

## UTICAJ ISTORIJSKIH PODATAKA NA GREŠKE ESTIMACIJE STANJA

Z.Simendić<sup>1</sup>, PD Elektrovojvodina d.o.o. Novi Sad "Elektrodistribucija Sombor", Sombor, Srbija  
G.Švenda, Fakultet tehničkih nauka, Institut za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Novi Sad, Srbija  
I.Cifra, Branislava Nušića 1, Sombor, Srbija

### UVOD

Estimacija stanja predstavlja bazičnu analitičku funkciju, kako za EMS (Energy Management Systems – sistemi za menadžment prenosno-proizvodnih sistema) tako i za DMS (Distribution Management System – sistemi za menadžment distribucije), na čijim se rezultatima zasnivaju praktično sve ostale analitičke funkcije za analizu, upravljanje i planiranje pogona – rekonfiguracija pod opterećenjem, vođenje pogona, kvarovi mreže, relejna zaštita, optimalna konfiguracija mreže, restauracija napajanja, regulacija napona, itd. Estimacija stanja prenosnih mreža utvrđena je pre više godina [1-2]. Odgovarajuće procedure estimacije se koriste kod mreža sa visokim nivoom sistema za daljinsko prikupljanje (akvizicije) podataka, što se obično obezbeđuje SCADA sistemima. Redundansa daljinski prenošenih (telemetrisanih) podataka realnog vremena – stanja mreže i topologije – obično je veća od 2.0. Takvom redundansom se obezbeđuje ne samo visok kvalitet estimacije stanja mreže, već i visok kvalitet obrade režima sa lošim merenjima, validacije topologije i parametara mreže. Daljinsko prikupljanje podataka u distributivnoj mreži (DM) je znatno skromnije u poređenju sa daljinskim prikupljanjem podataka u prenosnim mrežama. Distributivni SCADA sistemi obično pokrivaju samo napojne transformatorske (TS) i vrlo mali broj srednjenaponskih tačaka. Tako, redundansa telemetrisanih podataka realnog vremena kod DM mnogo je manja od 1,0 (vrednosti su oko 0,2÷0,3 [3]). Nedostatak takvih podataka inicirao je razvoj specijalizovanih algoritama za estimaciju stanja u srednjenaponskim (SN) DM [4-6].

Verifikacija funkcije Estimacija stanja predstavlja glavnu temu rada sa ciljem da se odredi nivo tačnosti rezultata funkcije estimacije stanja i analizira uticaj maksigrafa i dnevnih hronoloških dijagrama (DHD) opterećenja na rezultate estimacije razmatrane DM.

Nakon uvoda, osnovnih pojmova estimacije stanja u SN DM, u trećem delu rada opisani su podaci van realnog vremena. U četvrtom delu rada, na primeru realne SN DM "ED Sombor" prikazani su rezultati eksperimenta. Nakon zaključka datog u petom delu, u šestom delu je referentno navedena korišćena literatura.

### ESTIMACIJA STANJA

Estimacija stanja je proces u kome se, na osnovu telemetrisanih veličina merenja i istorijskih podataka sistema, određuju nepoznate vrednosti promenljivih vektora stanja sistema. Pri tom, vektor stanja predstavlja minimalan skup veličina na osnovu kojih može da se jednoznačno rekonstruiše režim razmatranog sistema, odnosno izračuna bilo koja njegova veličina. Treba imati u vidu da funkcija za estimaciju stanja mora da omogućiti da se pri dispečerskom upravljanju (vođenju pogona u realnom

---

<sup>1</sup>Zoran Simendić, PD Elektrovojvodina d.o.o. Novi Sad "Elektrodistribucija Sombor", 25000 Sombor, Apatinski put b.b., e-mail: zoran.simendic@so.ev.rs, tel 025 482933, faks 025 429399.

vremenu) raspolaže sa dovoljno kvalitetnom slikom stacionarnog režima u realnom vremenu (aktuelnog normalnog pogona, ili pogona s poremećajem), ali isto tako i da omogući analitičaru (dispečeru) da pre realizacije planirane manipulacije raspolaže slikom ne samo aktuelnog već i budućeg režima – režima nakon realizacije manipulacije. Da bi se to postiglo nužno je da softverski paket energetskih aplikacija za operativno upravljanje raspolaže funkcijom za estimaciju stanja koja može da se primenjuje jednako kvalitetno kako u realnom vremenu tako i u simulacionom modu. Estimacija stanja se zasniva na unapred specificiranom naponu korena DM (koren distributivne mreža predstavlja izvor napajanja DM koja se razmatra) i :

1. Podacima van realnog vremena (istorijski podaci):

- Kvantitativni pokazatelji potrošnje svakog od potrošača, npr.: vrednost sezonskih očitavanja registratora maksimalnih struja – "maksigrafa" u TS SN/NN.
- Normalizovani dnevni hronološki dijagrami potrošnje karakterističnih potrošača za karakteristične dane i karakteristične vremenske periode.

2. Podacima realnog vremena:

- Statusi rasklopne opreme, pozicije regulacionih sklopki regulacionih transformatora i statusi uključenosti kondenzatorskih baterija.
- Vrednosti merenja telemetrisanih u dispečerske centre.

Matematički model za estimaciju stanja može se, jednako kvalitetno i sa istim vremenskim i memorijskim zahtevima, primeniti kako na radijalnu, tako i na upetljanu SN DM. Pri tom, estimacija stanja može da se vrši na osnovu modula struje ( $I$ ) i faktora snage ( $\cos\phi$ ) odnosno, na osnovu aktivne ( $P$ ) i reaktivne snage ( $Q$ ). Algoritam u oba slučaja je isti i sastoji se od pet koraka te je prikazan na slici 1:

1. Preestimacija – prva aproksimacija režima (procena) se dobija na osnovu proračuna tokova snaga za poznati fazor napona korena mreže, poznatu topologiju mreže (status rasklopne opreme), kao i procene potrošnje svih SN i NN potrošača;

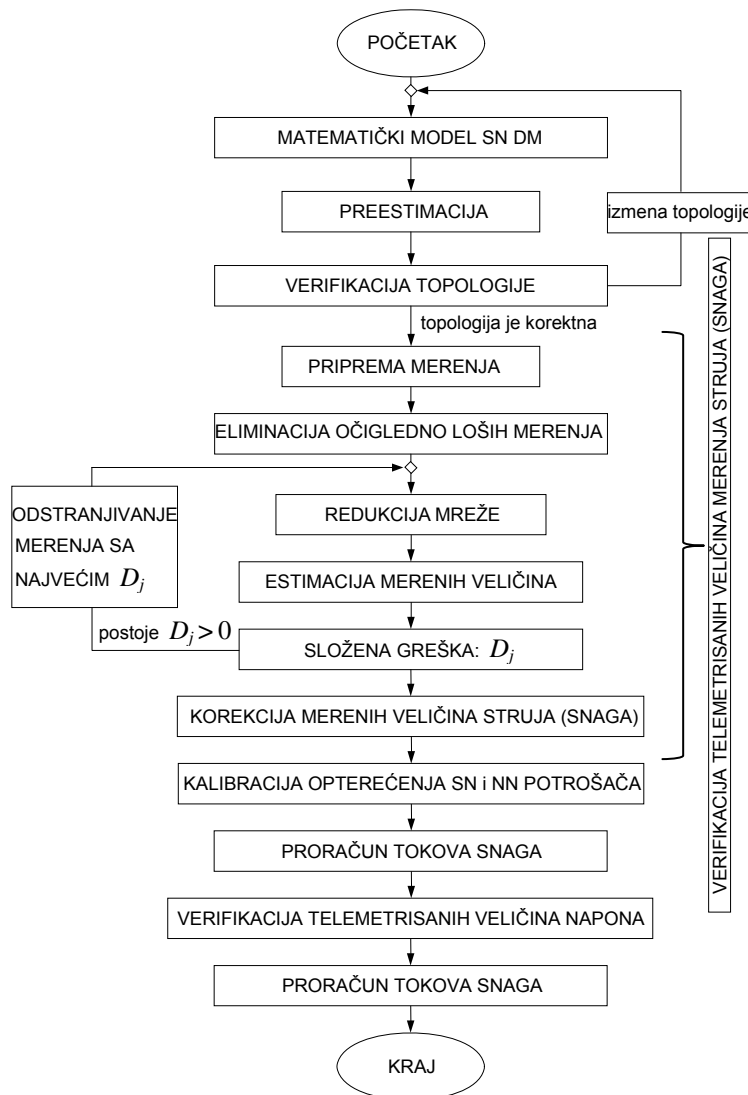
2. Verifikacija topologije – podrazumeva se detekcija i eliminacija grešaka načinjenih prilikom ažuriranja topoloških promena distributivnih DM;

3. Verifikacija telemetrisanih veličina merenja – podrazumeva se potvrđivanje, korekcija i/ili odbacivanje vrednosti telemetrisanih veličina koje ne zadovoljavaju postavljene kriterijume (složena greška  $D_j$ );

4. Kalibracija opterećenja potrošača – postupak u kome se na osnovu raspoloživih podataka procenjuje potrošnja u svim tačkama DM u izabranom trenutku;

5. Proračun tokova snaga – estimirani režim. Za poznatu (ili usvojenu) vrednost fazora napona u korenu SN distributivne mreže i prethodno kalibrisane vrednosti potrošnji svih SN i NN potrošača, omogućen je proračun tokova snaga [7].

Izračunati režim predstavlja estimirani režim razmatrane SN DM u razmatranom trenutku.



SLIKA 1. – Globalni algoritam za estimaciju stanja u SN distributivnoj mreži.

## PODACI VAN REALNOG VREMENA

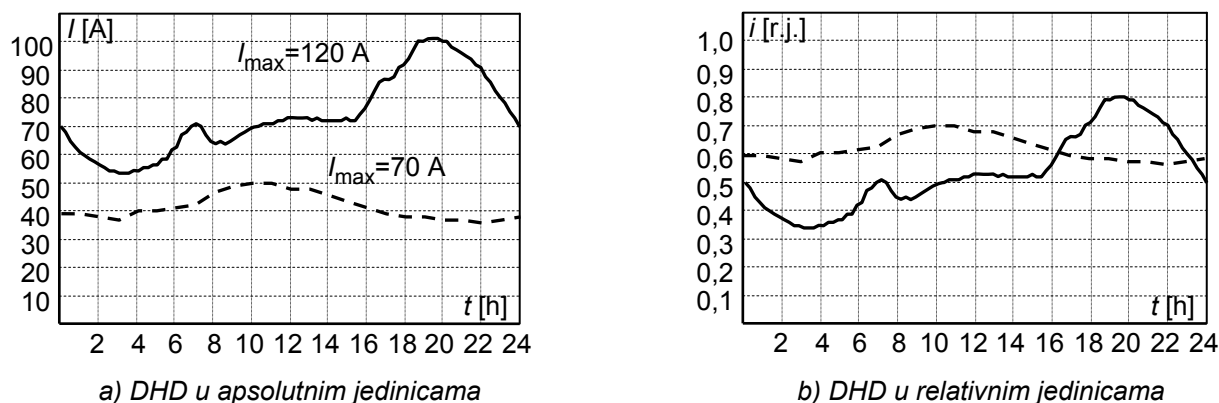
Podaci van realnog vremena (istorijski podaci) mogu da se podele u dve grupe: normalizovani dnevni hronološki dijagrami potrošnje karakterističnih potrošača i kvantitativni pokazatelji potrošnje svakog od potrošača.

### Normalizovani dnevni hronološki dijagram

Normalizovan dnevni hronološki dijagram (NDHD) opterećenja se dobija na osnovu merenja potrošnje (modula struje i faktora snage, odnosno aktivne i reaktivne snage). On se formira za sve karakteristične potrošače, za sve karakteristične dane i za sve karakteristične vremenske periode (godišnja doba, sezone, itd.). Ti dijagrami su reprezentivi odgovarajućih sličnih potrošača. Jedini način za dobijanje kvalitetnih dijagrama potrošnje SN i NN potrošača su dugotrajna merenja njihovih srednjih vrednosti potrošnje. Od kvaliteta ovako formiranih dijagrama najdirektnije zavisi kvalitet rezultata estimacije stanja (tokova snaga) kao osnovne energetske funkcije za analizu, upravljanje i planiranje pogona SN DM.

Bez obzira da li su izvršena merenja navedenih vrednosti pojedinačnih, odnosno grupe sličnih potrošača, nužno je da su za svaki od karakterističnih potrošača ta merenja izvedena: periodično, u jednakim vremenskim intervalima; trofazno, u sve tri faze; višestruko, merenja se moraju izvršiti na više TS SN/NN (odnosno izvodnih polja) koje napajaju slične potrošače i za što veći broj istih karakterističnih dana unutar posmatranog karakterističnog perioda; za sve karakteristične dane i karakteristične periode.

Generalno gledano, sam oblik NDHD opterećenja karakterističnih potrošača zavisi od više faktora, među kojima je značajno pomenuti: podneblje, klimatske uslove, stepen ekonomskog razvoja, usvojeno radno vreme, standard stanovništva, mentalitet stanovništva, itd. Zbog toga je poželjno da NDHD opterećenja odgovaraju razmatranom sistemu.



SLIKA 2. – Primer DHD i NDHD opterećenja

DHD (u apsolutnim vrednostima) za dva tipa potrošnje, prikazani su na slici 2a. Uz dijagrame su, za razmatranu sezonu i oba potrošača, prikazane maksimalne vrednosti opterećenja (kvantitativni pokazatelji opterećenja za razmatrani vremenski period) od 120A i 70A. Ako se DHD normalizuju na maksimalne vrednosti opterećenja, dobijaju se NDHD opterećenja, slika 2b.

### Kvantitavni pokazatelji potrošnje

Drugu grupu podataka van realnog vremena čine kvantitativni pokazatelji potrošnje svakog od potrošača. Skup vrednosti tih pokazatelja mora biti konzistentan kako po grupi, tako i po vremenskom periodu. Kao kvantitativni pokazatelji mogu se koristiti:

1. vrednosti instaliranih snaga transformatora ili TS SN/NN;
2. vrednosti mesečnih, sezonskih ili godišnjih očitavanja maksigrafa struja u TS SN/NN;
3. vrednosti mesečnih, sezonskih ili godišnjih protoka energije transformatora ili TS SN/NN.

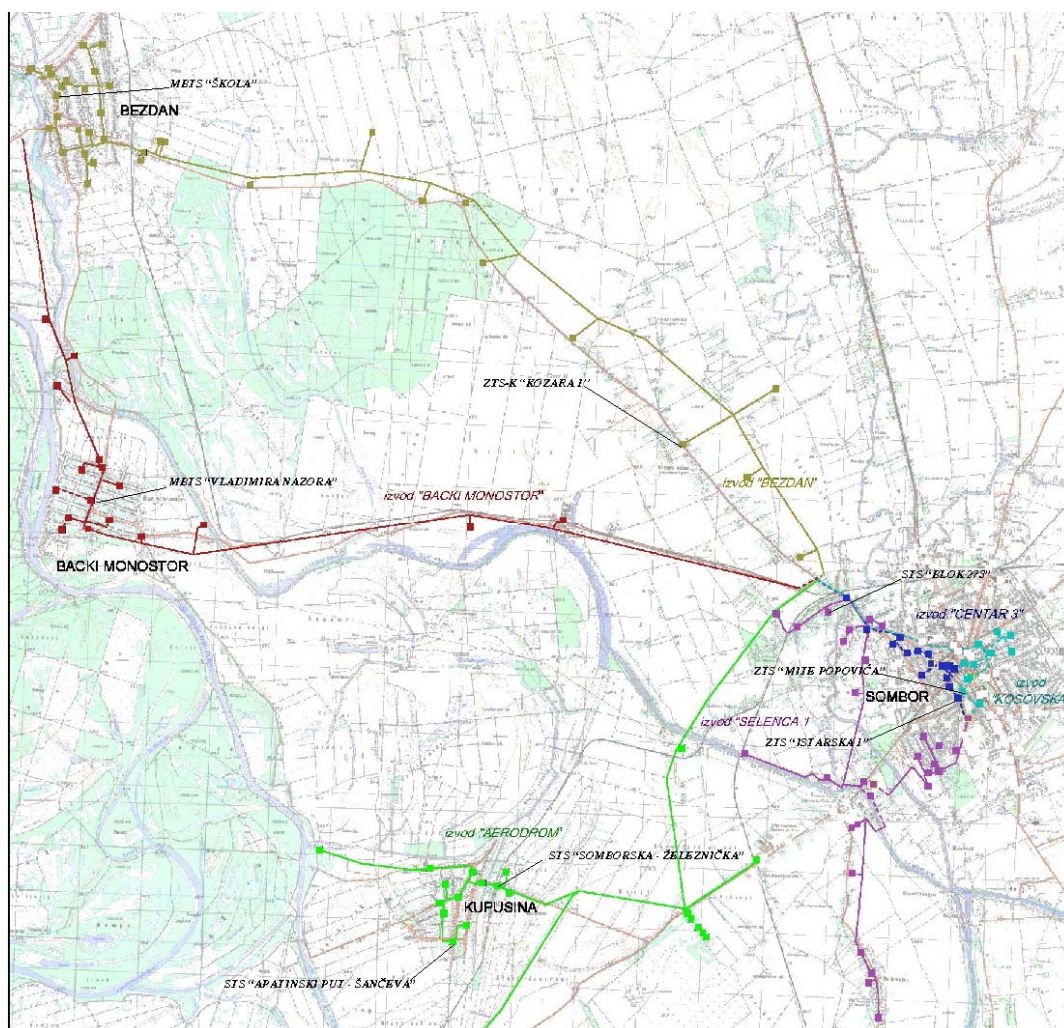
## EKSPERIMENT I REZULTATI

Verifikacija funkcije estimacija stanja izvršena je na delu SN DM ED "Sombor" koja se snabdeva električnom energijom sa transformatora 1 TS 110/20 kV/kV "Sombor 2". Sa transformatora 1, snage 31,5 MVA, potrošači se snabdevaju električnom energijom preko 6 SN izvoda ukupne dužine 137 km, sa 134 TS 20/0,4 kV/kV ukupne instalirane snage 45.650 kVA. Njime se snabdeva ukupno 12.224 potrošača sa dela područja grada Sombora i potrošači u naseljima Bezdán, Bački Monoštor i Kupusina sa njihovim okolinama. Pregled osnovnih karakteristika izvoda nad kojim su vršeni eksperimenti dat je u tabeli 1.

TABELA 1. – Karakteristike 20 kV izvoda nad kojima su vršeni eksperimenti

Naziv 20 kV izvoda	Dužina [km]	Broj TS 20/0,4 kV/kV	Instalirana snaga [kVA]	Broj potrošača
"Aerodrom"	33,12	16	5.020	1.011
"B.Monoštor"	37,45	25	6.260	2.179
"Bezdan"	29,60	36	9.440	2.437
"Kosovska"	8,38	11	7.610	1.775
"Centar III"	6,56	15	8.240	2.371
"Selenča 1"	21,90	31	9.080	2.451

Na slici 3. prikazana je trasa SN izvoda kao i geografski položaj svih TS 20/0,4 kV/kV obuhvaćenih eksperimentom.



SLIKA 3. – SN DM područja nad kojom su vršeni eksperimenti

Za eksperiment, TS 20/0,4 kV/kV izabrane su tako da na svakom od šest razmatranih izvoda postoje merenja u nekoj TS 20/0,4 kV/kV tog izvoda. Za merenje 0,4 kV struja izabrane su one TS 20/0,4 kV/kV koje su više opterećene od ostalih zbog većeg uticaja na funkciju estimacija stanja, a što se tiče njihovog fizičkog položaja nalaze se kako na početku tako i na sredini i na samom kraju posmatranih izvoda. Merni uređaji su postavljeni u sledeće TS 20/0,4 kV/kV: MBTS "V. Nazor", STS "Somborska – Železnička", ZTS "M.Tita – Šančeva", ZTS-K "Kozara", ZTS "Kneza Miloša 1", MBTS "Škola" i STS "Blok 273" i izvršeno je njihovo podešavanje za snimanje. Snimane su petnaestominutne vrednosti merenih veličina. Vreme na svakom mernom uređaju je podešeno i sinhronizovano prema vremenu DMS Softvera. Funkcija estimacija stanja je podešena da, kao kvantitativne pokazatelje potrošnje, koristi maksimalne struje (a ne instalisane snage ili mesečne protoke energije). Maksimalne struje TS 20/0,4 kV/kV određene su procenom, samo na osnovu očitavanja njenih maksimalnih struja iz prethodnog meseca. Procenjene vrednosti maksimalnih struja TS 20/0,4 kV/kV ručno su unete u DMS Softver. S obzirom da skup estimiranih vrednosti veličina, manje ili više, odstupa od odgovarajućih telemetrisanih vrednosti veličina, to su za potrebe rada funkcije estimacija stanja, unapred zadate dozvoljene apsolutne i relativne granice odstupanja izmerenih, estimiranih i preestimiranih vrednosti telemetrisanih veličina. U tabeli 2. date su korišćene dozvoljene vrednosti za:

– razlike izmerenih ( $M$ ) i preestimiranih ( $P$ ) struja  $|I^M - I^P|$ ;

– razlike izmerenih i estimiranih ( $E$ ) struja  $|I^M - I^E|$ ;

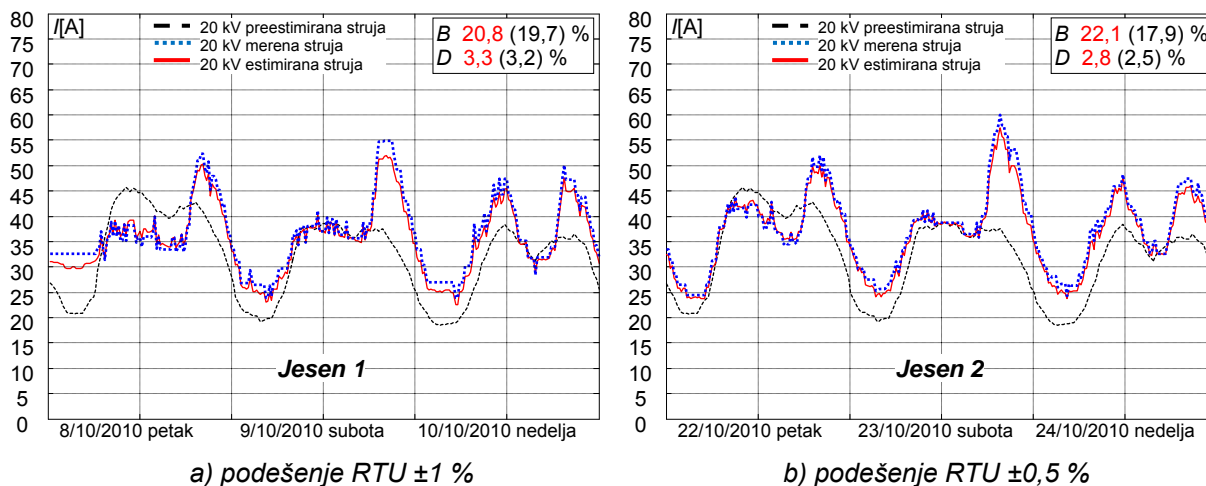
– razlike izmerenih i estimiranih napona  $|U^M - U^E|$ ;

kao i težinski faktori istorijskih i telemetrisanih vrednosti merenja koje su korišćene u eksperimentu.

TABELA 2. – Vrednosti parametara funkcije Estimacija stanja

Izmerene – preestimirane struje	30 A	30 %
Izmerene – estimirane struje	20 A	20 %
Izmereni – estimirani napon	0,1 kV	1 %
Težinski faktor istorijskih podataka	10 %	
Težinski faktor telemetrisanih podataka	100 %	

Eksperiment je sproveden u okviru jesenje sezone kroz četiri podeksperimenta nazvanih: Jesen 1, Jesen 2, Jesen 3 i Jesen 4. Formiranje četiri podeksperimenta je potreba da se pokaže značaj i uticaj podataka van realnog vremena na greške estimacije stanja. Pre početka eksperimenta nisu izvršene nikakve pripremne radnje. Sve postojeće vrednosti maksimalnih struja kao i NDHD modula struja su zadržani u okviru podeksperimenta Jesen 1. Pre jesenjeg perioda Jesen 2 izvršeno je prepodešenje softvera RTU u TS 110/20 kV/kV, tako da se sada merenja šalju u DC kada se izmerena vrednost merenih veličina promeni  $\pm 0,5$  % od punog opsega (300A) što iznosi  $\pm 1,5$ A umesto dosadašnjih  $\pm 1$  % što je iznosilo  $\pm 3$ A u toku perioda Jesen 1. Navedena izmena podešenja RTU rezultovala je uklanjanjem "stepenastih" perioda merenih veličina (pojačane tačkaste linije na slici 4a i 4b).



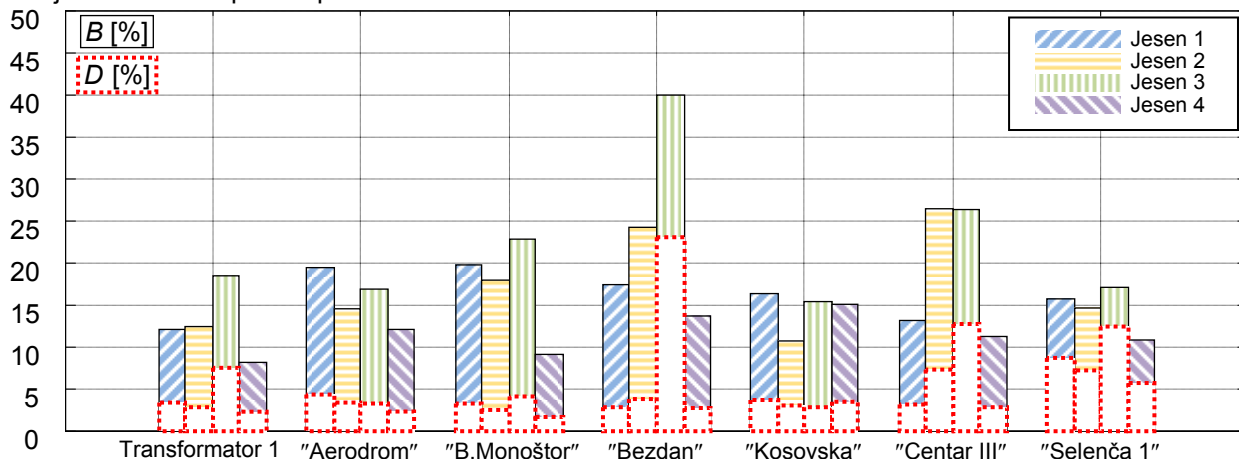
SLIKA 4. –20 kV struja izvoda "B. Monoštor"

Analizom snimaka DHD modula struja TS 20/0,4 kV/kV u merenjima Jesen 2, zaključeno je da dodeljeni NDHD modula struja ne odgovaraju snimljenim. Pre podeksperimenta Jesen 3 izvršena je izmena neodgovarajućih NDHD modula struja, pritom vrednosti kvantitativnih pokazatelja (maksimalnih struja TS 20/0,4 kV/kV) su ostale iste. Uticaj kvantitativnih pokazatelja potrošnje, na estimaciju stanja evidentiran je u okviru jesenjeg perioda Jesen 4. Vreme trajanja i broj obuhvaćenih dana jesenjim eksperimentom i svakim podeksperimentom prikazani su u tabeli 3.

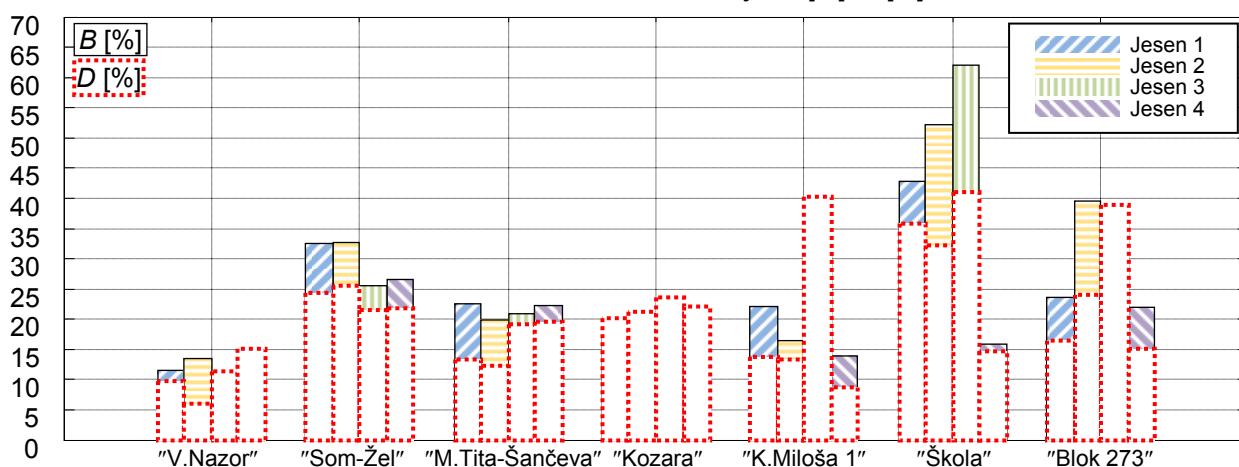
TABELA 3. – Prikaz trajanja podeksperimenata i broj snimljenih dana

Period eksperimenta	Vreme trajanja eksperimenta	Br. radnih dana	Br. subota	Br. nedelja	Ukupan br. dana
Jesen	07.10.2010 ÷ 23.11.2010	26	5	5	36
Jesen 1	07.10.2010 ÷ 15.10.2010	7	1	1	9
Jesen 2	21.10.2010 ÷ 28.10.2010	6	1	1	8
Jesen 3	28.10.2010 ÷ 02.11.2010	4	1	1	6
Jesen 4	11.11.2010 ÷ 23.11.2010	9	2	2	13

Na slikama 5 i 6 dat je pregled vrednosti kvantitativnih pokazatelja odstupanja modula 20 kV i 0,4 kV struja za sva četiri podeksperimenta.



SLIKA 5. – Greška modula 20 kV struje - B[%] i D[%]



SLIKA 6. – Greška modula 0,4 kV struje - B[%] i D[%]

Korišćena su dva kvantitativna pokazatelja odstupanja (greške) preestimirane, estimirane i merene struje:

–  $\Delta I_{sr}^{MP}$  srednja relativna razlika (%) izmerene i preestimirane vrednosti struje za  $m$  trenutaka merenja.

Ovaj pokazatelj je na slikama označen sa "B":

$$\Delta I_{sr}^{MP}(\%) = \frac{100}{m} \left( \sum_{j=1}^m \frac{|I_j^M - I_j^P|}{I_j^P} \right) \quad (1)$$

–  $\Delta I_{sr}^{ME}$  srednja relativna razlika (%) izmerene i estimirane vrednosti struje za  $m$  trenutaka merenja.

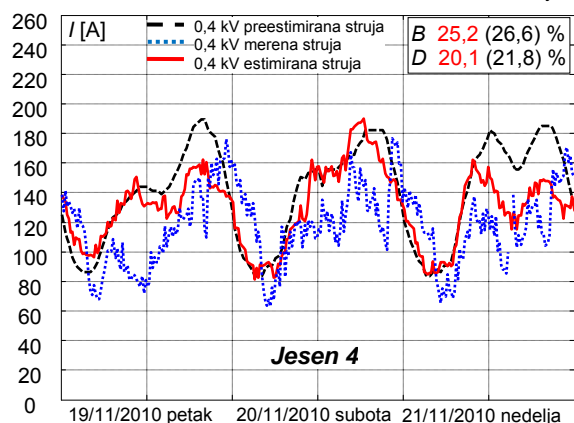
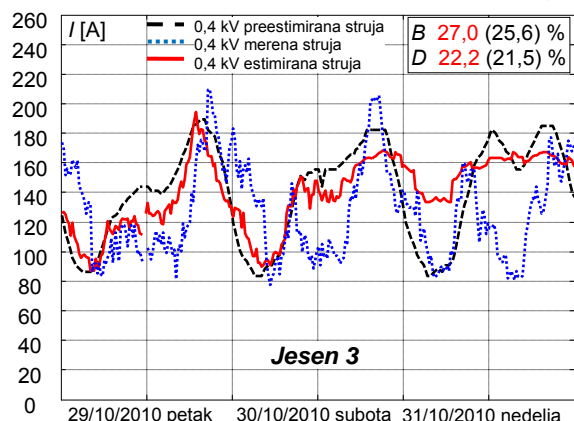
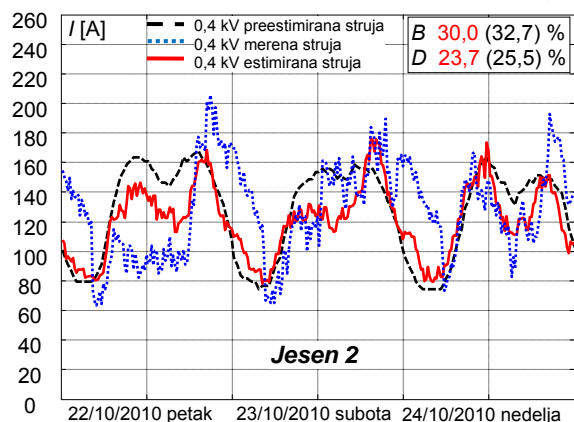
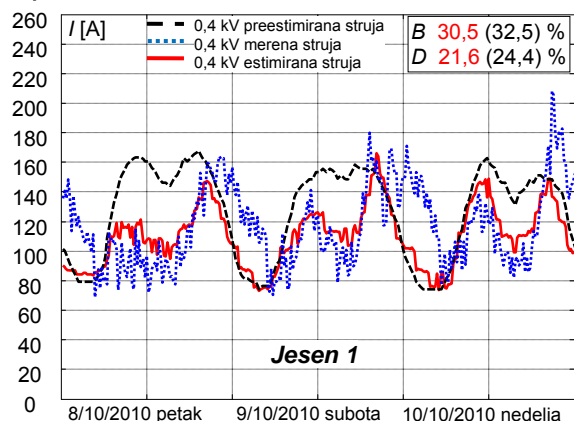
Ovaj pokazatelj je na slikama označen sa "D":

$$\Delta I_{sr}^{ME}(\%) = \frac{100}{m} \left( \sum_{j=1}^m \frac{|I_j^M - I_j^E|}{I_j^E} \right) \quad (2)$$

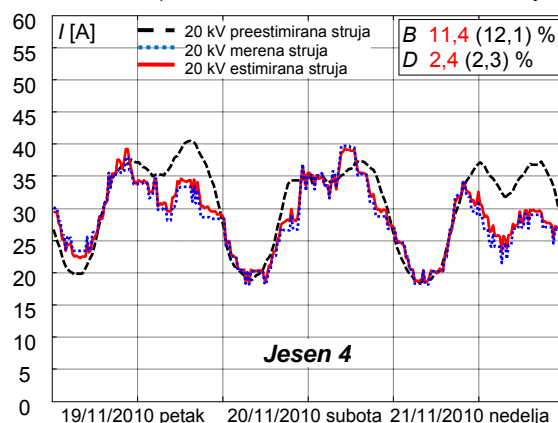
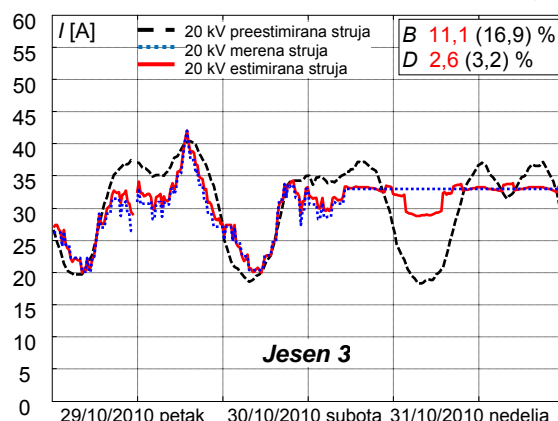
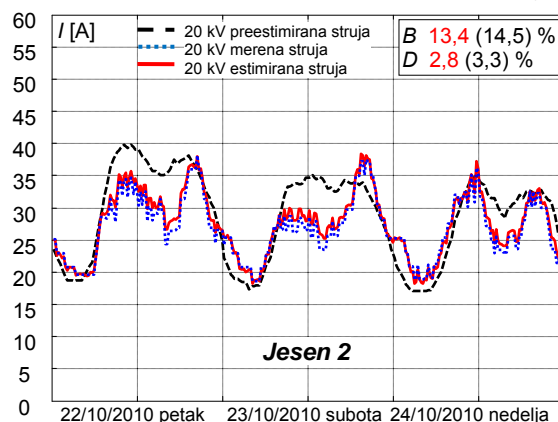
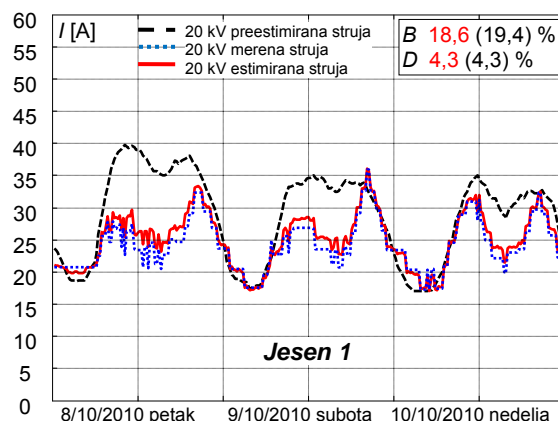
U izrazima (1) i (2) korišćene su sledeće oznake:

$j$  – trenutak merenja,  $j = 1, 2, 3, 4, \dots, m$ ,

$I_j^\alpha$  – preestimirana ( $\alpha = P$ ), izmerena ( $\alpha = M$ ) i estimirana ( $\alpha = E$ ) vrednost struje u trenutku  $j$ .



SLIKA 7. – 0,4 kV struja  
STS "Somborska - Železnička"



SLIKA 8. – 20 kV struja  
izvoda "Aerodrom"

Na prikazanim slikama isprekidanom crnom linijom predstavljena je preestimirana vrednost, punom crvenom linijom estimirana vrednost, a tačkastom plavom linijom merena vrednost odgovarajuće veličine. Za prikaz su izabrana tri dana: petak, subota i nedelja. Kvantitativni pokazatelji estimacije stanja ( $B$  i  $D$ ) koji su dati na slikama, odnose se na ceo period za koji su vršeni eksperimenti, dok su za prikazane dane na dijagramima vrednosti navedenih pokazatelja istaknute crvenom bojom. Vrednosti kvantitativnih pokazatelja  $B$  i  $D$ , ostvarenih u okviru podeksperimenta Jesen 3, su neočekivano veće od vrednosti zabeleženih u okviru prethodna dva podeksperimenta. Od 30.10.2010 godine (subota) u 17:30h je celokupni DMS sistem prešao iz radnog u simulacioni režim rada. Uzrok promene režima rada je prekid komunikacija sa TS 110/20 kV/kV koji je posle kraćeg vremena otklonjen a konekcija ponovo uspostavljena. Snimanje petnaestominutnih trenutaka je rađeno na računaru koji se ne nalazi u DC i zahteva ručno postavljanje režima rada DMS Softvera. Prekid komunikacije je prouzrokovao da se u narednom periodu pojavljuje stalno zadnje merena vrednost struje koja je došla iz SCADA sistema što se na slici 8 (Jesen 3) vidi kao horizontalna plava tačkasta linija. Preestimirana vrednost se i dalje menjala tokom vremena u skladu sa istorijom, ali od tog trenutka estimirana vrednost struje teži horizontalnoj liniji (u skladu sa istim merenim vrednostima).

## ZAKLJUČAK

Estimacija stanja se zasniva na specijalizovanom algoritmu koji uvažava osobine DM sa malom redundansom telemetrisanih podataka o topološkoj strukturi i stanju DM iz realnog vremena. Mali broj podataka iz realnog vremena nadoknađuje se upotrebom istorijskih podataka koji se sastoje od:

- karakteristika potrošnje (to su normalizovani dnevni hronološki dijagrami potrošnje za sve tipove potrošača, za četiri sezone koje prate godišnja doba i četiri karakteristična dana: radni dan, subota, nedelja i praznik),
  - vrednosti potrošnje (to su vrednosti vršnih opterećenja distributivnih transformatora tj. vrednosti očitane sa maksigrafa na samom transformatoru ili vrednosti mesečnih protoka energije kroz njih).
- Sprovođenjem eksperimenta kroz četiri podsezone, verifikacijom estimacije 20 kV struja izvoda i transformatora kao i 0,4 kV modula struja opterećenja TS 20/0,4 kV/kV, pokazan je uticaj kvaliteta podataka o maksimalnim opterećenjima i oblicima dijagrama potrošnje TS 20/0,4 kV/kV na greške estimacije stanja. Na osnovu rezultata došlo se do sledećih zaključaka:
- Merene struje slabo opterećenih TS 20/0,4 kV/kV imaju veće relativne varijacije nego u opterećenijim TS 20/0,4 kV/kV zbog čega su greške estimacije veće.
  - Loš izbor dijagrama potrošnje manje utiče na grešku estimacije stanja nego loše procenjeno maksimalno opterećenje.

Namernim neažuriranjem podataka o maksimalnim opterećenjima i oblicima dijagrama potrošnje TS 20/0,4 kV/kV poslednje dve godine, uz skroman broj podataka iz realnog vremena, verifikacijom estimacije 0,4 kV modula struja pokazano je da se procena stanja na tom nivou vrši sa nešto manjom tačnošću u odnosu na procenu stanja izvršenu sa ažurnim istorijskim podacima (slika 5, sezone Jesen1 i Jesen 4). Ažurnost istorijskih podataka, tj. primena kvalitetnijih i tačnijih dijargama kao i vrednosti maksimalnih pokazatelja potrošnje, procenu stanja na 20 kV nivou čine realnijom i dovoljno tačnom te daju kvalitetnu sliku režima SN DM.

## LITERATURA

1. A.P.Meliopoulos, F.Zhang: Multiphase Power Flow and State Estimation for Power Distribution Systems; IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, No.2, May 1996., pp. 939-946.
2. F.C.Schweppé, E.Handschin: Static State Estimation in Power Systems; Proc. IEE, Vol. 62, No. 7, July 1974., pp. 972-982.
3. M.K.Celik, W.-H.E.Liu: A Practical Distribution State Calculation Algorithm; Proceedings of IEEE Winter Meeting '99, New York, N.Y., pp. 442-447.
4. I.Roytelman, S.M.Shahidehpour: State Estimation for Electric Power Distribution Systems in Quasi Real-Time Conditions, IEEE Trans. on PD, Vol. 8, No. 4, October 1993, pp. 2009-2015.
5. G.Švenda, V.Strezoski: Estimacija stanja kao osnovna energetska funkcija za analizu, upravljanje i planiranje pogona distributivnih mreža; I Jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama – CIREĐ, Zlatibor, 5-8. oktobar 1998, referat R-4.03, str. R-4.03/1-8.
6. Z.Simendić: Estimacija stanja distributivne mreže u realnom vremenu; magistarski rad, FTN, Novi Sad, jun 2006.
7. D.S.Popović, D.D.Bekuč, V.P.Treskanica: Specijalizovani DMS algoritmi; DMS Grupa, Novi Sad, 2004.