,21	0,78	-	-
	k_{qu}	3,88	3,29	-	-

5. ZAKLJUČAK

U ovom je radu ispitano ponašanja aktivne i reaktivne snage potrošnje jednog čvora u EES-u BiH na promjenu napona u mreži, u zimskoj i ljetnoj sezoni. Grafički je prikazano i statistički utvrđeno da se ponašanje potrošnje tokom brzih (tranzijentnih) promjena i u ustaljenom stanju može najbolje predstaviti polinomskim ZIP modelom u opsegu napona od 0,96 do 1,07 p.u., odnosno polinomski model je tačniji u poređenju s eksponencijalnim i linearnim modelom. Međutim, potrebno je naglasiti da ni eksponencijalni ni linearni model nemaju velika odstupanja od izmjerenih vrijednosti i mogu se smatrati dovoljno dobrim, pogotovo za primjene u kojima je važna jednostavnost modela.

Na osnovu četiriju izvršenih eksperimenata određene su reprezentativne srednje karakteristike aktivne i reaktivne snage u zimskoj i ljetnoj sezoni. Zaključeno je da je potrošnja aktivne snage veća u zimskoj u odnosu na ljetnu sezonu, što je očekivano. U nekim dijelovima svijeta koji su ekonomski razvijeniji ili imaju topliju klimu nivo potrošnje električne energije ljeti je veći nego zimi usljed velike upotrebe klima uređaja [17, 18]. U Bosni i Hercegovini upotreba klima uređaja je tek posljednjih godina postala masovnija, s trendom daljeg porasta, pa se usljed toga mogu očekivati promjene kako nivoa potrošnje, tako i parametara modela potrošnje.

Za sve srednje tranzijentne karakteristike i karakteristike ustaljenog stanja u zimskoj i ljetnoj sezoni određeni su koeficijenti samoregulacije koji pokazuju procentualnu promjenu snage pri promjeni napona za 1 %. Pokazano je da se istoimeni koeficijenti u dvije sezone razlikuju prema vrijednosti. Koeficijenti tranzijentne karakteristike i karakteristike ustaljenog stanja aktivne i reaktivne snage veći su u zimskoj u odnosu na ljetnu sezonu, a uzrok toga su različite vremenske prilike u danima ljetne i zim-

ske sezone, te razlike u strukturi potrošnje posmatranog čvora elektroenergetske mreže u različitim sezonama.

Na osnovu prethodno izloženog može se zaključiti da je glavni doprinos ovog rada u tome što su predstavljeni statički modeli i parametri eksponencijalnog modela za modelovanje naponski ovisne potrošnje na osnovu izvršenih eksperimenata u realnoj distributivnoj mreži Bosne i Hercegovine. Čitav postupak je urađen na osnovu već poznate metodologije, ali je ovo prvi put da se ovakva mjerenja i analize rade u elektroenergetskom sistemu Bosne i Hercegovine. Parametri određeni na ovaj način mogu se upotrijebiti u proračunima ustaljenih stanja i prijelaznih režima, kao i proračunima stabilnosti elektroenergetskih mreža čiji je sastav potrošnje sličan onom u posmatranoj mreži.

Ovaj rad je osnova za buduća istraživanja koja mogu biti nastavljena u nekoliko pravaca, kao što su određivanje parametara potrošnje u drugim čvorovima elektroenergetskog sistema Bosne i Hercegovine i u različitim danima u sedmici. Vrlo interesantna oblast je, također, i istraživanje utjecaja distribuiranih izvora električne energije na modelovanje ekvivalentne potrošnje.

LITERATURA

- [1] F.A.C. Viana, Y. Pan, S. Bose: Bayesian model selection and calibration applied to composite load identification, 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014: 1-6.
- [2] Y. Li, H.D. Chiang, B.K. Choi, Y.T. Chen, D.H. Huang, M.G. Lauby: Representative Static Load Models for Transient Stability Analysis: Development and Examination, IET Transactions on Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(3): 422-431.
- [3] J. Ribeiro, F. Lange: A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(8): 2869-2875.
- [4] L. Korunović: Analiza uticaja parametara modela potrošnje na rezultate proračuna sredjenaponskih distributivnih mreža. Magistarska teza, Elektronski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu, 2001.
- [5] C.L. Chang, P.H. Huang: Load Modeling Study using Measurement Data for Taiwan Power System, Journal of Marine Science and Technology, 2014, 22(5): 643-649.
- [6] L. Korunović: Parametri modela potrošnje distributivne mreže, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2010.
- [7] I.R. Navarro, O. Samuelsson, S. Lindahl: Automatic Determination of Parameters in Dynamic Load Models from Normal Operation Data, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003, 3: 1375-1378.
- [8] D. Karlsson, D.J. Hill: Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 157-166.
- [9] D. Stojanović, L. Korunović, J.V. Milanović: Dynamic load modelling based on measurements in medium voltage distribution network, Electric Power Systems Research, 2008, 78(2): 228-238.
- [10] L. Korunović: Modelovanje potrošnje sredjenaponske distributivne mreže na osnovu eksperimenata. Doktorska disertacija, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, 2008.
- [11] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance: Load Representation for Dynamic Performance Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 472-482.
- [12] C.W. Taylor: Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [13] Y. Baghzouz, C. Quist: Determination of Static load Models from LTC and Capacitor Switching Tests, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 1: 389-394.
- [14] Fluke 434: <http://www.fluke.com/fluke/in/en/power-quality-tools/logging-power-meters/fluke-434-series-ii-energy-analyzer.htm?PID=73937>, 2014.
- [15] Z. Drmač, M. Marušić, S. Singer, V. Hari, M. Rogina, S. Singer: Numerička analiza. PMF-Matematički odjel, Sveučilište u Zagrebu, 2003.
- [16] L.M. Korunović: Kvalitet električne energije, Elektronski fakultet u Nišu, Unigraf, Niš, 2014.
- [17] J.C. Lam, H.L. Tang, D.H.W. Li: Seasonal variations in residential and commercial sector electricity consumption in Hong Kong, Energy, 2008, 33(3): 513-523.
- [18] T.M. Lai, W.M. To: An Influence of Affluence on Electricity Consumption in an Urban Environment, 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia, 2011: 1-6.
- [19] L. Korunović, M. Rašić, N. Floranović, V. Aleksić: Load Modeling at Low Voltage Using Continuous Measurements, FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics, 2014, 27(3): 455-465.
- [20] A. Patel, K. Wedeward, M. Amith: Parameter Estimation for Inventory of Load Models in Electric Power Systems, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2014, 1: 22-24.

BIOGRAFIJA

Ernad Jabandžić rođen je 1986. godine u Doboju. Diplomirao je na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli na odsjeku Energetska elektrotehnika u januaru 2011., a zvanje magistra elektrotehnike je stekao u oktobru 2014. godine na odsjeku Elektroenergetske mreže i sistemi. Od januara 2012. godine radi u Elektrotehničkoj školi za energetiku u Sarajevu kao profesor stručno-teorijske grupe predmeta.

Tatjana Konjić je diplomirala, te stekla naučni stepen magistra i doktora nauka na Fakultetu elektrotehnike, Univerziteta u Tuzli 1989., 1998. i 2003. godine, respektivno. Od 1991. godine zaposlena je na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli. Trenutno je izabrana u zvanje vanrednog profesora na Fakultetu elektrotehnike, Univerziteta u Tuzli i Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Sarajevu. Uža oblast interesovanja je primjena vještačke inteligencije na elektroenergetske sisteme, elektroenergetske mreže sa distribuiranom proizvodnjom i kvalitet električne energije.

Lidija Korunović je diplomirala, magistrirala i doktorirala na Elektronskom fakultetu u Nišu 1996., 2002. i 2008. godine. Na istom fakultetu Univerziteta u Nišu (Republika Srbija) radi kao docent na Katedri za energetiku. Uža oblast interesovanja su joj modelovanje potrošnje, kvalitet električne energije i analiza i eksploatacija distributivnih mreža.