



# Elektroprivreda

ČASOPIS ZAJEDNICE JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE • THE JOURNAL OF THE UNION OF YUGOSLAV  
ELECTRIC POWER INDUSTRY • REVUE DE L'UNION YOUGOSLAVE DE L'ELECTRICITE • ЖУРНАЛ ОБЪЕДИНЕНИЯ  
ЮГОСЛАВСКОГО ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА • ZEITSCHRIFT DES JUGOSLAVWISCHEN ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT

| Godina<br>Year | LVIV | Januar-Mart<br>January-March  | Broj<br>No. | 1   |
|----------------|------|---|-------------|---|
| Sadržaj        |      | Strana<br>Page  |             | Content   |
|                |      | <i>Branislav Dorđević i Tina Dašić</i>  |             |   |
|                |      | GARANTOVANI PROTOCI<br>NIZVODNO OD HIDROELEKTRANA   | 3           | ECOLOGICALLY GUARANTIED DISCHARGE DOWNSTREAM<br>FROM THE HYDROPOWER PLANTS  |
|                |      | <i>Dragan P. Popović</i>  |             |   |
|                |      | UPRAVLJANJE NAPONIMA GENERATORA<br>I NAPONSKO-REAKTIVNA STANJA<br>ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA                 | 12          | GENERATOR VOLTAGES CONTROL<br>AND VOLTAGE-REACTIVE STATES<br>OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTION                            |
|                |      | <i>Jovan Nahman,</i>  |             |   |
|                |      | <i>Dragoslav Perić, Dragutin Salamon i Ivana Vlajić-Naumovska</i>   |             |   |
|                |      | PRORAČUNI POUZDANOSTI DISTRIBUTIVNIH SISTEMA<br>PRIMENOM KORELACIONIH MATRICA                                       | 27          | EVALUATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS RELIABILITY BY<br>APPLICATION OF CORRELATION MATRICES                                  |
|                |      | <i>Dobrivoje Stojanović,</i>  |             |   |
|                |      | <i>Ivana Mladenović i Lidija Korunović</i>  |             |   |
|                |      | ALOKACIJA GUBITAKA<br>U RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA   | 36          | LOSS ALLOCATION<br>IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS  |
|                |      | <i>Jovan Mikulović i Tomislav Šekara</i>  |             |   |
|                |      | KOMPENZACIJA NEAKTIVNE SNAGE POTROŠAČA<br>PRI SLOŽENOPERIODIČNIM I NESIMETRIČNIM<br>NAPONIMA I STRUJAMA             | 44          | NON-ACTIVE POWER COMPENSATION<br>UNDER COMPLEX-PERIODIC AND ASYMETRICAL<br>VOLTAGES AND CURRENTS                          |
|                |      | <i>Miladin R. Tanasković i Vladimir I. Balkovoj</i>   |             |   |
|                |      | GRANIČNI POTENCIJALI I DIMENZIONISANJE<br>UZEMLJIVAČA TS SN/0,4 kV/kV<br>U UZEMLJENIM ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA | 53          | MAXIMUM POSSIBLE GROUND<br>POTENTIALS OF 10(20)/0,4 kV/kV SUBSTATIONS<br>AND THEIR MAXIMUM PERMISSIBLE GROUND RESISTANCES |
|                |      | <i>Dardan Klimenta i Jordan Radosavljević</i>   |             |   |
|                |      | RAČUNARSKI ALGORITAM ZA ODREĐIVANJE<br>EKVIPOTENCIJALNIH LINIJA FIZIČKIH POLJA<br>U DVODIMENZIONALNOM PROSTORU      | 67          | COMPUTER ALGORITHM FOR DETERMINING THE<br>EQUIPOTENTIAL LINES OF PHYSICAL FIELDS<br>IN TWODIMENSIONAL SPACES              |
|                |      | <i>Žarko Markov</i>   |             |   |
|                |      | IZBOR MODELA KANALA SA SMETNJAMA<br>U TELEKOMUNIKACIONOJ MREŽI<br>ELEKTROPRIVREDE SRBIJE                            | 81          | DETERMINATION OF A LOSS CHANNEL MODEL<br>IN THE TELECOMMUNICATION NETWORK<br>OF SERBIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY           |
|                |      | <i>Predrag M. Vuletić i Nebojša Mihailović</i>  |             |   |
|                |      | STACIONARNE OLOVNE BATERIJE SN TIPA   | 86          | STATIONARY LEAD-ACID BATTERIES TYPE SN  |
|                |      | <i>Branislav A. Bošković</i>  |             |   |
|                |      | OSTVARENJE ELEKTROENERGETSKOG BILANSA<br>ELEKTROPRIVREDA SRBIJE I CRNE GORE U 2006. GODINI                          | 96          | REALIZATION OF THE POWER BALANCE OF<br>SERBIA AND MONTENEGRO IN 2006  |

**IZDAVAČ:**  
**PUBLISHER:**

**ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE**  
**UNION OF YUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY**

11 000 Beograd, Balkanska 13

Telefon: 2686-633, 2643-823, 2688-092, 2687-199 (centrala)

Telefaks: 686-398

Internet strana: [www.eps.co.yu](http://www.eps.co.yu); [www.epcg.cg.yu](http://www.epcg.cg.yu);

Elektronska pošta: [jugel@sezampro.yu](mailto:jugel@sezampro.yu); [jugel@beocity.net](mailto:jugel@beocity.net)

**VD DIREKTORA I GLAVNOG I ODGOVORNOG UREDNIKA**  
**ACTING DIRECTOR AND CHIEF EDITOR**

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.

**IZDAVAČKI SAVET**  
**PUBLISHING COUNCIL**

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.,

Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, predsednik;

Prof. dr Jeroslav Živanić, dipl. ing. el., predsednik Upravnog odbora JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

Dr Duško Tubić, dipl. ing. el., JP „Elektromreža Srbije”, Beograd, član;

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing. el., Agencija za energetske efikasnost, inženjering i konsalting  
„Energy Saving Group”, Beograd, član;

Vladimir Vujović, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić, član;

Dragutin Martinović, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić, član;

**REDAKCIONI ODBOR**  
**EDITORIAL BOARD**

Prof. dr Miroslav Benišek, dipl. ing. maš., Mašinski fakultet, Beograd, član;

Prof. dr Ilija Vujošević, dipl. ing. el., Elektrotehnički fakultet, Podgorica, član;

Prof. dr Branislav Đorđević, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet, Beograd, član;

Prof. dr Jovan Nahman, dipl. ing. el., Elektrotehnički fakultet, Beograd, član;

Prof. dr Dragan Popović, dipl. ing. el., Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, član;

Prof. dr Dragutin Salamon, dipl. ing. el., Elektrotehnički fakultet, Beograd, član;

Dr Petar Vukelja, dipl. ing. el., Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, član;

Dr Veselin Ilić, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore”, AD, Mojkovac, član;

Dr Branko Stojković, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore”, AD, Nikšić, član;

Dr Duško Tubić, dipl. ing. el., JP „Elektromreža Srbije”, Beograd, predsednik;

Dr Rade Filipović, dipl. ing. el., Beograd, član;

Mr Dragan Vlasisavljević, dipl. ing. el., JP „Elektromreža Srbije”, Beograd, član;

Mr Gojko Dotlić, dipl. ing. el., JP „Elektromreža Srbije”, Beograd, član;

Mr Radmilo Ivanković, dipl. ing. el., Beograd, član;

Mr Miroslav Marković, dipl. ing. el., „Elektroprivreda Crne Gore”, AD, Nikšić, član;

Gojko Vlasisavljević, dipl. ing. el., JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

Aleksandar Vlajčić, dipl. ing. el., pomoćnik ministra za rudarstvo i energetiku u Vladi Republike Srbije, Beograd, član;

Mihajlo Gavrić, dipl. ing. građ., JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

Milan Jakovljević, dipl. ing. rud., JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

Mladen Serventi, dipl. ek., JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

Vojislav Škundrić, dipl. ing. el., JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, član;

Momčilo Gojgić, dipl. pravnik, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, član;

Lela Lončar, dipl. filolog, Beograd, član.

**TEHNIČKI UREDNIK**  
**TECHNICAL EDITOR**

Jovo Todorović dipl. teh.

**LEKTOR I PREVODILAC**  
**LINGUISTIC REVIEW**  
**& TRANSLATION**

Zlata Milinović,  
dipl. filolog

CIP – Katalogizacija u publikaciji  
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.9

621.31

**ELEKTROPRIVREDA** : časopis Zajednice  
jugoslovenske elektroprivrede / glavni i  
odgovorni urednik Branislav A. Bošković. –  
God. 1, br. 1 (1948)– . – Beograd  
(Balkanska 13) : Zajednica jugoslovenske  
elektroprivrede, 1948– (Beograd :  
Kultura). – 28 cm

Tromesečno

ISSN 0013-5755 = Elektroprivreda

COBISS.SR-ID 32023

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

Printed by: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

# Garantovani protoci nizvodno od hidroelektrana

Originalni naučni rad  
UDK: 621.81; 627.43; 621.311.21

---

*Rezime:*

*Pri planiranju hidroelektrana jedna od vrlo bitnih projektnih odluka jeste: koliki garantovani ekološki protok odabrati kao obavezno ispuštanje iz akumulacije, odnosno nizvodno od vodozahvata derivacionih objekata. Analizom metoda koje se koriste u svetu, kao i na bazi hidroloških studija malih voda i morfološko-ekoloških analiza koje su urađene na našim vodotocima, autori su definisali novu metodu koja se smatra najprikladnijom za izbor garantovanih ekoloških protoka pri planiranju na ovom prostoru Evrope. Prednosti metode su: a) jednostavnost primene, jer se zasniva na analizi mesečnih malih voda, b) prilagođenost životnim aktivnostima biocenoza u rečnom biotopu (protoci su različiti u toplom i hladnom delu godina), c) u malovodnim periodima ti protoci su veći od protoka koji bi bili u prirodnom stanju, tako da predstavljaju najdelotvorniju zaštitu vodenih ekosistema.*

**Ključne reči: hidroelektrane, akumulacije, vodozahvati, nizvodna deonica, garantovani protok, biocenoze, selektivni vodozahvat**

---

*Abstract:*

*ECOLOGICALLY GUARANTIED DISCHARGE DOWNSTREAM FROM THE HYDROPOWER PLANTS*

*One of the very important decisions in planning a hydropower plant is to determine ecologically guaranteed discharge that should be released from reservoir or downstream of the intake structures of derivation systems. On the basis of different methods, hydrological analyses of low flows and morphological-ecological analyses, a new methodology of determining ecologically guaranteed discharge from reservoirs in this part of Europe is defined. Advantages of this methodology are: a) it is based on average monthly low flows, so it is easy to use; b) it is adjusted to instream biocenoses life activity (discharge defers in summer and winter seasons of the year); c) in low flow periods discharge is bigger than it would be in natural conditions, so it is the most effective protection of water environment.*

**Key words: hydropower plant, reservoir, intake structure, downstream parts, ecologically guaranteed discharge, biocenoses**

---

## 1. UVOD

Pregrađivanjem rečnog toka kojim se formira akumulacija ili obezbeđuje zahvat za derivacionu

hidroelektranu, značajno se menja vodni režim nizvodno od pregradnog objekta. Pod vodnim režimom se podrazumeva čitava dinamika promena kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika protoka na ne-

kom delu vodotoka, kao i dinamika odnosa vode sa okolinom. Formiranje akumulacije ima za posledicu da se ranije prirodni režimi pretvaraju u upravljane. Projektanti sistema treba da reše problem: koja je količinu vode koja se mora ispuštati nizvodno od brane? Garantovani protok – količina vode koja se ispušta nizvodno od brane, dinamička je veličina koja se menja tokom godine, a zavisi od dve upravljačke veličine: garantovanog ekološkog protoka i vodoprivrednog minimuma.

*Garantovan ekološki protok* je protok koji se mora uvek obezbediti za normalan opstanak i razvoj biocenoza u reci kao biotopu. Zato taj protok predstavlja ekološku kategoriju.

*Vodoprivredni minimum* je vodoprivredna kategorija: to je protok koji se mora obezbediti nizvodno od akumulacije, kao i nizvodno od svakog vodozahvata na reci – radi podmirivanja potrebe svih korisnika voda koji se nalaze nizvodno. Dok se ekološki garantovan protok tokom planiranja vodoprivrednih sistema određuje na bazi ekoloških studija, te kasnije u upravljačke zadatke ulazi kao neprikosnovo ograničenje, vodoprivredni minimum je upravljačka veličina, do koje se dolazi optimizacijom i iterativnim usaglašavanjem ciljeva i interesa svih korisnika vode na slivu.

Garantovan ekološki protok<sup>1)</sup> tretira se kao dinamička veličina, koja se menja tokom godine, pre svega zavisno od potreba dominantnih / graditeljskih biocenoza – edifikatora. Drugim rečima, ekološkim protokom se upravlja, polazeći od kriterijuma da je jedan od ciljeva vodoprivrednog sistema da maksimalno poboljša ekološke uslove u reci kao ekosistemu. U malovodnom i toplom delu godine, kada dolazi do sinergetskog efekta malih protoka i opadanja sadržaja kiseonika u vodi, prelazi se na upravljanje na taj način što se istovremeno povećavaju protoci u odnosu na one koji bi bili u prirodnim režimima, uz istovremeno obogaćivanje vode kiseonikom, korišćenjem ispusta sa koničnim zatvaračima koji rasprskavaju mlaz i intenzivno aerišu tok. Upravljački treba delovati – povećanim ispuštanjem protoka nešto toplije vode iz gornjih slojeva akumulacije – u periodu mresta riba ili u nekim drugim in-

<sup>1)</sup> Za taj protok je bio odomaćen potpuno pogrešan termin „biološki minimum”. Ta netačna formulacija izaziva mnoge nesporazume, pa i odbojnost kod svih neupućenih ljudi kojima je stalo do očuvanja prirode. Reč „minimum” u svima budi asocijacije na neko radikalno sakaćenje prirode, te je uzaludno uveravanje da su ti budući minimalni protoci veći od protoka koji su se javljali u reci u malovodnim hidrološkim periodima pre građenja akumulacije. Termin „ekološki garantovan protok” je bliži suštini te upravljačke akcije namenskog ispuštanja vode, a znatno je povoljniji sa gledišta uspostavljanja neophodnih kooperativnih odnosa na relaciji vodoprivreda - zaštita prirode.

tervalima posebnog senzibiliteta biocenoza na nizvodnim deonicama.

Garantovan protok na nekoj deonici reke nizvodno od brana određuje se preko pomenute dve kategorije protoka. Polazi od sledećih uslova:

a) Na svakoj deonici se mora obezbediti ekološki garantovan protok planiran za taj deo godine.

b) Uzvodni potrošači smeju da zahvataju samo njima dodeljene količine vode, ne ugrožavajući propisane vodoprivredne minimume, određene za korisnike vode na nizvodnim deonicama reke.

c) Garantovani protok na nekoj deonici reke ( $Q_{\text{deon.gar.}}$ ) uvek mora da bude veća vrednost od te dve veličine – garantovanog ekološkog protoka ( $Q_{\text{gar.ekol.}}$ ) i vodoprivrednog minimuma ( $Q_{\text{vod.min.}}$ ), tj.

$$Q_{\text{deon.gar.}} = \max \{ Q_{\text{gar.ekol.}}; Q_{\text{vod.min.}} \}$$

d) Garantovani protok se mora obezbediti na svim deonicama hidrografske mreže u okviru vodoprivrednog sistema. Pritom, obezbeđenost garantovanog ekološkog protoka mora da bude sasvim bliska 100 %, dok se obezbeđenost vodoprivrednog minimuma usaglašava se obezbeđenostima nizvodnih korisnika, kojima se taj protok i upućuje. Imajući to u vidu garantovani protok neke deonice reke mora da bude funkcija vremena  $t$  (dela godine u koje se razmatra), položaja deonice u hidrografskoj mreži ( $L$ ) i zahtevane obezbeđenosti podmirivanja potrošnje ( $P$ ):

$$Q_{\text{deon.gar.}} = f(t, L, P)$$

Dinamizam garantovanog protoka treba shvatiti šire: ne samo kao promenljivost te veličine tokom godine, već i kao promenljivost tokom razvoja sistema, zavisno od promena ciljnih struktura i kriterijuma za vrednovanje upravljanja sistemom.

Izgradnja brane omogućava upravljanje vodnim režimima, odnosno, omogućava da se izvrši preraspodela protoka po vremenu na način kojim se popravljaju sve komponente vodnih režima. Ovo je posebno važno u periodima malih voda. Na taj način se namenskim ispuštanjem vode najboljeg kvaliteta mogu značajno popraviti i kvantitativne i kvalitativne komponente vodnih režima nizvodno od brana, što se u hidrotehnici naziva oplemenjivanjem malih voda. To je ključna vodoprivredna mera zaštite kvaliteta voda, ali i zaštite voda kao ekosistema, koja zajedno sa tehnološkim ili organizaciono-ekonomskim merama predstavlja snažno oružje u naporima da se popravi stanje kvaliteta voda na rekama, posebno u malovodnim periodima. Akumulacijama se, ujedno, može veoma efikasno delovati pri saniranju stanja nakon havarijskih zagađenja vodotoka. Saže-

to rečeno, akumulacije, mudro planirane, mogu da donesu ekološki boljitak deonicama reka na kojima se upravlja vodnim režimima.

## 2. NAČINI ODREĐIVANJA GARANTOVANIH EKOLOŠKIH PROTOKA

Veličina garantovanih ekoloških protoka predmet je brojnih istraživanja u svetu, posebno u novije vreme, sa jačanjem svesti o nužnosti valjane ekološke zaštite vodotoka. Taj protok zavisi od niza ekoloških faktora. Širvel (1989) je najpre izdvojio 40 biotičkih i abiotičkih varijabli za razmatranje, ali je utvrdio da samo 15 od njih imaju statistički značajnu korelaciju sa promenama ribljih populacija u rekama nizvodno od brana. Analizirajući faktore kritične za održanje i reprodukciju ribljih vrsta može se posebno izdvojiti sledećih sedam (Đorđević, 1993):

- 1) fizička struktura ribljeg staništa;
- 2) izvori energije (hrana, biljke);
- 3) kvalitet vode (sadržaj kiseonika, amonijaka, hlora, itd);
- 4) temperatura vode;
- 5) količinska komponenta vodnog režima (protok, brzina);
- 6) biotičke koakcija (kooperacija, kompeticija, predatorstvo, itd);
- 7) svetlost.

Ovi faktori su međusobno zavisni i utiču na dinamizam ekosistema, na akcije, reakcije i koakcije u vodenim ekosistemima, kao i na procese sukcesija.

Postoji mnogo metoda za određivanje preporučenih režima tečenja nizvodno od brana. EPRI (*Electric Power Research Institut*, 1986) identifikovao je čak 70 metoda i modela korišćenih za određivanje garantovanih ispuštanja iz akumulacija za potrebe ekoloških sistema. Međutim, sve te metode mogle bi se podeliti u dve grupe:

1) metode vezivanja za neki karakteristični proticaj i

2) metode očuvanja kvaliteta staništa (habitat quality methods).

1) *Metode vezivanja za neki karakteristični proticaj.* Te metode, koje se nazvaju tradicionalnim metodama, veličinu garantovanog ispuštanja nizvodno od brane ili vodozahvata povezuju sa nekom fiksnom veličinom protoka, bilo po verovatnoći ili trajanju, što predstavlja dosta pojednostavljen pristup. Tako „Nova engleska metoda” (*The New England Flow Recommendation Policy*, Larson, 1980, u EPRI, 1986) taj proticaj povezuje sa površinom i karakteristikama sliva. Formiraju se linearne zavisnosti površine sliva i protoka koji treba ostaviti u reci nizvodno od brane ili zahvata, za pojedine delove godine (proleće, leto, zima). Druga podgrupa meto-

da ove grupe koristi krivu trajanja protoka, ili dijagram verovatnoće malih voda, te preporučen protok vezuje za male vode određenog trajanja ili verovatnoće. Tako metoda „7Q20” taj protok zasniva na sedmodnevnom prosečnom protoku malih voda, sa povratnim periodom 20 godina. Taj kriterijum je ranije dosta često korišćen za male projekte u SAD i Kanadi. U Evropi se kao garantovani protok često usvaja mala voda trajanja 30 dana, verovatnoće 95 %. Taj kriterijum je i sada često u upotrebi kod nas, ali i u nizu drugih zemalja, što je potvrdila jedna analiza Komiteta za vode OUN. Kod nas se najčešće koristi u varijanti da se taj protok vezuje za malu mesečnu vodu verovatnoće 95 %, pošto se ta veličina dobija znatno lakše od tridesetodnevne vode, za koju su potrebni podaci o dnevnim protocima. Tako određen protok je nešto veći od tridesetodnevne male vode iste verovatnoće. U novije vreme taj se protok uvećava za 20 do 50 %, kako bi se stvorili još povoljniji uslovi za razvoj vodenih ekosistema nizvodno od brane. U novije vreme se kod nas postavlja sve češći zahtev da se mala mesečna voda verovatnoće 95 % uveća za 50 %, te da se tako definiše garantovan ekološki protok neposredno nizvodno od brane. U nekim slučajevima, posebno kada se sistem planira u vodoprivredno veoma napregnutim uslovima, sa ovim veličinama se donekle „manevriše”, te se veličina ekološkog protoka garantuje tek nizvodno od neke veće nizvodne pritoke, kako bi se za potrošače obezbedile veće količine vode. (Obrazloženje je da se ne mora baš i deonica između pritoke i brane obezbediti u potpunosti). Treću podgrupu ove grupe metoda čine metode kod kojih se garantovani protok vezuje za srednji višegodišnji proticaj. Najpoznatija metoda iz te podgrupe je metoda Tenanta (*Tennant*, 1976), koja se dosta često koristila u SAD i Kanadi. Na osnovu 1 600 merenja na rekama u SAD

Tabela 1.  
Preporučeni ekološki garantovani protoci  
(*Tennant*, 1976)

| Opis protoka                         | Preporučeni protočni režim (SGP) |                       |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
|                                      | Oktobar – mart (%)               | April – septembar (%) |
| Ispiranje akumulacija ili maksimum   | 200                              | –                     |
| Optimalni opseg garantovanog protoka | 60 – 100                         | –                     |
| Izuzetan                             | 40                               | 60                    |
| Odličan                              | 30                               | 50                    |
| Dobar                                | 20                               | 40                    |
| Relativno dobar ili narušavajući     | 10                               | 30                    |
| Slab ili minimalan                   | 10                               | 10                    |
| Značajno narušen                     | < 10                             | < 10                  |

Tenant je zaključio da se oko 60 % rečnog korita nalazi pod vodom pri protoku od 10 % od srednjeg godišnjeg protoka –  $Q_{sr}$  (*Average Annual Flow – AAF*), uz još uvek prihvatljive uslove u ribljim staništima. Zato je garantovane protoke vezao za ovu veličinu, dajući im ocene kao u tabeli 1.

Od preporučenih garantovanih protoka navedenih u tabeli 1 najčešće su bile korišćene dve veličine:

1) ispuštanje 10 % od srednjeg godišnjeg protoka ( $Q_{sr} = SGP$ ), koji, očigledno, spada u rešenja koja značajno narušavaju vodne režime malih voda i

2) ispuštanje 20 do 40 % od prosečnog godišnjeg protoka, koji spada u kategoriju „dobro” ocenjenih režima ispuštanja. Kod nas je često korišćen prvi kriterijum ( $0,1 \times Q_{sr}$ ), sa eventualnom korekcijom na  $0,15 \times Q_{sr}$ . Razlog česte primene tog kriterijuma je jasan: laka primena, malo „gubljenje vode” (upravo tako reče jedan projektant), što je omogućavalo da za korisnike ostanu veće količine vode.

Da bi se otklonile slabosti ove metode u slučaju reka sa jako neravnomernim vodnim režimima (u tom slučaju su se dobijali izuzetno mala ispuštanja u malovodnom delu godine), urađene su njene popravke (*Tessman*, 1980), uvođenjem u razmatranje i srednje mesečnih protoka (SMP), tako da se kriterijum izbora garantovanog protoka jednostavno određuje iz tabele 2.

Tabela 2.  
Modifikovana Tennant metoda (*Tassman*, 1980)

| Situacija                               | Minimalan protok |
|---|------------------|
| SMP < 40 % SGP                          | SMP              |
| SMP > 40 % SGP<br>i 40 % SMP < 40 % SGP | 40 % SGP         |
| 40 % SMP > 40 % SGP                     | 40 % SMP         |

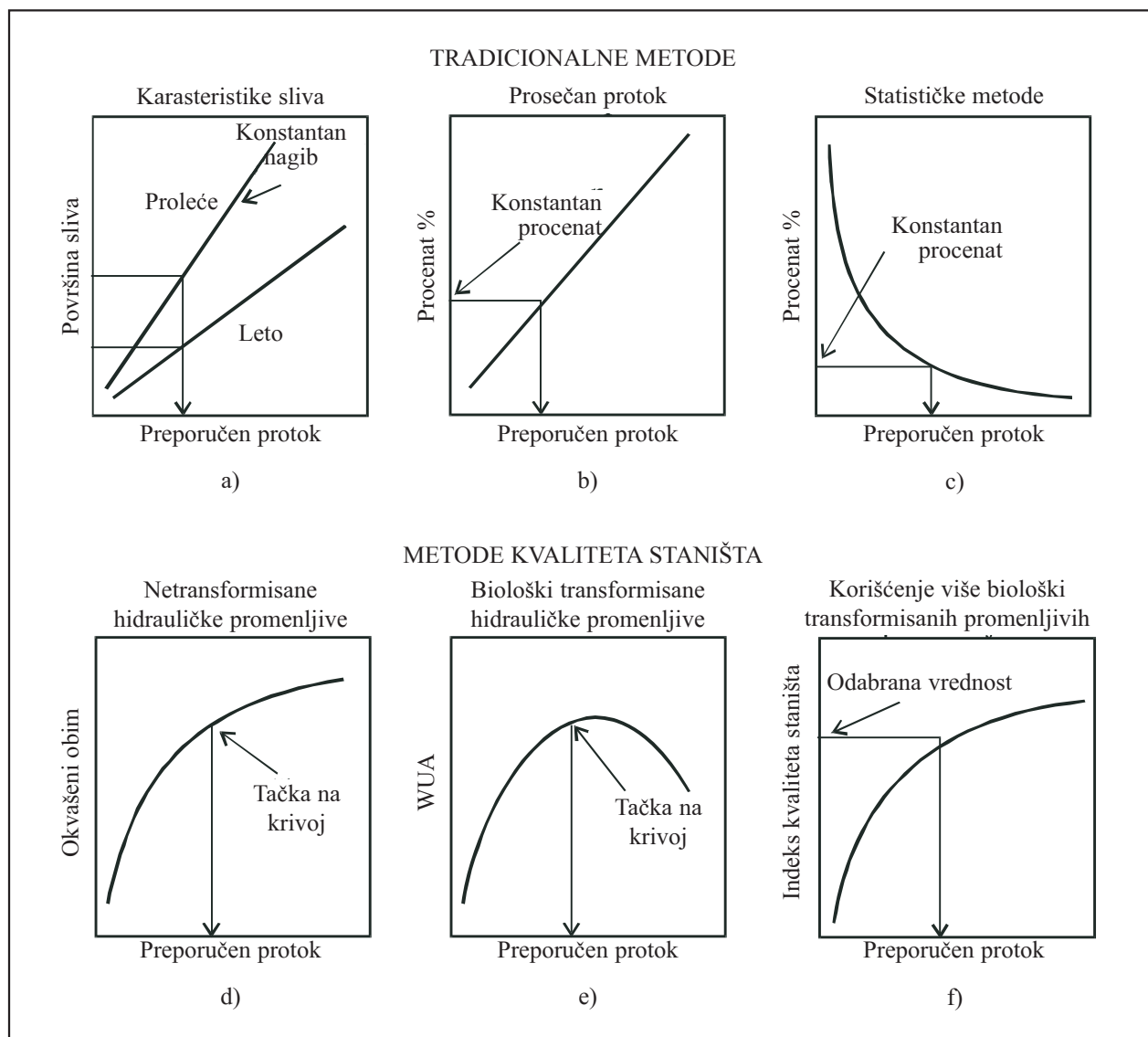
Ta metoda ima više slabosti (ne uzima u obzir karakteristike pojedinih ribljih vrsta, posebne zahteve riblje mlađi, itd), ali se zbog preglednosti često koristi, naročito u preliminarnim fazama planiranja sistema. Analiza korišćenih metoda (*Reiser, Wesche, Estes*, 1989) pokazuje da je najčešće korišćena metoda u SAD i Kanadi u ranijem periodu bila upravo modifikovana Tennantova metoda.

Nedostaci grupe metoda koje se vezuju za karakteristične protoke su: ne uzimaju u obzir sezonske varijacije protoka, ne vode računa o realnim potrebama nizvodnih biocenoza, konstantan protok ispuštanja iz akumulacije ne odgovara dinamizmu potreba ribljih vrsta.

2) *Metode očuvanja kvaliteta staništa* (habitat quality methods). Metode iz te grupe određuju ekološki garantovan protok na bazi analize kvaliteta ri-

bljeg staništa. Jednostavnija među njima, metoda okvašenog perimetra, pretpostavlja da postoji direktna zavisnost između okvašenog obima korita i kvaliteta ribljeg staništa. Suština metode prikazana je na slici 1d. Rade se zavisnosti promene okvašenog obima u zavisnosti od protoka. Preporučen garantovani protok se bira na nekoj tački preloma / infleksije na toj zavisnosti, pošto na njoj dolazi do naglog pada veličine okvašenog obima, a time i do pada kvaliteta staništa (*Anner i Conder*, 1984). Za analizu se izdvajaju karakteristične plitke deonice, jer su važne sa gledišta mrešćenja i razvoja riblje mlađi. Mana metode je što unosi dosta subjektivizma u analizu, naročito u slučaju kada ima više tačaka preloma. No, zbog svoje jednostavnosti može se koristiti kao provera neke od metoda prethodne grupe (npr. zajedno sa metodom Tennanta). Treba istaći da pri analizi okvašenog obima treba posebno izdvojiti ekološki karakteristične deonice reke nizvodno od brane, posebno one zone u kojima se ribe mreste ili koje su važne za njihova migraciona kretanja.

Jedna od najkompletnijih metoda iz ove grupe je Metoda priraštaja protoka (*Instream Flow Incremental Methodology – IFIM*), koja je razvijena u U.S. Fish and Wildlife Service. Na osnovu niza fizičkih i bioloških parametara (*Gore and Nestler*, 1988) ova metoda definiše indeks WUA (*Weighted Usable Area*) za različite protoke, za svaku riblju vrstu i svaku fazu njihovog razvoja. Metoda zahteva obimne terenske istražne radove „in situ”. Njima se uspostavljaju zavisnosti protoka, brzina i dubina u toku na reprezentativnim deonicama. Na osnovu osmatranja ribljih populacija definišu se potrebe za staništem različitih ribljih vrsta (*Habitat Suitability Index Curves – HSIC*), koje se u odsustvu takvih merenja mogu dobiti i na bazi podataka koje objavljuje U.S. Fish and Wildlife Servis (1986). Na osnovu tih podataka određuje se WUA u zavisnosti od protoka (slika 1 e). Indeks WUA može se odrediti primenom odgovarajućih analitičkih relacija (detaljnije *Đordević*, 1993). IFIM je trenutno jedna od najkompletnijih metoda za određivanje preporučenog ekološki garantovanog protoka nizvodno od brane. Njene novije interpretacije (*Locke*, 1989) idu ka uvođenju dinamizma koji prati ekološke zahteve riba tokom vremena (*Fish Rule Curve*). Sa stanovišta planera sistema to znači zahtev da se urade što potpunije analize potrebnih zapremina akumulacija, vodeći računa i o dinamizmu ispuštanja garantovanih protoka. Takođe, treba se odlučiti za najoperativniju opremu zatvarača ispusta. Jedna od mogućnosti obezbeđivanja što povoljnijih uslova u staništima je i ugrađivanje zahvata na više nivoa, kako bi se voda zahvatala (na isti način kao kod zahvata za vodovode) sa nivoa na kome su najpovoljnije temperature i kvalitet vode sa



Slika 1. Pregled metoda za proračun potrebnih ispuštanja vode iz akumulacije

gledišta zahteva nizvodnog ekosistema. Međutim, njena je najveća slabost izuzetna složenost istražnih radova, zbog čega se malo koristi čak i u bogatim zemljama u kojima je nastala. U našim uslovima je zbog toga još uvek praktično neupotrebljiva.

### 3. PREDLOG NOVE METODE

Nova metoda je nazvana Metoda GEP (Garanтовani Ekološki Protok). Njena pravila izbora su definisana vrlo jednostavno. Da bi se ta jednostavnost postigla urađene su detaljne hidrološke analize malih voda na nizu vodotoka i morfološke analize okvašenih obima minor korita, kako bi se izvukle zakonitosti morfoloških odnosa i protočnosti, kao osnovnih abiotičkih pokazatelja kvaliteta ribljih sta-

ništa. Polazište za definisanje predložene metode bili su sledeći zahtevi:

– Objediniti sve dobre osobine četiri grupe metoda koje se najoperativnije koriste u svetu, eliminišući njihove slabosti. Metode čija su iskustva na određeni način neposredno ugrađena u novu metodu su sledeće:

Iz grupe tradicionalnih metoda:

- a) Montana – Tennant metoda, nesumnjivo najčešće korišćena metoda u svetu;
- b) modifikovana Tennant metoda;
- c) Statističke metode, a iz grupe metoda sa analizom kvaliteta staništa i
- d) metoda okvašenog obima.

Pored tih metoda, čija su iskustva neposredno ugrađena u novu metodu GEP, uzeta su u obzir i iskustva ostalih metoda (IFIM, regresione metode), za

koje je zaključeno da se nikako ne mogu primeniti kod nas, zbog veoma složenih, dugotrajnih i skupih istražnih radova, koji zahtevaju posebne specijaliste koji se samo time bave. Sažeto rečeno: nova metoda treba da zadrži sve dobre osobine postojećih metoda, a da otkloni njihove slabosti, koje su uočene tokom primene u raznim zemljama.

– Metoda mora da bude veoma operativna i da se može upotrebiti imajući u vidu baze hidroloških podataka koje su standardne i uobičajene pri projektovanju brana, hidroelektrana, akumulacija i vodozahvata na rekama.

– Metoda treba da bude vrlo jednostavna za praktičnu primenu. To je postignuto na taj način što su urađene vrlo obimne regionalne hidrološke analize malih voda, kao i morfološke analize, kako bi se sagledao čitav opseg primenljivosti nove metode, svodeći samu metodu na veoma jednostavno pravilo.

– Dobijeni garantovani ekološki protoci određeni po novoj metodici – moraju uvek da budu ekološki povoljniji od rezultata iz kategorije „prilično dobar” u okviru metode Montana -Tennant, ali bez narušavajućih elemenata, i da se najvećim delom približavaju rezultatima iz kategorije „dobar” iz te iste metode.

– Metoda mora da bude univerzalna, tako da se može primeniti na vodotocima svih hidroloških režima i karakteristika na području ovog dela Balkana.

Razdvojena su dva perioda u toku godine:

1) hladni period godine, kada su aktivnosti biocenoza vrlo usporene i kada nema kritičnih aktivnosti u razvoju ihtiofaune,

2) topli period godine, kada se vrlo dinamično i živo odvijaju sve vitalne aktivnosti biocenoza, uključiv i njihovu reprodukciju.

Očito je da se tada i garantovani ekološki protoci moraju prilagoditi tom razvoju, te su tada povećani.

Pri definisanju metode GEP iskorišćena su bogata i dragocena iskustva koja su stečena u svetu pri primeni svih drugih metoda. Ovde se sistematizuju najvažnija iskustva koja su iskorišćena pri definisanju nove metode.

Iz metode Montana – Tennant, pored velikog iskustva koje je stečeno njenom primenom u svetu, usvojeni su sledeći principi: dinamizam garantovanih protoka, koji se ogleda u usvajanju dva perioda u toku godine (hladni i topli deo godine) za koje se daju različite veličine protoka; iskustvo o opsezima protoka u odnosu na prosečne godišnje protoke za koje se dobijaju dobri ekološki efekti, iskustvo o kategorijama ekološke valjanosti garantovanih protoka.

Iz modifikovane Tennant metode usvojen je princip da je nužno izvršiti korekciju garantovanih protoka, kako bi se uzela u obzir neravnomernost raspodele protoka tokom godine. Na taj način se izbegava mana nekih tradicionalnih metoda da se na rekama sa velikom neravnomernošću, kod kojih se najveći deo godišnjeg protoka realizuje tokom povodnja, odrede neprikladni, previše veliki garantovani protoci, ili da se malim odabranim garantovanim protocima degradiraju reke sa relativno ujednačenim režimima.

Iz statističkih metoda je usvojen vrlo bitan princip da se odluka o garantovanim protocima mora da zasniva na stohastičkoj analizi malovodnih perioda. Učinjeno je značajno poboljšanje u odnosu na pomenute statističke metode 7Q20 i Metodu transformacije krivih raspodele godišnjih protoka, time što su u novoj metodi GEP korišćeni rezultati stohastičke analize dugih perioda trajanja malovođa (analiza malih mesečnih voda, ili, ako se raspoložuje sa podacima o dnevnim protocima, analiza verovatnoće 30-dnevnih malih voda). Time je metoda, probablističkom analizom malovođa, znatno bolje približena realnosti hidroloških režima koje treba poboljšavati ispuštanjem garantovanih ekoloških protoka.

Iz metode okvašenog obima usvojen je važan logičan princip da kvalitet ribljeg staništa, a i kvalitet vodotoka kao biotopa zavisi od veličine okvašenog obima, posebno u periodu malovođa, kada opstanak biocenoza zavisi od kontinuiteta toka i okvašenog perimetra korita koji se stalno nalazi pod vodom. Morfološke analize koje su urađene u okviru ove studije pokazuju da na našim vodotocima tačka infleksije postoji i da se često nalazi u opsegu protoka  $(0,15 \div 0,25) \bar{Q}$ . To je na prvi pogled neočekivano slaganje sa kategorijom ispuštanja koja se ocenjuje ocenom „dobar” pri primeni metode Tennant. Međutim, brižljivije analize pokazuju da to slaganje nije neočekivano, zato što protoci koji se nalaze u tom opsegu obezbeđuju praktično puni kontinuitet vodnog ogledala reke. Kao takvi oni i u malovodnom periodu obezbeđuju dovoljno dobre uslove za opstanak i sve razvojne aktivnosti ribljih vrsta, uključiv i migracije u periodu mresta.

Operativnost i jednostavna za primenu zasniva se na primeni manjeg broja parametara, koji se mogu dobiti analizom raspoloživih hidroloških serija.

Primena GEP metode zasniva se na primeni tri parametra:

1) prosečni višegodišnji protok na profilu brane, odnosno mesta zahvata vode ( $Q$ ),

2) mala mesečna voda obezbeđenosti 95 % ( $Q_{95\%}^{min.mes}$ ),

3) mala mesečna voda obezbeđenosti 80 % ( $Q_{80\%}^{min.mes}$ ).



Ukoliko se raspolaže višegodišnjim serijama dnevnih protoka, umesto minimalnih mesečnih protoka ( $Q_{95\%}^{\min \text{ mes.}}$ ) i ( $Q_{80\%}^{\min \text{ mes.}}$ ) mogu se koristiti odgovarajuće vrednosti 30-dnevnih protoka malih voda istih verovatnoća ( $Q_{95\%}^{\min (30)}$ ) i ( $Q_{80\%}^{\min (30)}$ )<sup>2)</sup>. Kada se raspolaže tim podacima, onda se svi navedeni principi izbora sažimaju u veoma jasnom pravilu, koji definiše GEP metodu.

Garantovani ekološki protok ( $Q_{\text{ekol.gar.}}$ ) usvaja se u sledećim iznosima:

1) U hladnom delu godine, koji obuhvata period (oktobar – mart) garantovani ekološki protok  $Q_{\text{ekol.gar.}}$  treba odabrati tako da odgovara veličini mesečne male vode verovatnoće 95 % ( $Q_{95\%}^{\min \text{ mes.}}$ ), odnosno male 30-dnevne vode iste verovatnoće ( $Q_{95\%}^{\min (30)}$ ), ali ta vrednost ne može da bude manja od  $0,1 \times \bar{Q}$ , niti veća od  $0,15 \times \bar{Q}$ . Znači, u hladnom periodu godine  $Q_{\text{ekol.gar.}}$  bira se na osnovu relacije:

$$Q_{\text{ekol.gar.}} = \begin{cases} 0,1 \times \bar{Q} & \text{za } Q_{95\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{95\%}^{\min (30)} \leq 0,1 \times \bar{Q} \\ Q_{95\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{95\%}^{\min (30)} & \text{za } 0,1 \times \bar{Q} < Q_{95\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{95\%}^{\min (30)} < 0,15 \times \bar{Q} \\ 0,15 \times \bar{Q} & \text{za } Q_{95\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{95\%}^{\min (30)} \geq 0,15 \times \bar{Q} \end{cases}$$

2) U toplom delu godine, koji obuhvata period (april – septembar)  $Q_{\text{ekol.gar.}}$  treba odabrati tako da odgovara veličini mesečne male vode verovatnoće 80 % ( $Q_{80\%}^{\min \text{ mes.}}$ ), odnosno male 30-dnevne vode iste verovatnoće ( $Q_{80\%}^{\min (30)}$ ), ali ta vrednost ne može da bude manja od  $0,15 \times \bar{Q}$ , odnosno ne treba da bude veća od  $0,25 \times \bar{Q}$ . Znači, u toplom delu godine  $Q_{\text{ekol.gar.}}$  bira se na osnovu relacije:

$$Q_{\text{ekol.gar.}} = \begin{cases} 0,15 \times \bar{Q} & \text{za } Q_{80\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{80\%}^{\min (30)} \leq 0,15 \times \bar{Q} \\ Q_{80\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{80\%}^{\min (30)} & \text{za } 0,15 \times \bar{Q} < Q_{80\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{80\%}^{\min (30)} < 0,25 \times \bar{Q} \\ 0,25 \times \bar{Q} & \text{za } Q_{80\%}^{\min \text{ mes.}} \text{ ili } Q_{80\%}^{\min (30)} \geq 0,25 \times \bar{Q} \end{cases}$$

U slučaju da vrednosti garantovanih ekoloških protoka dobijene preko definisanih verovatnoća malih voda izlaze izvan opsega koji su definisani gornjim pravilima i nejednačinama, usvajaju se granične vrednosti.

<sup>2)</sup> Alternative su date iz operativnih razloga. Nesumnjivo je bolje ako se raspolaže sa podacima o tridesetodnevnom malim vodama odgovarajućih verovatnoća javljanja, jer je to primenije fizički fenomena malih voda, jer ekstremno malovode, definisano najmanjim godišnjim protocima u kontinuiranom trajanju od 30 dana može da zahvati delove dva meseca. Međutim, insistiranje isključivo na protocima ( $Q_{95\%}^{\min (30)}$ ) i ( $Q_{80\%}^{\min (30)}$ ) ne bi imalo smisla, jer se u mnogim projektima ne raspolaže sa višegodišnjim serijama dnevnih protoka. Zbog toga je upotreba vrednosti malih mesečnih voda odgovarajućih verovatnoća dopuštena. To omogućava da se metoda može primeniti u svim projektima, jer se uvek, u slučaju projektovanja hidroelektrana, raspolaže sa dovoljno dugim serijama mesečnih protoka. Upotreba malih mesečnih voda umesto 30-dnevnih minimalnih protoka daje, po pravilu, garantovane ekološke protoke na strani sigurnosti (nešto malo veće vrednosti).

3) U slučaju vodotoka kod kojih postoje posebni ekološki ili sportsko – turistički i rekreacioni zahtevi i ciljevi, vrednosti koje se dobijaju po gore navedenim pravilima mogu se uvećati: u hladnom delu godine do 15 %, u toplom delu godine do 30 %. To se može činiti samo uz posebnu analizu svrsishodnosti takvog povećanja.

4) Vrednosti garantovanog protoka dobijene za hladan deo godine mogu se tretirati kao konstantne, mada je moguće, po potrebi, i njihovo izvesno variranje (izvesno povećanje protoka u martu, kada se mreste neke riblje vrste koje to čine u tom hladnom periodu (štuka)).

5) Dobijene veličine garantovanog ispuštanja u toplom delu godine su prosečne. One se mogu finije prilagođavati potrebama razvoja biocenoza, posebno ihtiofaune, na taj način što se u kritičnim razdobljima (period mresta, itd) povećava ispuštanje, u skladu sa eventualnim zahtevima službi nadležnih za ekološku zaštitu i ribarstvo. Smanjenja su moguća u povoljnim hidrološkim situacijama, kada su protoci na pritokama povoljni, ali se ne sme dozvoliti da na deonici nizvodno od brane protoci budu manji od onih koji se ispuštaju u hladnom delu godine.

6) Protok koji se ispušta za ove potrebe nije energetski izgubljen. Na tom ispustu se mogu realizovati mali agregati, koji energetski prerade taj protok. Jedina je obaveza da takav ispust ima i odvajak koji će obezbediti ispuštanje i u slučaju ako je agregat van pogona zbog kvara ili održavanja.

#### 4. DRUGE MERE ZA ZAŠTITU BIOCENOZA

Radi obezbeđivanja što povoljnijih ekoloških uslova nizvodno od brana, u svim akumulacijama u kojima dolazi do termičke separacije treba koristiti *selektivne vodozahvate* za ispuštanje ekološki garantovanih protoka. Treba predvideti takve dispozicije, sa dovoljnim brojem zahvata na raznim dubinama, da se mogu ispuštati garantovani protoci iz onih zona / dubina akumulacije u kojima su trenutni pokazatelji kvaliteta (temperatura, hemizam) najpovoljniji za nizvodne biocenoze.

Zatvarači treba da budu regulacioni, dimenzionisani na najveće protoke koji se mogu zahtevati tokom vremenski promenljivog (dinamičkog) ispuštanja garantovanih protoka i protoka potrebnih za nizvodne korisnike. Ukoliko se voda ispušta i za potrebe nizvodnih korisnika, koji će tu količinu zahvatiti na svojim nizvodnim rečnim zahvatima, i ta količina se mora ispuštati na selektivnim vodozahvatima, u cilju obezbeđenja najpovoljnijih temperatura sa gledišta potreba biocenoza na nizvodnim deonicama reke.

Adekvatnim izborom zatvarača za ispuštanje garantovanih protoka i protoka za nizvodne korisnike (regulacioni konični zatvarači sa najefikasnijim ovazdušenjem mlaza) mogu se poboljšavati *kiseonični režimi* na nizvodnim deonicama vodotoka.

Dugoročni programi praćenja promena u ribljoj populaciji jednog vodotoka morali bi biti deo integralne strategije korišćenja određenog poteza reke. Izbor garantovanog ekološkog protoka je samo jedna od početnih, izuzetno važnih aktivnosti u tom procesu upravljanja vodenim ekosistemima. Ovakav program bi obezbedio verifikaciju sračunatih vrednosti ili omogućio izmenu istih kako bi se prilagodili realnim uslovima u vodotoku.

Da bi se raspolagalo validnim podacima o sloju iz koga treba ispuštati garantovane protoke, kao i da bi se stalno pratilo dinamički razvoj akumulacije kao ekosistema, obavezno je za sve akumulacije napraviti matematički model ponašanja akumulacije tokom vremena (model promene biotičkih i abiotičkih parametara jezerskog ekosistema). Korisnik objekta je u obavezi da obezbedi monitoring sistem, koji će omogućiti tariranje i stalno poboljšanje modela. Treba meriti abiotičke i biotičke faktore vodenog ekosistema, koji su neophodni za ažurno praćenje ponašanja jezera u realnom vremenu.

## 5. ZAKLJUČAK

*U radu se daje prikaz nove metodologije za određivanje garantovanih ekoloških protoka nizvodno od brana i vodozahvata. Metoda GEP (Garantovani Ekološki Protok) sadrži u sebi dobre osobine više metoda koje se koriste u svetu. Za nju se koriste podaci koji postoje u svim projektima. Veličina protoka se prilagođava potrebama vodenih ekosistema nizvodno, tako da su protoci različiti u toplom i hladnom delu godine. Metoda je jednostavna za primenu, jer se zasniva na analizi verovatnoće malih mesečnih voda.*

## 6. LITERATURA

- [1] Anner T.C. and A.L. Conder (1984): RELATIVE BIAS OF SEVERAL FISHERIES INSTREAM FLOW METHODS. North American Journal of Fisheries Management.
- [2] Dajoz R. (1972): PRECIS D'ECOLOGIE. Dunod, Paris.
- [3] Đorđević B. (1991): PRIMENA EKOLOŠKIH MODELA U PLANIRANJU VODOPRIVREDNIH SISTEMA, Vodoprivreda, Beograd.
- [4] Đorđević B. (1990): CYBERNETICS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT; WRP, Co.,USA.
- [5] Đorđević B., T. Milanović (1995): VODOPRIVREDNI I EKOLOŠKI ASPEKTI IZBORA GARANTOVANIH PROTOKA KOJI SE ISPUŠTAJU IZ AKUMULACIJA. Zbornik „Zaštita voda '95". Tara.
- [6] Đorđević B., T. Milanović (1995): NATURALNA REGULACIJA VODOTOKA KAO VID ZAŠTITE KVALITETA VODA I UKLAPANJA VODOPRIVREDNIH SISTEMA U EKOLOŠKO OKRUŽENJE. Zbornik „Zaštita voda '95". Tara.
- [7] EPRI (Electric Power Research Institute) (1986): INSTREAM FLOW METHODOLOGIES. Raport EPRI: EA-4819.
- [8] FAO (1972): EVALUATION OF THE METHODOLOGY FOR RECOMMENDING FLOWS FOR FISHES, FAO Publication. 1968. See Dajoz.
- [9] Fenchel T. and F.B. Christiansen (1976): THEORIES OF BIOLOGICAL COMMUNITIES. Springer-Varlag, New York.
- [10] Gore J.A. and J.M. Nestler (1988): INSTREAM FLOW STUDIES IN PERSPECTIVE. Regulated River Research and Management, 2:93-101.
- [11] Irvin J.R., Jowett I.G. and D. Scott (1987): A TEST OF THE INSTREAM FLOW INCREMENTAL METHODOLOGY FOR UNDERYEARLING RAINBOW TROUT, SALMO GAIRDNERI, IN EXPERIMENTAL NEW ZEALAND STREAMS. New Zealand Jour. of Marine and Freshwater Research.
- [12] Janković M. M. (1987): FITOEKOLOGIJA, Naučna knjiga, Beograd.
- [13] Keenleyside M. H. (1979): DIVERSITY AND ADAPTATION IN FISH BEHAVIOUR, Springer-Varlag, Berlin, New York.
- [14] Levins R. (1975): EVOLUTION OF COMMUNITIES NEAR EQUILIBRIUM. In: Ecology and Evolution of Communities by Cody M.L. and J.M.Diamond (eds). Belknap Press of Harvard University Press.
- [15] Locke A.G. (1989): INSTREAM FLOW REQUIREMENTS FOR FISH IN THE HIGHWOOD RIVER. Land and Wildlife, Alberta.
- [16] May R. M. (1975): STABILITY AND COMPLEXITY IN MODEL ECOSYSTEMS. Princeton University Press, Princeton.
- [17] Mathur D., W.H. Bason, E. J. Purdy, C. A. Silver (1984): A CRITIQUE OF THE INSTREAM FLOW INCREMENTAL METHODOLOGY. Canad. Journal of Fish. Aquat. Sci.
- [18] Odum E.P. (1969): THE STRATEGY OF ECOSYSTEM DEVELOPMENT, Science, 164.
- [19] Odum E.P. (1971): FUNDAMENTALS OF ECOLOGY, 3rd edn. Saunders, Philadelphia.

- [20] Savić D.A. (1992): METODE PRORAČUNA PROTOKA POTREBNIH ZA ODRŽANJE RIBLJE POPULACIJE, Vodoprivreda, Beograd.
- [21] Tennant D. L. (1976): INSTREAM FLOW REGIMENTS FOR FISH, Wildlife. Recreation and Related Environmental Resources. Fisheries,1(4).
- [22] Tessman S. A. (1980): ENVIRONMENTAL ASSESSMENT, Technical Appendix E. In Reconnaissance Elements of the Western Dakota's Region of South Dakota, South Dakota State University.

Rad je primljen u uredništvo 7. 03. 2007. godine



**Branislav V. Dorđević** je rođen 1938. Redovan profesor Građevinskog fakulteta u Beogradu. Redovni član Akademije inženjerskih nauka Srbije, član Naučnog društva Srbije, profesor honoris causae. Kao utemeljivač Teorije vodoprivrednih sistema, kao nove grane Tehničke kibernetike, predavao na više univerziteta. Bio je šef Katedre za hidrotehniku. Njegova specijalnost su složeni hidrotehnički sistemi sa hidroelektranama, višenamensko korišćenje, uređenje i zaštita voda, kao i ekološki aspekti složenih sistema. Za knjige „Korišćenje vodnih snaga I i II” nagrađen 1984. Oktobarskom nagradom Beograda. Njegovo kapitalno delo iz oblasti teorije vodoprivrednih sistema, objavljeno u SAD (1993) – *Cybernetics in Water Resources Management* – bazna je monografija u svetu iz te oblasti i citira se u tom svojstvu. Druge češće citirane knjige: *Vodoprivredni sistemi*, *Objekti hidroelektrana*, *Hidroenergetsko korišćenje voda*. Radio je na planiranju svih većih hidroelektrana i vodoprivrednih sistema u SFRJ, kao i na izradi najvažnijih strateških planskih dokumenata u oblasti voda na prostoru bivše SFRJ.



**Tina P. Dašić** rođena je 1970. godine. Hidrotehnički odsek Građevinskog fakulteta u Beogradu završila je 1994. Magistrirala je 1998. na istom fakultetu iz oblasti modeliranja abiotičkih i biotičkih procesa u jezerima i akumulacijama. Doktorirala je na Građevinskom fakultetu u Beogradu 2003. godine (oblast pouzdanosti velikih vodoprivrednih sistema). Docent je na predmetima *Vodoprivredni sistemi* i *Korišćenje vodnih snaga*, koje predaje i na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore. Objavila je knjigu „Kvalitet vode u akumulacijama” (modeliranje, ocenjivanje, praćenje), a u štampi je knjiga „Hidroenergetika – kroz rešavanje konkretnih problema”. Autor je ili koautor preko 40 radova koji su objavljeni u domaćim i međunarodnim časopisima i prikazani na naučnim skupovima.

---

Dragan P. Popović

# Upravljanje naponima generatora i naponsko-reaktivna stanja elektroenergetskih interkonekcija

Originalni naučni rad  
UDK: 621.31; 62-523; 621.313.322

---

*Rezime:*

*U radu se izlaže jedna nova metoda (i odgovarajući računarski program) za brzo i dovoljno tačno definisanje naponskih referenci generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja elektroenergetskih interkonekcija. Tu se prvenstveno misli na poboljšanje ekonomije pogona u maksimalnim stanjima, odnosno smanjivanje gubitaka aktivne i reaktivne snage. U minimalnim stanjima, to se radi u cilju minimizacije potreba za potpobuđenim režimima rada generatora, odnosno njihovu raspodelu na generatore koji su najpogodniji za to.*

*Razvoj ove metode bio je podstaknut poznatim saznanjem o veoma značajnom uticaju adekvatnog izbora vrednosti naponskih referenci angažovanih generatora na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike. Verifikacija predložene metode obavljena je u okviru statičkog simulacionog modela, na primerima ostvarenih i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju.*

**Ključne reči:** *upravljanje, naponi generatora, naponsko-reaktivna stanja, realna interkonekcija*

---

*Abstract:*

**GENERATOR VOLTAGES CONTROL AND VOLTAGE-REACTIVE STATES  
OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTION**

*This paper presents a new method (and corresponding computer program) for fast and sufficiently accurate definition of generator voltages to realize the favourable voltage-reactive states of electric power interconnection. In peak-load condition, this control is made to improve the economic operation, i.e. to reduce the active and reactive power losses. In low-load condition, this control is made to reduce the generator under-excitation states.*

*The development of this method is inspired by the known fact of great influence of adequate choice of generator voltage on established voltage-reactive states. The verification of method proposed is made in context of steady-state simulation model, on the examples of realized and perspective states of Serbian transmission network.*

**Key words:** *control, generator voltage, voltage-reactive states, real interconnection*

---

*Prof. dr Dragan P. Popović, naučni savetnik Instituta „Nikola Tesla”,  
11 000 Beograd, Koste Glavinića 9, e-mail: dpopovic@ieent.org*

## 1. UVOD

O aktuelnosti i značaju problematike naponsko-reaktivnih prilika u savremenim elektroenergetskim interkonekcijama ne bi trebalo posebno da se govori, jer je to opšte poznato, ne samo užem krugu stručnjaka iz elektroenergetike. Ova problematika je bila i ostala veoma važna i za EES Srbije, posebno imajući u vidu skorašnja iskustva vezana za radna stanja EPS-a koja su se dogodila dana 18. maja i 6. jula 2004. godine, uz važnu napomenu, da je to bilo pre ponovnog povezivanja sistema EPS-a na glavni deo UCTE interkonekcije. Pomenutih dana, usled deficita reaktivne snage i energije u prenosnoj mreži Srbije, došlo je do značajnih problema u radu sistema EPS-a u domenu naponsko-reaktivnih prilika. Ovi kritični deficiti nastali su usled neraspoloživosti ili ispada iz pogona agregata u TE Nikola Tesla A i B, kada je bila neophodna primena havarijskog isključenja dela potrošnje, čime su bile izbegnute najteže posledice (naponska nestabilnost, odnosno „raspadi” delova EES) [1].

S druge strane, nakon povezivanja sa glavnim delom UCTE mreže, koje je uspešno obavljeno 10. oktobra 2004. godine [2], EPS, odnosno EMS - Elektromreža Srbije će (uostalom, kao i ostale elektroprivredne kompanije, članice interkonekcije UCTE) biti u obavezi da striktno poštuje zahteve, kriterijume i standarde rada definisane u dokumentu [3]. U njemu se, u delu koji se odnosi na naponsko-reaktivna stanja, preporučuje da tokovi reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodovima budu u takvim okvirima, kako bi se prenosni kapaciteti „oslobodili” za prenos aktivne snage. U praktičnom smislu to znači da bi svaki Operator Sistema (u nas to je EMS) trebalo da obezbedi „pokrivanje” svoga konzuma reaktivne snage i energije.

Imajući u vidu već istaknutu veliku aktuelnost i izuzetan praktičan značaj problematike naponsko-reaktivnih prilika EES-a Srbije, u Elektroprivredi Srbije je, sredinom 2004. godine, formiran Stručni tim za reaktivnu energiju, koji je sačinio plan kratkoročnih i srednjeročnih mera za rešavanje problema sa reaktivnim opterećenjima [4], a sve u cilju iznalaženja najpovoljnijih tehno-ekonomskih rešenja.

Jedna od najznačajnijih početnih aktivnosti, u kontekstu pomenutog plana i njegove realizacije, je izrada Elaborata [5], koji se bavio izborom optimalnog načina smanjenja reaktivnog opterećenja u elektrodistributivnoj mreži Srbije za 200 Mvar. Kao neposredni rezultat ovoga Elaborata je ugradnja, u relativno kratkom vremenskom periodu (do kraja decembra 2005. godine), baterija kondenzatora u ukupnom iznosu od 200 Mvar u elektrodistributivnu mrežu Srbije. Naredna aktivnost, u kontekstu reali-

zacije pomenutog plana, bila je izrada Studije [6], u kojoj je izvršen izbor optimalnog načina smanjenja reaktivnog opterećenja sa gledišta prenosne mreže Srbije po TS 110/X kV/kV, u ukupnom iznosu od dodatnih 200 Mvar (170 Mvar na niskom naponu i 30 Mvar na srednjem naponu). Reč je od dodatnih 200 Mvar u odnosu na već realizovanu kompenzaciju na niskom naponu u iznosu od 200 Mvar.

Takođe, kada je reč o aktivnostima na ovoj veoma važnoj i značajnoj problematici, treba istaći Studiju [7], koja se bavila planiranjem izvora reaktivne snage u prenosnoj mreži EES Srbije, uz napomenu da je ona u potpunosti kompatibilna i komplementarna sa Studijom [8], koja se bavila dugoročnim razvojem prenosne mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV na području Republike Srbije, za period do 2025. godine.

Do sada rezultati sprovedenih istraživačkih aktivnosti na planu naponsko-reaktivnih stanja prenosne mreže Srbije (ugradnja prvih 200 Mvar na niskom naponu [5], sagledanih novih 200 Mvar (170 Mvar na niskom naponu i 30 Mvar na srednjem naponu) [6], reaktiviranje oko 80 Mvar kod industrijskih potrošača [9, 10, 11]), kao i rezultati aktuelne studije [7], koja se bavila naponsko-reaktivnom problematikom prenosne mreže Srbije, za vremenski period do 2015. godine), ukazuju na realne mogućnosti uspešnog rešavanja ove problematike u nas. Uz prethodno navedeno, tim zaključcima znatno je doprinela rekonekcija sa interkonekcijom UCTE [12, 13], kao i sagledani dalji razvoj prenosne mreže [8].

U pomenutoj studiji [7], između ostalog, dobijen je niz korisnih rezultata i pokazatelja, odnosno na jedan indikativan način istaknut je veliki praktičan značaj adekvatnog izbora naponskih referenci generatora, za uspostavljene naponsko-reaktivne prilike u prenosnoj mreži Srbije.

Tu se prvenstveno misli na smanjivanje gubitaka aktivne i reaktivne snage i povećanje sigurnosti rada u maksimalnim stanjima, a u minimalnim stanjima, na minimizaciju potreba za potpobuđenim režimima generatora ili pak za njihovu harmonizaciju, odnosno raspodelu tih režima na generatore koji su najpogodniji za to.

Naravno, to je opšte poznato, i nije uopšte sporno da o tome znalački i profesionalno vode računa stručnjaci u EMS-u, koji su odgovorni za vođenje pogona. Međutim, manje se zna o sofisticiranijim načinima kako da se izabere najpovoljniji plan napona generatora, i kako da se taj plan neposrednije usklađuje sa promenama u opterećenjima potrošača, odnosno promenama u angažovanju generatora.

Prethodno rečeno otvara pitanje opravdanosti uvođenja automatske sekundarne i tercijarne regulacije napona [14] u EES Srbije, koja se u sadašnjoj

praksi obavlja „ručno”. U tome, kao uzor mogu da posluže dosadašnja iskustva Francuske i Italije, gde se te regulacije obavljaju automatski. Sekundarna regulacija napona imala bi regionalni karakter (pored poboljšanja ekonomije pogona, imala bi za cilj i povećanje rezerve sigurnosti). Stoga bi bila neophodna koordinacija delovanja sekundarnih regulatora na nivou celog EES, što bi se postiglo uvođenjem tercijarne regulacije napona (globalna ekonomija i upravljanje reaktivnim snagama na nivou celog EES).

Pre sprovođenja samih analiza opravdanosti uvođenja ovih regulacija, bilo bi potrebno da se posveti posebna pažnja njenim adekvatnim metodološkim i praktičnim aspektima. U pomenutom veoma širokom i kompleksnom kontekstu, posebno mesto imaju odgovarajuće metode, koje bi bile u stanju da dovoljno tačno vrše evaluaciju relevantnih tehničkih efekata, koji mogu da nastanu uvođenjem ovih regulacija.

Ovaj rad bavi se jednom od takvih metoda, od niza mogućih, u pomenutom cilju evaluacije relevantnih tehničkih efekata. Naravno, ovaj rad nema pretenzija da se bavi samim konceptom automatske sekundarne i tercijarne regulacije napona, jer se u njemu samo izlaže razvoj i praktična primena jedne metode (i odgovarajućeg računarskog programa) za brzo i dovoljno tačno definisanje naponskih referenci angažovanih generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja. Dakle, u pitanju je samo jedan manji segment veoma kompleksne problematike, kao što je automatska sekundarna i tercijarna regulacija napona. Verifikacija predložene metode obavljena je u okviru tzv. statičkog simulacionog modela, na primerima ostvarenog i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju, preuzetih iz Studije[7].

## 2. RAZVOJ METODE UPRAVLJANJA NAPONIMA GENERATORA

Razmatra se elektroenergetska interkonekcija sa ukupno  $N$  čvorova, od kojih su  $N_G$  generatorski (a od toga,  $N_{GI}$  su generatorski čvorovi u EES od interesa – u našem slučaju to je EES Srbije), predstavljen matricom admitansi čvorova  $\underline{Y}$  (crtica ispod slova označava fazorsku veličinu). Polazi se od utvrđenog tzv. polaznog stacionarnog stanja interkonekcije, definisanog vektorom fazora napona svih čvorova  $\underline{V}$ .

Strogo uzevši, kad je reč o broju generatorskih čvorova u EES od interesa, u skup čvorova  $N_{GI}$  trebalo bi da se uvrste i generatori iz susednih sistema, koji su „električno blizu” perifernih generatora u EES, koji se analizira. U konkretnom slučaju EES-a Srbije, HE Đerdap 1 je takva, periferna elektrana, a

njoj su „električno blizu” HE Portile De Fier i TE Rovinari, iz EES-a Rumunije.

Dalje, admitanse potrošača, kao i admitanse generatora koji se ne nalaze u EES od interesa, sračunate na bazi poznatih injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga i modula napona u tim čvorovima, dodaju se odgovarajućim dijagonalnim elementima matrice  $\underline{Y}$ . Zatim, vrši se eliminacija (Gausova) svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji i svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa.

Po izvršenoj eliminaciji na opisani način, veza između vektora injektiranih struja  $\underline{I}_G$  i vektora napona  $\underline{V}_G$  generatorskih čvorova u EES od interesa (jer su ostali „u igri” samo generatorski čvorovi u EES od interesa), izražava se na sledeći, poznati način:

$$\underline{I}_G = \underline{Y}_G \underline{V}_G, \quad (1)$$

gde je:

$\underline{Y}_G$  – kvadratna matrica admitansi generatorskih čvorova, reda  $N_{GI}$ , koja je dobijena eliminacijom svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji i svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa.

Za tako transformisani sistem, injektirane prividne snage generatorskih čvorova u EES od interesa biće:

$$\underline{S}_{Gi} = \underline{V}_{Gi} \underline{I}_{Gi}^* \quad i = 1, 2, \dots, N_{GI} \quad (2)$$

a injektirana aktivna i reaktivna snaga, koristeći polarne koordinate, u skladu sa (1) i (2), biće:

$$P_{Gi} = V_{Gi}^2 Y_{Gii} \sin \mu_{Gii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{GI}} V_{Gi} V_{Gj} Y_{Gij} \sin (\delta_{ij} - \mu_{Gij}) \quad (3)$$

$$Q_{Gi} = V_{Gi}^2 Y_{Gii} \cos \mu_{Gii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{GI}} V_{Gi} V_{Gj} Y_{Gij} \cos (\delta_{ij} - \mu_{Gij})$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{GI}, \quad (4)$$

gde je:

$Y_{Gij}$ ,  $\mu_{Gij}$  – moduo i komplementarni ugao admitanse  $Y_{Gij}$ ,

$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  – razlika uglova modula napona čvorova  $i$  i  $j$ .

S obzirom na prirodu problema tretiranog u ovom radu, bilo je potrebno da se, za razmatrano ustaljeno stanje, nađe neka praktična mera osetljivosti promena aktivnih i reaktivnih snaga angažovanih generatora pri promeni naponskih referenci, odnosno napona na krajevima pojedinih odabranih generatora. Za taj cilj, dobru indikaciju (kako će se to videti, u razmatranim primerima EES-a Srbije u svom

širokom okruženju, greška se kretala najviše nekoliko procenata) daju sledeće linearizovane matrične jednačine:

$$\Delta P_G = \frac{\partial P_G}{\partial V_G} \Delta V_G \quad (5)$$

$$\Delta Q_G = \frac{\partial Q_G}{\partial V_G} \Delta V_G, \quad (6)$$

gde je:

$\Delta V_G$  – vektor korekcije prethodno zadatih modula napona izvora za koji je dobijeno polazno stanje EES, reda  $N_{GI}$ ;

$\Delta P_G$  – vektor promene injektiranih aktivnih snaga izvora u odnosu na vrednosti iz polaznog stanja, takođe reda  $N_{GI}$ ;

$\Delta Q_G$  – vektor promene injektiranih reaktivnih snaga izvora u odnosu na vrednosti iz polaznog stanja, takođe reda  $N_{GI}$ ;

$\frac{\partial P_G}{\partial V_G}$  – matrica osetljivosti, kvadratna matrica reda  $N_{GI}$ , čiji su elementi:

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_{Gi}} = 2V_{Gi} Y_{Gii} \sin \mu_{Gii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_G} V_{Gj} Y_{Gij} \sin (\delta_{ij} - \mu_{Gij})$$

$$i=1,2,\dots, N_{GI} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_{Gj}} = V_{Gi} Y_{Gij} \sin (\delta_{ij} - \mu_{Gij}) \quad j=1,2,\dots, N_{GI}, j \neq i \quad (8)$$

$\frac{\partial P_G}{\partial V_G}$  – matrica osetljivosti, kvadratna matrica reda  $N_{GI}$ , čiji su elementi:

$$\frac{\partial Q_{Gi}}{\partial V_{Gj}} = 2V_{Gi} Y_{Gii} \cos \mu_{Gii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_G} V_{Gj} Y_{Gij} \cos (\delta_{ij} - \mu_{Gij})$$

$$, \quad i=1,2,\dots, N_{GI} \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q_{Gi}}{\partial V_{Gj}} = -V_{Gi} Y_{Gij} \cos (\delta_{ij} - \mu_{Gij}) \quad j=1,2,\dots, N_{GI}, j \neq i \quad (10)$$

Dakle, posredstvom matričnih jednačina (5) i (6), specificirajući korekcije naponskih referenci odabranih generatora (definisane odgovarajućih elemenata vektora  $\Delta V_G$ ) u odnosu na posmatrano stanje, dobijaju se i odgovarajuće korekcije njihovih aktivnih  $\Delta P_G$  i reaktivnih  $\Delta Q_G$  snaga.

Evidentno je, imajući u vidu da su matrice ose-

tljivosti  $\frac{\partial P_G}{\partial V_G}$  i  $\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  „pune” matrice, da će, gene-

ralno gledano, u teoretskom smislu, promena naponske reference samo na jednom generatoru, dovesti do promena aktivnih i reaktivnih snaga kod svih generatora. Naravno, u praktičnom smislu, kako će se

to videti u narednom izlaganju, te promene će biti značajnije, ako se vrši korekcija naponskih referenci na relevantnim generatorima.

Rešavanje inverznog problema od prethodno formulisanog, postiže se posredstvom sledećih matričnih jednačina:

$$\Delta V_G = \left( \frac{\partial P_G}{\partial V_G} \right)^{-1} \Delta P_G \quad (11)$$

$$\Delta V_G = \left( \frac{\partial Q_G}{\partial V_G} \right)^{-1} \Delta Q_G \quad (12)$$

Dakle, posredstvom matričnih jednačina (11) i (12), specificirajući korekcije aktivnih (definisane odgovarajućih elemenata vektora  $\Delta P_G$ ), odnosno reaktivnih (definisane odgovarajućih elemenata vektora  $\Delta Q_G$ ) snaga odabranih generatora u odnosu na posmatrano stanje, dobijaju se potrebne korekcije naponskih referenci generatora  $\Delta V_G$ . Pri tome, potrebno je napomenuti, da bi definisani problem imao praktičnog smisla, neophodno je da algebarski zbir korekcija aktivnih, odnosno reaktivnih snaga, ima vrednost koja je bliska nuli.

S obzirom da se ovaj rad bavi naponsko-reaktivnom problematikom, predmet primarne pažnje su procesi u tzv.  $Q$ - $V$  konturi, odnosno primena matričnih jednačina (6) i (12), reda  $N_{GI}$ .

Na primer, u maksimalnim stanjima poželjno je da se odredi takav naponski plan generatora, koji bi omogućio veće opterećivanje reaktivnom snagom generatora (u okviru raspoloživih mogućnosti), koji su bliži većim centrima potrošnje, odnosno koji bi omogućio veću ekonomiju pogona, merenu smanjivanjem gubitaka aktivne i reaktivne snage. Takođe, u minimalnim stanjima, poželjno je da se odredi takav naponski plan generatora koji bi omogućio minimizaciju potreba za potpobuđenim režimima ili pak omogućio njihovu raspodelu na elektrane koje su najpogodnije za to.

Međutim, pri tome se ne zanemaruju procesi u tzv.  $P$ - $\delta$  konturi, koji nisu dominantni, ali se i oni javljaju, u znatno manjem intenzitetu, pri promeni naponskih referenci generatora, saglasno matričnim jednačinama (5) i (11).

Naravno, sada se javlja neizbežno pitanje kod promocije novih metoda, pogotovo ako su one jednostavne po formi kao što je ova, kako izvršiti njihovu valjanu verifikaciju? Kako će se to pokazati u narednom izlaganju, ona (verifikacija) će se obavljati u okviru tzv. statičkog prilaza. Međutim, da bi se dobila potrebna sigurnost i pouzdanost dobijenih rezultata, ona će se obavljati i u okviru tzv. dinamičkog prilaza, što će biti predmet posebnog rada, koji se nalazi u pripremi.

### 3. NAČIN VERIFIKACIJE PREDLOŽENE METODE – STATIČKI PRILAZ

U predloženoj metodi vrši se upravljanje naponima generatora, promenom njihovih naponskih referenci. Posredstvom matrice jednačine (6), specificirajući korekcije naponskih referenci odabranih generatora u odnosu na polazno stanje, dobijaju se i odgovarajuće korekcije njihovih reaktivnih snaga.

Dalje, posredstvom matrice jednačine (12), rešava se inverzni problem, odnosno specificirajući željene korekcije reaktivnih snaga odabranih generatora u odnosu na posmatrano polazno stanje, dobijaju se potrebne korekcije naponskih referenci angažovanih generatora. Dakle u oba slučaja operiše se sa *novim vrednostima napona angažovanih generatora*, bilo da su one zadate ili izračunate.

Na taj način, verifikacija u okviru tzv. statičkog prilaza, obavljaće se određivanjem novih tokova snaga za *nove vrednosti napona generatora*, nakon čega se utvrđuju razlike u rezultatima, dobijenih uprošćenim i strožim prilazom. Taj proračun novih tokova snaga i naponskih prilika, za nove vrednosti napona generatora, obavlja se primenom procedure, koja je detaljno opisana u [15, 16]. Ova vrsta verifikacije, kako će se to videti u narednom poglavlju ovoga rada, je integralni deo računarskog programa **DEFNAPON**.

### 4. RAČUNARSKI PROGRAM DEFNAPON

Na bazi matematičkog modela datog u drugom poglavlju ovoga rada, u Institutu „Nikola Tesla” razvijen je računarski program **DEFNAPON**. Za njegov razvoj korišćen je *Visual Fortran Professional Edition 6.0.0.* Omogućeno je obuhvatanje interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora i 200 regulacionih basena. Sve ulazne datoteke preko kojih se definiše polazno stanje su u potpunosti kompatibilne sa odgovarajućim datotekama koje koriste računarski program **UCOSFI** [17, 18] i najnovija, unapređena verzija računarskog programa **STATNTC** [24]. Ta činjenica je posebno apostrofirana, jer govori o praktičnoj mogućnosti udobne komplementarne primene ovih računarskih programa.

Na slici 1 daje se uprošćeni dijagram toka odvijanja računarskog programa **DEFNAPON**, odnosno toka i načina upravljanja naponima generatora i utvrđivanja uticaja toga upravljanja na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike u razmatranoj interkonekciji.

Analize počinju formiranjem i sređivanjem svih potrebnih podataka razmatrane interkonekcije (blok 1). Posredstvom posebno razvijenog interfejsa, omogu-

ćena je komunikacija sa podacima u UCTE i PTI formatu, koji se uobičajeno koriste i razmenjuju između zainteresovanih EES-a u Evropi.

Po sređivanju ulaznih podataka, vrši se proračun polaznog stanja, odnosno proračun tokova snaga i naponskih prilika (blok 2), primenom procedure, koja je detaljno opisana u [15, 16]. Za ovo polazno stanje se utvrđuju sledeći pokazatelji: veličina i struktura gubitaka aktivne i reaktivne snage, veličina i struktura generisanja reaktivne snage od strane dalekovoda i veličine reaktivne rezerve angažovanih generatora. Promene vrednosti ovih pokazatelja se dalje prate u okviru odvijanja ovoga računarskog programa, jer su one veoma indikativne u pogledu utvrđivanja relevantnih tehničkih efekata uvedenog upravljanja naponima odabranih generatora.

U daljem odvijanju ovog računarskog programa, njegovom Korisniku stoje na raspolaganju Opcije **I**, **II** i **III**.

Izborom Opcije **I**, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju razmatrane interkonekcije (blok 2), admitanse potrošača, kao i admitanse generatora koji se ne nalaze u EES od interesa, sračunate na bazi poznatih injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga i modula napona u tim čvorovima, dodaju se odgovarajućim dijagonalnim elementima matrice admitansi. Zatim vrši se eliminacija (Gausova) svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji i svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa. Dalje, obavlja se sračunavanje elemenata matrica

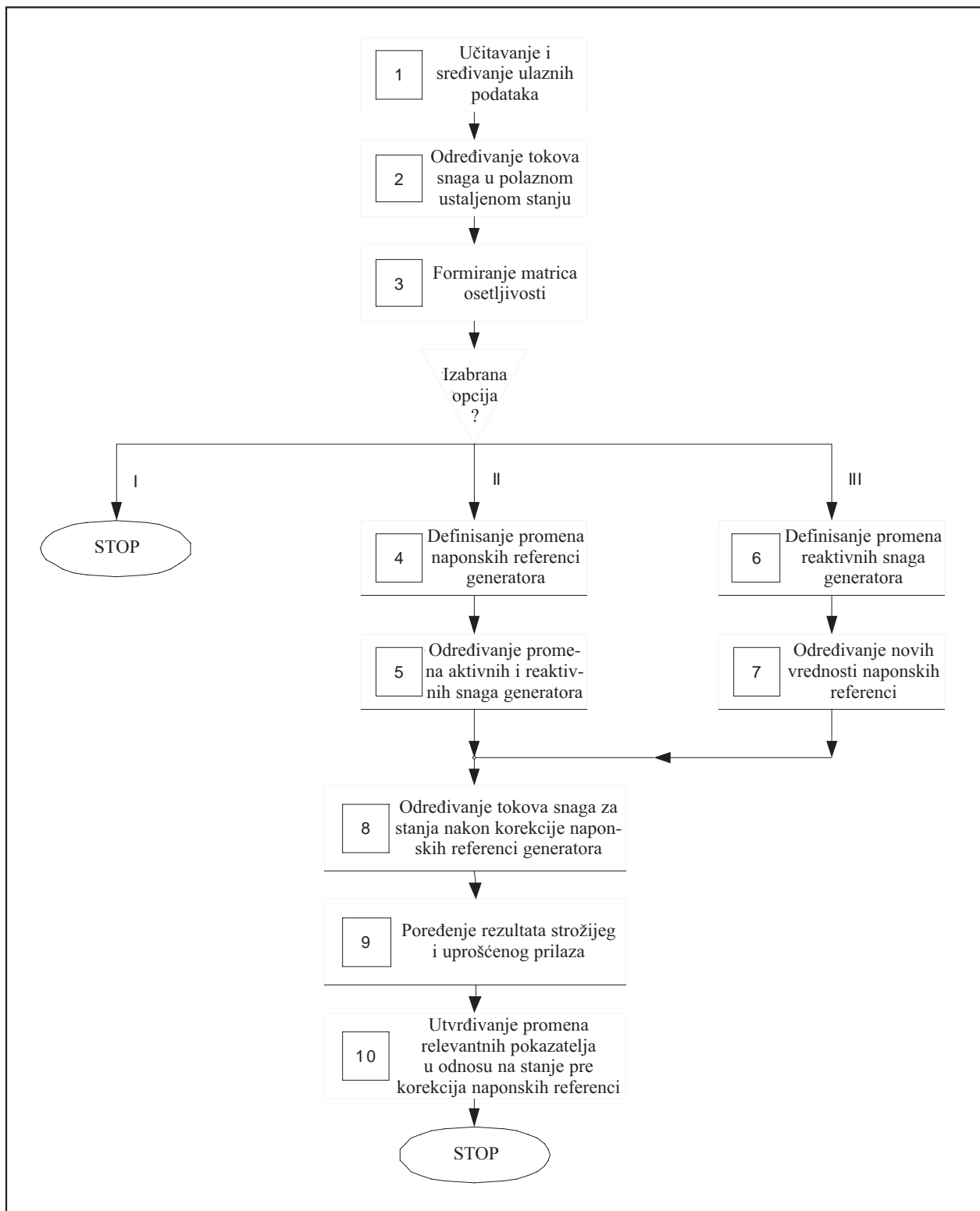
osetljivosti  $\frac{\partial P_G}{\partial V_G}$  i  $\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  za to stanje (blok 3).

Analizom dobijenih vrednosti elemenata ovih matrica, Korisniku se pruža prilika da sagleda koji je i koliki uticaj varijacije naponskih referenci izabranih generatora na novodobijene vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga svih angažovanih generatora, zatim da sagleda koji generatori imaju najveći uticaj na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike, kao i da dobije dobar uvid u njihovu međupovezanost.

Ako je izabrana Opcija **I**, po formiranju matrica osetljivosti, odvijanje programa se zaustavlja, čime se Korisniku, ako to da tada nije imao prilike, omogućuje da dobije dobar uvid u relevantne strukturalne osobine razmatranog sistema u pogledu naponsko-reaktivnih stanja.

Izborom Opcije **II**, po određivanju naponskih prilika i tokova snaga u polaznom stanju (blok 2) i određivanju elemenata matrica osetljivosti na opisani način (blok 3), vrši se definisanje novih vrednosti naponskih referenci na odabranim generatorima, u odnosu na ostvareno polazno stanje (blok 4). Naravno, u tom izboru, veliku pomoć mogu da pruže prethodno dobijene vrednosti elemenata matrice





Slika 1. Uprošćeni dijagram toka i načina upravljanja naponima generatora.

osetljivosti, vezane za reaktivnu snagu. Zatim, primenom matrice jednačina (5) i (6) određuju se promene, odnosno nove vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga generatora (blok 5). Ukoliko nove vredno-

sti napona generatora dovedu do prekoračenja limita po reaktivnoj snazi, koji nisu konstantne vrednosti, to se registruje, da bi Korisnik sačinio adekvatniji novi plan napona.

Dalje, u okviru ove izabrane opcije, sa zadatim novim vrednostima napona odabranih generatora, vrši se određivanje novih tokova snaga u razmatranoj interkonekciji (blok 8), posredstvom već pomenute procedure [15, 16]. Po određivanju novog ravnotežnog stanja, nastalog nakon izvršene korekcije naponskih referenci, vrši se poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenih uprošćenim prilazom (primena matricnih jednačina (5) i (6)), odnosno obavlja se verifikacija predložene metode, u okviru statičkog prilaza (blok 9).

Zatim, za novodobijeno stanje, utvrđuju se relevantni pokazatelji (veličina i struktura gubitaka aktivne i reaktivne snage, veličine i struktura generisanja reaktivne snage od strane dalekovoda, veličine reaktivne rezerve generatora i tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i naponske prilike na interkonektivnim dalekovodima) i njihove promene u odnosu na polazno, referentno stanje (blok 10). Nakon toga, program se zaustavlja, čime se Korisniku omogućuje da formuliše racionalno odvijanje Opcije III.

Izborom Opcije III, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju razmatrane interkonekcije i određivanju elemenata matrica osjetljivosti, definišu se željene korekcije reaktivnih snaga odabranih generatora (blok 6), u čemu značajnu pomoć mogu da daju rezultati primene prethodne opcije. Sa tako korigovanim reaktivnim snagama angažovanih generatora, dalje se vrši određivanje novih vrednosti napona generatora (blok 7), rešavanjem matricne jednačine (12).

Dalje, u okviru ove izabrane opcije, sa dobijenim novim vrednostima napona generatora, koji omogućuju ostvarenje zadatih reaktivnih snaga, vrši se određivanje novih tokova snaga u razmatranoj interkonekciji (blok 8). Takođe, u okviru ove opcije, po određivanju novog ravnotežnog stanja, vrši se poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenih uprošćenim prilazom (primena matricne jednačine (12)), odnosno obavlja se dalja verifikacija predložene metode, u okviru statičkog prilaza (blok 9).

Na kraju, u okviru ove izabrane Opcije III, analognu Opciji II, obavlja se odgovarajuća globalna analiza efekata uvođenja novog plana napona generatora (blok 10), odnosno utvrđuju se promene svih prethodno pomenutih relevantnih pokazatelja u odnosu na polazno stanje. Nakon toga, program se zaustavlja.

## 5. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMENE RAČUNARSKOG PROGRAMA *DEFNAPON* – VERIFIKACIJA PREDLOŽENE METODE

Kod promocija novih metoda, uvek se postavlja pitanje kako da se izvrši njena valjana verifikacija.

Uobičajena praksa u svetu je, kada su u pitanju statička stanja, da se to uradi u okviru normiranih test sistema (na primer poznate IEEE test mreže).

Međutim, autor ovoga rada je uvek preferirao da se to radi u okviru realnih sistema. Iz pomenutog razloga, prva praktična iskustva u primeni predložene metode, odnosno računarskog programa *DEFNAPON*, sticana su na realnoj interkonekciji, u toku rada na Studiji [7]. U njoj, sve analize naponsko-reaktivnih prilika su urađene na modelu realne elektroenergetske interkonekcije koju sačinjavaju EES Srbije (SR), Crne Gore (CG), Bosne i Hercegovine (BH), Hrvatske (CRO), Mađarske (HU), Makedonije (MA), Rumunije (RO), Bugarske (BG), Grčke (GR) i Albanije (AL). Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i relevantni delovi mreže 150 kV), uz napomenu da je kompletno modelovana mreža 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/X kV/kV. Pri tome, u potpunosti je uvažavan utvrđeni dalji razvoj prenosne mreže Srbije, saglasno rezultatima Studije [8]. Za sva razmatrana stanja u Studiji [7] (maksimalna – decembar 2005. godine, januar 2006. godine i stanja koja se očekuju 2010. i 2015. godine i minimalna stanja 2005, 2010. i 2015. godine), izvršena je praktična primena računarskog programa *DEFNAPON*.

U rekonstrukciji ostvarenih maksimalnih stanja 31. decembra 2005. godine i 26. januara 2006. godine za EES Srbije nije bilo problema, jer se raspolagalo sa autentičnim podacima, koji su dobijeni od Elektroprivrede Srbije. Odgovarajući problemi su se javili kod modelovanja suseda, odnosno tranzita, jer se nije raspolagalo sa odgovarajućim podacima, koji su vremenski korespondentni sa takvim podacima za EES Srbije. Iz tih razloga, analize su najpre vršene za stanja sa tzv. „nultim totalima razmena” između EES-a u razmatranoj interkonekciji (osim što je EES Bosne i Hercegovine izvezio 140 MW u EES Hrvatske, a 26. januara, EES Crne Gore (HE Piva) je izvezio 180 MW u EES Srbije). Na slici 2 daju se tokovi aktivnih i reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima razmatrane interkonekcije i naponi u graničnim čvorovima, za stanje ostvareno 26. januara 2006. godine. Ova slika se odnosi na pomenuto stanje sa tzv. „nultim totalima razmene” između EES-a u razmatranoj interkonekciji.

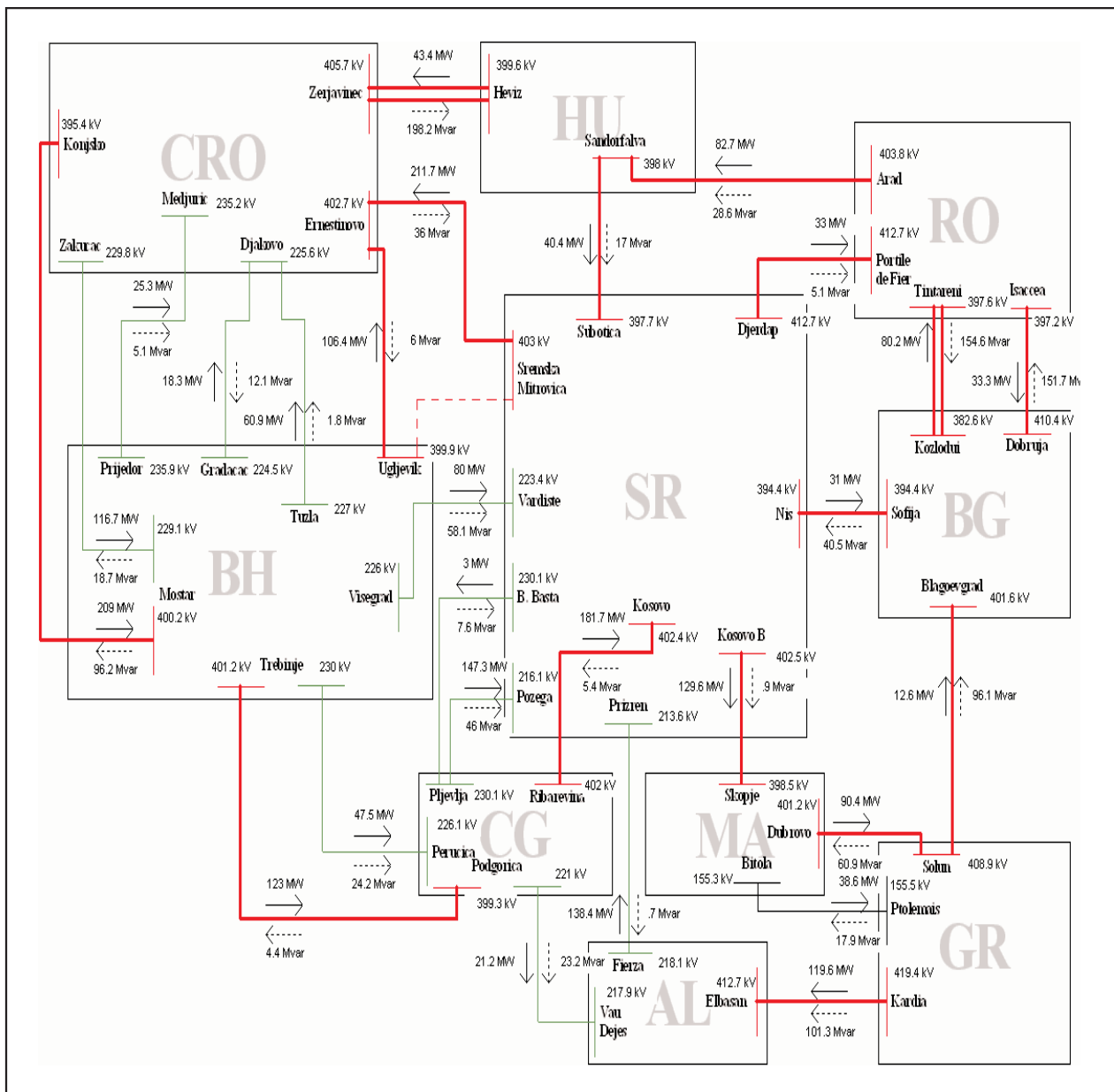
Međutim, da bi se približili što više realnosti, u analizama su obuhvaćeni i različiti programi razmena između EES-a u razmatranoj interkonekciji. Takođe, u pomenutom cilju, izvršen je pokušaj da se, saglasno podacima EMS o tokovima snaga na interkonektivnim dalekovodima, za pomenute datume, dobijenim od strane Stručnih izvestilaca Studije [7], izvrši odgovarajuća šira, odnosno što realnija, re-

konstrukcija vezana za tranzite. O rezultatima toga govori naredna slika 2a, na kojoj se daju tokovi aktivnih i reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima razmatrane interkonekcije i naponi u graničnim čvorovima za stanje EES-a Srbije, koje je ostvareno 26. januara 2006. godine. Sa te slike moguće je uočiti, na primer, značajne tokove snaga po interkonektivnim dalekovodima 400 kV P.D.Fier (RO) -Đerdap (SR) (593 MW) i Sofija (BG) – Niš (SR) (500 MW)

Za početak izlaganja nekih od karakterističnih primera praktične primene razvijene metode, kao ilustracija daje se tabela 1 (primena Opcije I raču-

narskog programa **DEFNAPON**), u kojoj se daju vrednosti dijagonalnih elemenata matrice osetljivosti promena reaktivnih snaga generatora u EES Srbije na promene njihovih naponskih referenci, za ostvareno minimalno stanje 31. juna 2005. godine, ostvareno maksimalno stanje 26. januara 2006. godine i očekivana maksimalna i minimalna stanja 2010. i 2015. godine.

Prikazane vrednosti pokazuju, za razmatrana stanja, za koliko će se promeniti reaktivna snaga generatora (Mvar), ukoliko se njihov napon promeni za 1 % od postojeće vrednosti. Ujedno te vrednosti pokazuju koji generatori imaju najveći upliv na us-



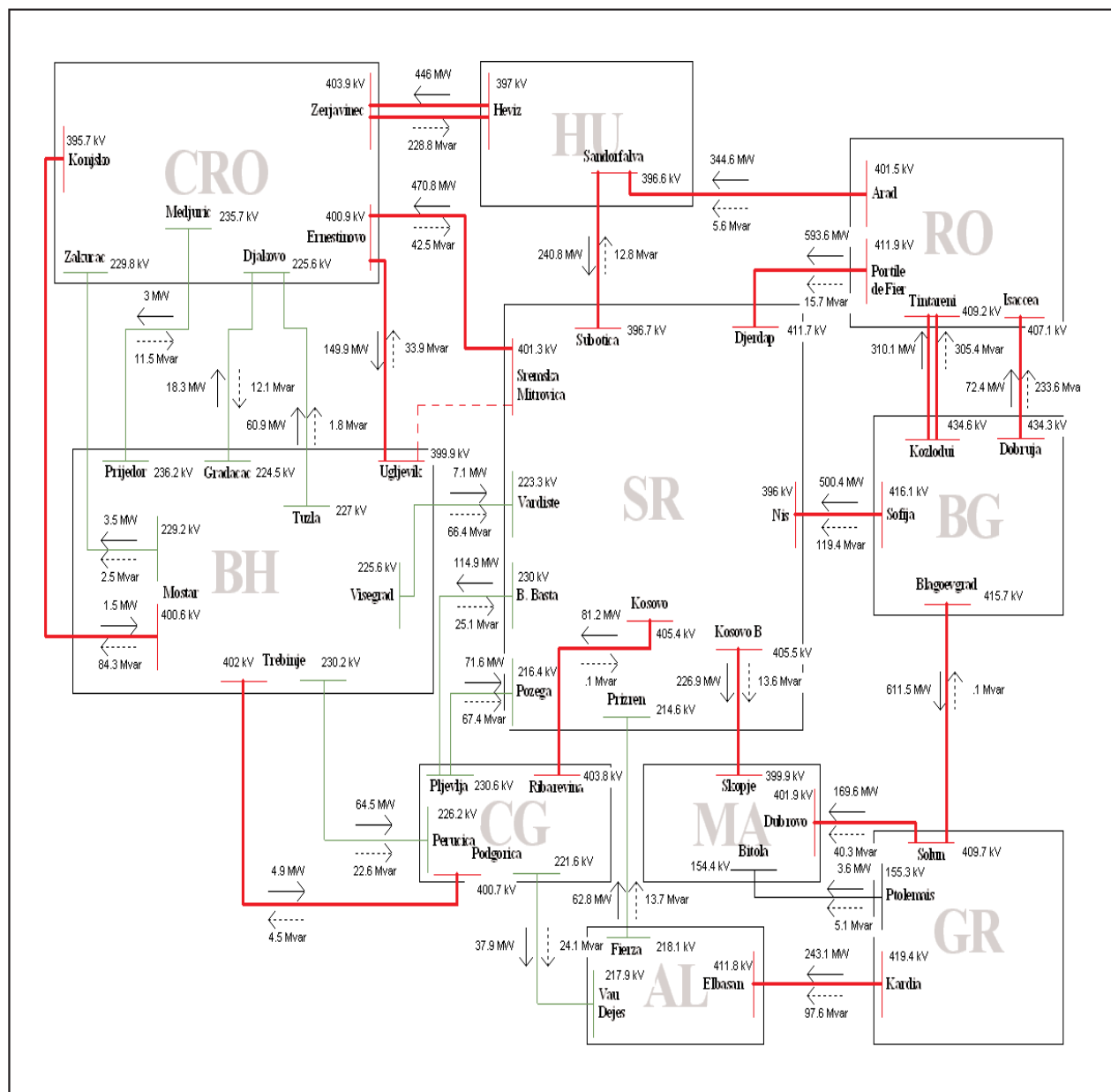
Slika 2. Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i naponske prilike na interkonektivnim dalekovodima razmatrane interkonekcije, za ostvareno stanje 26. januara 2006. godine („nulti totali razmena”)

postavljene naponsko-reaktivne prilike u prenosnoj mreži Srbije.

Kako je to prethodno bilo rečeno, formiranju matrica osjetljivosti prethodila je eliminacija (Gausova) svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji i svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa (a to je EES Srbije). Na primer, za stanje ostvareno 26. januara 2006. godine, u razmatranoj interkonekciji bilo je 1 100 čvorova, a izvršena je eliminacija 1 071 čvora (91 generatorskog i 980 potrošačkih), tako da se problem sveo na 29 čvorova, koliko je tada bilo angažovanih generatora u EES Srbije.

Dobijene vrednosti vandijagonalnih elemenata ovih matrica nisu prikazane, i one se mogu naći u Studiji [7]. Te vrednosti pokazuju za koliko će se promeniti reaktivne snage ostalih angažovanih generatora (Mvar), ako se promeni napon na jednom od izabranih generatora, takođe za 1 % od postojeće vrednosti.

Kao ilustracija, navešće se samo podaci iz narednih tabela 2 i 2a, koji se odnose na TE Nikola Tesla B i „spregu” ove elektrane u naponsko-reaktivnom smislu, sa ostalim relevantnim elektranama, odnosno generatorima, za ostvareno stanje 26. januara 2006. godine.



Slika 2a. Tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i naponske prilike na interkonektivnim dalekovodima razmatrane interkonekcije, za ostvareno stanje 26. januara 2006. godine (inkorporirani tranziti)

Dakle, za razmatrano stanje, ukoliko bi se napon generatora u TE Nikola Tesla B povećao za 1 % od postojeće vrednosti, njegova reaktivna snaga bi se povećala za 71,143 Mvar (videti tabelu 1), odnosno 69,066 Mvar, ako bi se listi angažovanih generatora u EES Srbije pridružili sledeći generatori iz EES Rumunije: HE Portile e Fier 1 (4x190 MVA), Portile De Fier 2 (2x190 MVA) i TE Rovinari (2x388 MVA). Pri tome, došlo bi do odgovarajućeg smanjenja reaktivne snage kod ostalih angažovanih generatora.

U tabelama 2 i 2a, to smanjenje reaktivne snage daje se za relevantne generatore u EES Srbije, za dva

slučaja. U prvom, obuhvaćeni su samo angažovani generatori u EES Srbije, a u drugom slučaju, toj listi generatora priključeni su prethodno pomenutu generatori iz EES Rumunije, odnosno matrica osetljivosti bila je reda 32 (29+3). Saglasno prikazanim pokazateljima u ovim tabelama, evidentno je da je u cilju postizanja željene tačnosti neophodno da se u matricu osetljivosti uključe i elektrane iz susednih sistema (HE P.D.Fier 1, 2 i TE Rovinari), koje su „električno blizu” perifernih generatora u EES (HE Đerdap 1).

Takođe, elementi matrica osetljivosti, koji se odnose na aktivnu snagu, posebno se ne prikazuju,

Dijagonalni elementi matrice osetljivosti  $\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  za niz analiziranih maksimalnih i minimalnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju

Tabela 1.

| Redni broj | Naziv elektrane        | Osetljivost (Mvar/1 % promene napona) |           |                          |                          |                          |           |           |
|------------|------------------------|---------------------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|            |                        | 2005. min                             | 2006. max | 2010. max sa Kolubarom B | 2010. max bez Kolubare B | 2010. min bez Kolubare B | 2015. max | 2015. min |
| 1.         | HE Bistrica            | 5,785                                 | 6,420     | 7,682                    | 7,682                    |                          | 7,749     | 4,136     |
| 2.         | HE Đerdap 2            | 6,461                                 | 7,217     | 7,301                    | 7,302                    | 6,750                    | 7,079     | 4,654     |
| 3.         | HE Đerdap              | 28,318                                | 49,396    | 53,261                   | 40,457                   | 54,231                   | 36,977    |           |
| 4.         | TE Drmno               | 21,671                                | 40,144    | 42,041                   | 41,790                   |                          | 38,775    | 22,167    |
| 5.         | HE Gazivode            | 2,660                                 | 2,741     | 2,742                    | 2,741                    | 2,516                    | 2,804     | 2,614     |
| 6.         | HE Arilje              |                                       |           |                          |                          |                          | 1,892     |           |
| 7.         | HE Bajina Bašta        | 6,482                                 | 23,476    | 22,927                   | 22,910                   |                          | 22,956    | 12,582    |
| 8.         | HE Brodarevo           |                                       |           |                          |                          |                          | 4,083     |           |
| 9.         | HE Ribari              |                                       |           |                          |                          |                          | 1,997     |           |
| 10.        | HE Vrutci              |                                       |           |                          |                          |                          | 2,754     |           |
| 11.        | HE Kokin Brod          |                                       | 1,972     | 1,899                    | 1,899                    | 1,864                    | 1,951     |           |
| 12.        | TE Kolubara 1 2        | 5,687                                 | 6,591     | 5,574                    | 5,567                    |                          | 5,636     | 5,855     |
| 13.        | TE Kolubara 3          | 6,023                                 | 7,022     | 5,979                    | 5,973                    | 5,395                    | 6,004     | 6,229     |
| 14.        | TE Kolubara 4          | 3,092                                 | 3,501     | 3,253                    | 3,246                    | 2,828                    | 2,999     | 3,126     |
| 15.        | TE Kolubara 5          |                                       | 10,047    | 9,380                    | 9,370                    |                          | 9,243     | 8,679     |
| 16.        | TE Kostolac 1          |                                       |           | 9,757                    | 9,749                    | 8,150                    | 8,493     | 8,522     |
| 17.        | TE Kostolac 2          | 11,173                                | 13,236    | 14,307                   | 14,281                   | 13,659                   | 14,879    | 14,684    |
| 18.        | TE Morava              | 7,646                                 | 9,074     | 8,034                    | 7,998                    | 7,670                    | 8,042     | 7,948     |
| 19.        | HE Potpeć              | 3,104                                 | 3,219     | 3,702                    | 3,680                    | 3,783                    | 4,061     | 3,805     |
| 20.        | RHE Bajina Bašta       |                                       | 30,775    | 30,770                   | 30,767                   |                          | 30,932    | 18,173    |
| 21.        | TE Kosovo B            | 19,566                                | 36,803    | 47,486                   | 47,372                   |                          | 50,126    | 24,507    |
| 22.        | TE Kolubara B          |                                       |           | 40,331                   |                          |                          | 45,456    | 23,501    |
| 23.        | TE Kosovo A            | 13,831                                | 26,397    | 27,377                   | 27,361                   | 17,339                   | 27,936    | 13,834    |
| 24.        | TE Nikola Tesla B 1, 2 |                                       | 71,143    | 76,347                   | 72,286                   | 35,433                   | 81,184    | 32,608    |
| 25.        | TE Nikola Tesla A 1, 2 |                                       | 36,793    | 36,724                   | 36,655                   |                          | 36,051    | 17,235    |
| 26.        | TE Nikola Tesla A 3, 4 | 30,157                                | 44,008    | 43,010                   | 42,891                   |                          | 41,471    | 20,659    |
| 27.        | TE Nikola Tesla A 5, 6 | 36,023                                | 52,510    | 53,179                   | 51,544                   |                          | 53,030    | 24,231    |
| 28.        | TE-TO Novi Sad         |                                       | 10,613    | 10,017                   | 9,972                    |                          | 10,285    | 6,026     |
| 29.        | HE Uvac                |                                       | 2,651     | 2,869                    | 2,869                    | 2,618                    | 2,864     | 2,600     |
| 30.        | HE Vrla 1              |                                       | 4,327     | 4,608                    | 4,584                    |                          | 4,694     | 4,295     |
| 31.        | HE Vrla 2              |                                       | 2,564     | 2,630                    | 2,628                    |                          | 2,780     | 2,443     |
| 32.        | HE Vrla 3              |                                       | 2,722     | 2,891                    | 2,893                    |                          | 2,824     | 2,688     |
| 33.        | HE Zavoj               |                                       | 4,464     | 4,489                    | 4,484                    |                          | 4,245     | 3,850     |
| 34.        | HE Zvornik             |                                       | 5,562     | 4,994                    | 4,996                    | 4,589                    | 5,150     | 4,927     |

uz konstataciju da su oni po vrednosti znatno manji (i do sedam puta) od tih vrednosti, koje se odnose na reaktivnu snagu.

Tabela 2.

Relevantni vandijagonalni elementi matrice osetljivosti  $\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  za TE Nikola Tesla B, za ostvareno stanje 26. januara 2006. godine („nulti totali razmene”)

| Redni broj | Naziv elektrane        | Vandijagonalni element (Mvar/ 1 % promene napona u TE Nikola Tesla B) | Vandijagonalni element (Mvar/ 1 % promene napona u TE Nikola Tesla B) Uključene u matricu osetljivosti: HE P. D. Fier i TE Rovinari (RO) |
|------------|------------------------|---|--|
| 1.         | HE Đerdap 1            | -6,353  | -2,824   |
| 2.         | HE Bajina Bašta        | -1,441  | -1,409   |
| 3.         | TE Drmno               | -7,734  | -7,418   |
| 4.         | TE Nikola Tesla A 1, 2 | -5,180  | -5,128   |
| 5.         | TE Nikola Tesla A 3, 4 | -6,468  | -6,421   |
| 6.         | TE Nikola Tesla A 5, 6 | -19,651   | -19,503  |

Tabela 2a.

Relevantni vandijagonalni elementi matrice osetljivosti  $\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  za TE Nikola Tesla B, za ostvareno stanje 26. januara 2006. godine (inkorporirani tranziti)

| Redni broj | Naziv elektrane        | Vandijagonalni element (Mvar/ 1 % promene napona u TE Nikola Tesla B) | Vandijagonalni element (Mvar/ 1 % promene napona u TE Nikola Tesla B) Uključene u matricu osetljivosti: HE P. D. Fier i TE Rovinari (RO) |
|------------|------------------------|---|--|
| 1.         | HE Đerdap 1            | -6,353  | -2,824   |
| 2.         | HE Bajina Bašta        | -1,441  | -1,409   |
| 3.         | TE Drmno               | -7,734  | -7,418   |
| 4.         | TE Nikola Tesla A 1, 2 | -5,180  | -5,128   |
| 5.         | TE Nikola Tesla A 3, 4 | -6,468  | -6,421   |
| 6.         | TE Nikola Tesla A 5, 6 | -19,651   | -19,503  |

To ujedno znači da promene napona generatora bitno ne utiču na električno odate aktivne snage angažovanih generatora. Ili preciznije rečeno, promene električnih aktivnih snaga generatora, usled promena napona na njihovim krajevima, nisu takvog intenziteta da iniciraju značajne reakcije njihovih sistema regulacije snage, tako da se električna aktivna snaga generatora praktično vraća na svoju prethodnu vrednost. O tome, kao i o ostalim relevantnim aspektima, biće detaljnije reči u već pomenutom radu, koji se nalazi u pripremi, u kome će se izložiti rezultati verifikacije predložene metode u okviru dinamičkog prilaza, odnosno praćenja prelaznog procesa u dovoljno dugom vremenskom trajanju, iniciranog promenama naponskih referenci izabranih generatora.

Sledeći primeri bave se verifikacijom predložene metode, u okviru statičkog prilaza, a odnose se na ostvareno stanje 26. januara 2006. godine, uz napomenu da je formirana matrica osetljivosti bila reda 32 (29+3), iz već ranije pomenutih razloga.

Prvi primer odnosi se na primenu Opcije II računarskog programa *DEFNAPON*, odnosno na simultanu promenu napona generatora u TE Nikola Tesla A 1, 2, 3, 4, 5 i 6 i TE Nikola Tesla B 1 i 2, od početnih  $1,00 U_n$  do  $1,05 U_n$ . Efekti toga upravljanja naponima biće interpretirani pokazateljima datim u tabelama 3 („nulti totali razmene”) i 3a (inkorporirani tranziti). U njima se najpre daju vrednosti reaktivne snage izabranih generatora u polaznom stanju  $Q_{GO}$  (Mvar), zatim daju se nove vrednosti reaktivnih snaga generatora  $Q_{GU}$  (Mvar), dobijene uprošćenim prilazom (primena matrice jednačine (6), reda 32, za zadate korekcije napona izabranih generatora) i vrednosti reaktivne snage  $Q_G$  (Mvar), dobijene proračunom tokova snaga i naponskih prilika u razmatranoj interkonekciji, za nove zadate vrednosti napona generatora. Na kraju, daju se greške  $\Delta Q_G$  (u %) koje čini uprošćena metoda.

Tabela 3.

Poređenje rezultata uprošćenog i strožeg prilaza, nakon korekcija napona generatora u TE Nikola Tesla A i B („nulti totali razmene”)

| Redni broj | Naziv elektrane                           | $Q_{GO}$ (Mvar) | $Q_{GU}$ (Mvar) | $Q_G$ (Mvar) | $\Delta Q_G$ (%) |
|------------|---|-----------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1.         | TE Nikola Tesla B 1, 2                    | 260,6           | 452,4           | 455,0        | 0,582            |
| 2.         | TE Nikola Tesla A 1, 2                    | 166,2           | 247,2           | 241,5        | 2,345            |
| 3.         | TE Nikola Tesla A 3, 4                    | 214,1           | 315,8           | 307,6        | 2,673            |
| 4.         | TE Nikola Tesla A 5, 6                    | 151,1           | 264,8           | 266,5        | 0,646            |
| 5.         | Ostali angažovani generatori u EES Srbije | 1 978,7         | 1 617,0         | 1 604,9      | 0,754            |

Saglasno pokazateljima iz tabela 3 i 3a, greške se nalaze u sasvim prihvatljivim granicama (nije

prelazila 3 %). A što se tiče efekata ovakvog upravljanja naponima generatora u TE Nikola Tesla A i B, potrebno je naglasiti da bi se, u novom stanju („nulti totali razmene”), gubici aktivne i reaktivne snage u modelovanoj mreži Srbije smanjili za 4,2 MW, odnosno 49,8 Mvar, a generisanje od strane dalekovoda 110, 220 i 400 kV povećalo bi se za 39,2 Mvar. Za stanje sa inkorporiranim tranzitima, gubici bi se smanjili za 4,7 MW, odnosno 52,1 Mvar, a generisanje od strane dalekovoda 110, 220 i 400 kV povećalo bi se za 39,4 Mvar.

Tabela 3a.

Poređenje rezultata uprošćenog i strožeg prilaza, nakon korekcija napona generatora u TE Nikola Tesla A i B (inkorporirani tranziti)

| Redni broj | Naziv elektrane                           | $Q_{GO}$ (Mvar) | $Q_{GU}$ (Mvar) | $Q_G$ (Mvar) | $\Delta Q_G$ (%) |
|------------|---|-----------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1.         | TE Nikola Tesla B 1, 2                    | 280,0           | 473,1           | 475,8        | -0,570           |
| 2.         | TE Nikola Tesla A 1, 2                    | 163,9           | 244,8           | 239,3        | 2,287            |
| 3.         | TE Nikola Tesla A 3, 4                    | 210,6           | 312,1           | 304,2        | 2,589            |
| 4.         | TE Nikola Tesla A 5, 6                    | 162,6           | 277,0           | 278,6        | -0,592           |
| 5.         | Ostali angažovani generatori u EES Srbije | 2 192,1         | 1 829,6         | 1 813,2      | 0,905            |

Istovremeno, generalno gledano, povećali bi se naponi u graničnim tačkama prenosne mreže Srbije, odnosno relaksirao bi se problem totala razmene reaktivne snage sa susedima za 193,8 Mvar („nulti totali razmene”), odnosno za 193,4 Mvar (inkorporirani tranziti). Na primer, pojedinačno gledano, za stanje sa inkorporiranim tranzitima, napon u Sremskoj Mitrovici bi iznosio 403,8 kV (prethodna vrednost 401,3 kV), a tok reaktivne snage na interkonektivnom dalekovodu Sremska Mitrovica-Ernestinovo bi iznosio -2,4 Mvar (prethodna vrednost -42,5 Mvar).

Dakle, za razmatrano stanje, pokazano je da bi se sa ovom korekcijom napona pomenutih generato-

ra, značajno poboljšala ekonomija pogona prenosne mreže Srbije i relaksirao problem razmene reaktivne snage sa susedima.

Naredni praktični primer polazi od stanja prenosne mreže Srbije (inkorporirani tranziti), uspostavljenog nakon izvršenih prethodno pomenutih korekcija napona generatora u TE Nikola Tesla A i B.

Polazeći od toga stanja, zahtevalo se određivanje novog plana napona angažovanih generatora, kako bi sledeće elektrane korigovale svoju odatu reaktivnu snagu: HE Đerdap 1 (od 165,3 Mvar do novih 215,3 Mvar), TE Drnmo (od 248,6 Mvar do 298,6 Mvar), HE Bajina Bašta (od 70,2 Mvar do 120,2 Mvar), RHE Bajina Bašta (od 54,6 Mvar do 104,6 Mvar), TE Nikola Tesla B 1, 2 (od 475,8 Mvar do 395,8 Mvar), TE Nikola Tesla A 1, 2 (od 239,3 Mvar do 199,3 Mvar), TE Nikola Tesla A 3, 4 (od 304,2 Mvar do 264,2 Mvar) i TE Nikola Tesla A 5, 6 (od 278,6 Mvar do 238,6 Mvar). Za te svrhe korišćena je Opcija III računarskog programa **DEF-NAPON**, odnosno, za prethodno definisane korekcije reaktivne snage, izvršeno je najpre rešavanje matrice jednačine (12), reda 32 (29+3), koje je dovelo do novih vrednosti napona angažovanih generatora, a zatim su određivani novi tokovi snaga i naponske prilike u razmatranoj interkonekciji, za novodobijene vrednosti napona angažovanih generatora.

Tabela 4 prikazuje dobijene rezultate. U njoj je sa  $U_{GO}$  označena početna vrednost napona prethodno pomenutih generatora u r.j. (relativnim jedinicama, u kojima je baza – nominalni napon generatora  $U_n$ ), a oznaka  $U_{GN}$  odnosi se na novodobijene vrednosti napona generatora, takođe u r.j., za zadate nove vrednosti reaktivnih snaga. Veličina  $\Delta U_G$  ( u %) predstavlja promenu napona generatora. Vrednosti reaktivnih snaga u polaznom stanju označene su sa  $Q_{GO}$  (Mvar), a zadate nove vrednosti reaktivnih snaga generatora sa  $Q_{GU}$  (Mvar). Vrednosti reaktivne snage, dobijene proračunom tokova snaga i naponskih prilika u razmatranoj interkonekciji, za nove

Tabela 4.

Poređenje rezultata uprošćenog i strožeg prilaza, nakon uspostavljanja novog plana napona za zadate korekcije reaktivnih snaga odabranih generatora

| Redni broj | Naziv elektrane        | $U_{GO}$ (r.j.) | $U_{GN}$ (r.j.) | $\Delta U_G$ (%) | $Q_{GO}$ (Mvar) | $Q_{GU}$ (Mvar) | $Q_G$ (Mvar) | $\Delta Q_G$ (%) |
|------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1.         | HE Đerdap 1            | 0,989           | 1,001           | 1,3              | 165,3           | 215,3           | 225,0        | -4,283           |
| 2.         | TE Drnmo               | 1,037           | 1,050           | 1,3              | 248,6           | 298,6           | 298,5        | 0,041            |
| 3.         | HE Bajina Bašta        | 0,969           | 1,000           | 3,1              | 70,2            | 120,2           | 121,3        | -0,867           |
| 4.         | RHE Bajina Bašta       | 0,960           | 0,985           | 2,5              | 54,6            | 104,6           | 107,4        | -2,643           |
| 5.         | TE Nikola Tesla B 1, 2 | 1,050           | 1,039           | -1,1             | 475,8           | 395,8           | 401,9        | -1,518           |
| 6.         | TE Nikola Tesla A 1, 2 | 1,050           | 1,038           | -1,2             | 239,3           | 199,3           | 201,3        | -0,968           |
| 7.         | TE Nikola Tesla A 3, 4 | 1,050           | 1,039           | -1,1             | 304,2           | 264,2           | 266,6        | -0,898           |
| 8.         | TE Nikola Tesla A 5, 6 | 1,050           | 1,040           | -1,0             | 278,6           | 238,6           | 241,7        | -1,275           |

vrednosti napona generatora, označene su sa  $Q_G$  (Mvar). Na kraju ove tabele, daju se greške  $Q_G$  (u %) koje čini predložena uprošćena metoda.

Efekti dobijenog novog naponskog plana angažovanih generatora, ogledali bi se u daljem smanjenju gubitaka aktivne i reaktivne snage za 0,6 MW, odnosno 15,6 Mvar, a generisanje od strane dalekovoda 110, 220 i 400 kV povećalo bi se za 6,2 Mvar. Pri tome, došlo bi do povećanja rezerve u reaktivnoj snazi angažovanih generatora u EES Srbije za 54,2 Mvar, odnosno, sa novim naponskim planom, uz dalje poboljšanje ekonomije pogona, povećala bi se i sigurnost rada prenosne mreže Srbije.

Prethodno izloženi praktični primeri odnosili su se na maksimalna stanja razmatrane interkonekcije, u kojima je na jedan indikativan način pokazano da se adekvatnim izborom napona generatora može da postigne unapređenje ekonomije pogona prenosne mreže Srbije. Ujedno, pokazana je i upotrebna vrednost predložene uprošćene metode, s obzirom da su se greške nalazile u sasvim prihvatljivim granicama, kada je reč o kategoriji uprošćenih metoda. Najveća greška je iznosila oko 4 %, i to za perifernu elektranu HE Đerdap 1 (videti tabelu 4). Međutim, da nisu u matrici osetljivosti bile uvršćene HE P. D. Fier (RO) i TE Tintareni (RO), „električno bliske” HE Đerdap 1, ta greška bi, za HE Đerdap 1, umesto -4,283 %, iznosila -23,3 %.

Takođe, u okviru ovih karakterističnih praktičnih primera primene predložene nove metode, obuhvaćena su i minimalna stanja prenosne mreže Srbije. Kao ilustracija, u ovom radu, daju se rezultati koji se odnose na minimalno stanje, koje se očekuju 2015. godine, imajući u vidu da će ono biti zaoštrenije u odnosu na postojeća minimalna stanja, kao i na minimalna stanja koja se očekuju 2010. godine, iz razloga koji su detaljno elaborirani u Studiji [7]. Naime, kako se to i očekivalo, i kako je to već bilo uočeno za očekivano minimalno stanje 2010. godine, u cilju realizacije povoljnih naponsko-reaktivnih prilika u prenosnoj mreži Srbije, povećala se potreba za potpobuđenim režimima rada generatora u EES Srbije. To je bila logična posledica sagledanog

daljeg razvoja prenosne mreže Srbije, odnosno uvođenja novih elemenata (dalekovoda), saglasno podacima iz Studije [8].

I za minimalna stanja, analizirana u [7], potvrdio se veliki značaj adekvatnog izbora naponskih referenci generatora za uspostavljene naponsko reaktivne prilike u prenosnoj mreži Srbije, odnosno za racionalizaciju primene potpobuđenih režima rada. Inače, problematika potpobuđenih režima rada generatora, u čijem kontekstu je suštinski cilj bio utvrđivanje relevantnih limitirajućih faktora za njihovu uspešnu praktičnu primenu u nas, dugo se neguje u Institutu „Nikola Tesla”, o čemu svedoče neke od sledećih referenci [20–24].

Sprovedene široke analize u [7], omogućile su konstataciju da, i za očekivana minimalna stanja 2015. godine, postoje realni uslovi da se ostvare povoljne naponsko-reaktivne prilike, uz mogućnost racionalizacije, odnosno harmonizacije primene potpobuđenih režima angažovanih generatora u EES Srbije.

Kao ilustracija prethodnog rečeno, poslužiće naredna tabela 5, koja je rezultat primene Opcije II računarskog programa *DEFNAPON*, za simultanu promenu napona generatora u HE Đerdap 1 (od početnih 1,000 Un do 0,980 Un) i u TE Nikola Tesla A 1, 3, 5 TE Nikola Tesla B 1 (od početnih 0,975 Un do 0,985 Un). U toj tabeli, analogno prethodnim tabelama, sa  $U_{GO}$  je označena početna vrednost napona prethodno pomenutih generatora (u r.j.). Oznaka  $U_{GN}$  odnosi se na nove, zadate vrednosti napona (takođe u r.j.), a veličina  $U_G$  (u %) predstavlja promenu napona generatora. Vrednosti reaktivnih snaga u polaznom stanju označene su sa  $Q_{GO}$  (Mvar), a nove vrednosti reaktivnih snaga generatora, dobijene rešavanjem matrične jednačine (6), sa  $Q_{GU}$  (Mvar). Veličina  $Q_G$  (Mvar) predstavlja nove vrednosti reaktivnih snaga, dobijene proračunom tokova snaga i naponskih prilika u razmatranoj interkonekciji, za nove zadate vrednosti napona generatora, a veličina  $Q_G$  (u %) je greška koju čini uprošćena metoda.

Saglasno iznetim pokazateljima u tabeli 5, evidentno je da bi predloženi novi plan napona relaksi-

Tabela 5.

Poređenje rezultata uprošćenog i strožeg prilaza, nakon korekcija napona generatora u HE Đerdap i TE Nikola Tesla A i B.

| Redni broj | Naziv elektrane    | $U_{GO}$ (r.j.) | $U_{GN}$ (r.j.) | $\Delta U_G$ (%) | $Q_{GO}$ (Mvar) | $Q_{GU}$ (Mvar) | $Q_G$ (Mvar) | $\Delta Q_G$ (%) |
|------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1.         | HE Đerdap 1        | 1,000           | 0,980           | - 2,0            | 270,3           | 131,1           | 133,8        | -1,948           |
| 2.         | TE Nikola Tesla B1 | 0,975           | 0,985           | 1,0              | -111,9          | -84,0           | -82,6        | 1,712            |
| 3.         | TE Nikola Tesla A1 | 0,975           | 0,985           | 1,0              | -29,3           | -19,0           | -18,6        | 2,350            |
| 4.         | TE Nikola Tesla A3 | 0,975           | 0,985           | 1,0              | -35,7           | -23,0           | -22,4        | 2,314            |
| 5.         | TE Nikola Tesla A5 | 0,975           | 0,985           | 1,0              | -62,4           | -44,0           | -45,6        | 1,899            |



rao potrebu za potpobuđenim režimima rada tada angažovanih generatora u TE Nikola Tesla A i B, što je bio i cilj, a što svakako ima veoma pozitivne eksploatacione efekte.

Ujedno, i na ovom praktičnom primeru potvrđena je upotrebnost vrednosti predložene metode, odnosno računarskog programa **DEFNAPON**, jer greška u određivanju novih vrednosti reaktivnih snaga nije prelazila 3 %. Takođe, i u ovom slučaju, da nisu u matrici osetljivosti bile izvršene HE P. D. Fier (RO) i TE Tintareni (RO), „električno bliske” HE Đerdap 1, ta greška bi za ovu elektranu, umesto -1,948 %, iznosila 32,824 %.

Međutim, kako je to već ranije istaknuto, da bi se dobila potrebna sigurnost i pouzdanost dobijenih rezultata, verifikacija predložene metode će se obaviti u okviru dinamičkog prilaza, što će biti predmet posebnog rada, koji se nalazi u pripremi. Takođe, predmet narednih istraživanja biće definisanje mesta i uloge predložene metode, u širem kontekstu odvijanja sekundarne i tercijarne regulacije napona, ako se prethodno utvrdi tehno-ekonomska opravdanost njenog automatskog odvijanja u prenosnoj mreži Srbije. Naravno, ta regulacija će se i dalje obavljati „ručno”, u okviru koje, predložena metoda, praćena razvijenim računarskim programom, može da nađe svoje odgovarajuće mesto.

## 6. ZAKLJUČCI

*U radu je izložen razvoj i praktična primena jedne nove metode, odnosno računarskog programa **DEFNAPON**, za brzo i dovoljno tačno definisanje naponskih referenci generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja. Verifikacija predložene metode obavljena je u okviru statičkog simulacionog modela, koji je integralni deo pomenutog razvijenog računarskog programa, na primerima ostvarenih i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju.*

*Na tim praktičnim primerima, za maksimalna stanja, pokazano je kako je moguće poboljšati ekonomiju pogona, odnosno smanjiti gubitke aktivne i reaktivne snage i poboljšati sigurnost rada, povećanjem rezerve reaktivne snage angažovanih generatora. U minimalnim stanjima, upravljanje naponima se obavljalo u cilju minimizacije potreba za potpobuđenim režimima rada generatora, odnosno njihovu raspodelu na generatore koji su najpogodniji za to. Ujedno, na ovim praktičnim primerima utvrđena je upotrebnost vrednosti predložene metode, jer najveća vrednost greške u određivanju novih vrednosti reaktivnih snaga generatora se kretala oko 4 %.*

*Predmet narednih istraživanja biće definisanje mesta i uloge predložene metode i njenog poveziva-*

*nja sa odgovarajućom informacionom osnovom, u širem kontekstu odvijanja sekundarne i tercijarne regulacije napona, ako se prethodno utvrdi tehno-ekonomska opravdanost njenog automatskog odvijanja u prenosnoj mreži Srbije.*

*Do tada, predložena metoda, praćena razvijenim računarskim programom, mogla bi da nađe svoje odgovarajuće mesto, u okviru analiza i pripreme pogona, koje se obavljaju u odgovarajućim službama u Elektromeži Srbije. Naravno, ako potencijalni Korisnik oceni da to može da mu koristi..*

## 7. LITERATURA

- [1] Zvanični izveštaji Komisija Elektroprivrede Srbije formiranih povodom poremećaja u radu sistema 18. 05. i 6. 07. 2004. godine.
- [2] Tubić D. „, Stojković B. PONOVO POVEZIVANJE SA GLAVNIM DELOM UCTE MREŽE, časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 2004, str. 3-8.
- [3] UCTE Operation Handbook, Policy 3: Operational Security; B. Voltage Control and Reactive Power Management, final draft, 18 june 2004.
- [4] Izveštaj Stručnog tima za problematiku reaktivne snage i energije u EES EPS-a, Beograd, oktobar, 2004.
- [5] IZBOR NAČINA SMANJENJA REAKTIVNOG OPTEREĆENJA U ELEKTRODISTRIBUTIVNOJ MREŽI ZA 200 Mvar, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2005.
- [6] IZBOR OPTIMALNOG NAČINA SMANJENJA REAKTIVNOG OPTEREĆENJA S GLEDIŠTA PRENOSNE MREŽE PO TS 110/X kV/kV U MREŽI EMS-a, U UKUPNOM IZNOSU OD DODATNIH 200 Mvar (170 Mvar NA NISKOM NAPONU I 30 Mvar NA SREDNJEM NAPONU), Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2006.
- [7] PLANIRANJE IZVORA REAKTIVNE SNAGE U PRENOSNOJ MREŽI EES SRBIJE – II FAZA, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2006.
- [8] STUDIJA DUGOROČNOG RAZVOJA PRENOSNE MREŽE 400 kV, 220 kV I 110 kV NA PODRUČJU REPUBLIKE SRBIJE, ZA PERIOD DO 2025. GODINE, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2006.
- [9] POBOLJŠANJE KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE U EES EPS-a KORIŠĆENJEM POSTOJEĆIH KONDENZATORSKIH BATERIJA, (I faza-područje JP Elektrodistribucija Beograda i JP „Elektrovovodina”, Novi Sad, Projekat-Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” Beograd, 2001/2002.
- [10] POBOLJŠANJE KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE U EES EPS-a KORIŠĆENJEM POSTOJEĆIH KONDENZATORSKIH BATERIJA, (II faza-područje JP „Elektrosrbija” Kraljevo), Pro-

- jekat-Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” Beograd, 2002/2003.
- [11] POBOLJŠANJE KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE U EES EPS-a KORIŠĆENJEM POSTOJEĆIH KONDENZATORSKIH BATERIJA (III faza-područje Elektrodistribucija Kragujevac, Požarevac, Užice i Zaječar), Projekat-Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” Beograd, 2004/2005.
- [12] Mijailović S., Vujasinović Z., Cvijetić I., Marković S., REKONEKCIJA UCTE-A: NOVI USLOVI EKSPLOATACIJE, 13. simpozijum „Upravljanje i telekomunikacije u EES”, Tara, 29. maj-02. jun., 2006, Referat C2 I01.
- [13] Cvijetić I., EXPERIENCES AND OUTCOMES AFTER RE-SYNCHRONIZATION OF THE UCTE 2, EPS, Power System Control Department, 2005.
- [14] Čalović M., Stefanov P., Sarić A., UPRAVLJANJE NAPONIMA I REAKTIVNIM SNAGAMA, poglavlje u monografiji „Planiranje i eksploatacija elektroenergetskih sistema”, Institut „Nikola Tesla”, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Institut „Mihajlo Pupin”, Beograd, 1995.
- [15] Popović D. P., ODREĐIVANJE TOKOVA SNAGA U POLAZNIM USTALJENIM STANJIMA U ANALIZAMA SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, časopis „Elektroprivreda”, br. 2, str. 13-26, 2000.
- [16] Popović D.P., STATIČKA SIGURNOST ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, Monografija, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, juni 2004.
- [17] Popović D. P., JEDNA METODA UPRAVLJANJA TOKOVIMA REAKTIVNIH SNAGA U NORMALNIM I HAVARIJSKIM STANJIMA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 2006, str. 7-24.
- [18] Popović D. P., Stojković M., RAČUNARSKI PROGRAM ZA UTVRĐIVANJE LOKACIJE I SNAGE UREĐAJA ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE, Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-Jahorina, 22-24. mart, 2006, referat D-1.
- [19] Popović. D.P., Dobrijević Đ., Minić S., Marinković M., Petrić M., Ivanović B., A UNIFIED APPLICATION SOFTWARE FOR STEADY-STATE SECURITY AND AUTOMATIC CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, EUROCON 2005, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005.
- [20] STUDIJA RADA SINHRONIH GENERATORA U POTPOBUDI U SISTEMU SRBIJE ZA PERIOD 1975, 1980. i 1985. (drugi deo), Institut „Nikola Tesla”, 1974.
- [21] ANALIZA POTPOBUĐENIH REŽIMA RADA TURBOGENERATORA TE „NIKOLA TESLA” A I B”, Institut „Nikola Tesla”, 1984.
- [22] Popović D.P., Petrović D., Ljubić V, POTPOBUĐENI REŽIMI RADA ELEKTRANA U FUNKCIJI REGULACIJE NAPONSKO-REAKTIVNIH PRILIKA U MINIMALNIM REŽIMIMA EES JUGOSLAVIJE SA POSEBNIM OSVRTOM NA TE „NIKOLA TESLA”, Časopis „Energija”, br.5, 1985.
- [23] Popović D.P., Petrović D., OGRANIČENJA U PRIMENI POTPOBUĐENIH REŽIMA RADA SINHRONIH GENERATORA SISTEMA SRBIJE, XX stručno savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Budva, 1975, časopis „Elektroprivreda”, br. 9-10, 1975.
- [24] Popović D.P., ANALIZA UTICAJA VIŠE-AGREGATNOSTI NA STATIČKU STABILNOST ELEKTRANA U POTPOBUĐENOM REŽIMU RADA, XIII stručno savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled, 1977.

Rad je primljen u uredništvo 13. 11. 2006. godine



**Dragan P. Popović** rođen je 1943. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1965. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1981. godine na smeru Elektroenergetski sistemi, a doktorsku tezu odbranio maja 1984. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Po diplomiranju, zaposlio se u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla”, gde se i sada nalazi na radnom mestu višeg savetnika u centru „Elektroenergetski sistemi”. Godine 1997. izabran je u najviše naučno-istraživačko zvanje naučni savetnik. Maja meseca 2005. godine izabran je za dopisnog člana Jugoslovenske inženjerske akademije u Odeljenju za elektrotehniku. Kao autor (pretežno) ili koautor do sada je objavio jednu monografiju, preko 180 naučnih i stručnih radova i razvio je veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih stanja elektroenergetskih interkonekcija.

---

Jovan Nahman,  
Dragoslav Perić, Dragutin Salamon i Ivana Vlajić-Naumovska

# Proračuni pouzdanosti distributivnih sistema primenom korelacionih matrica

Originalni naučni rad  
UDK: 621.311.1; 621.3.05; 512.643

---

**Rezime:**

Analize pouzdanosti su vrlo važne u okviru procena kvaliteta rada distributivnih mreža i postrojenja. Učestanost i trajanje prekida napajanja koji su posledice kvarova u distributivnom sistemu bitno utiču na štete/troškove kod potrošača električne energije. U većini deregulisanih elektroenergetskih sistema se prema pokazateljima pouzdanosti napajanja procenjuje kvalitet rada jedne distribucije na osnovu koga se odobrava njen profit i/ili odobravaju sredstva za dalje investicije. U mnogim zemljama distribucija je obavezna da, pod određenim uslovima, nadoknađuje štete potrošačima prouzrokovane prekidom napajanja. U radu se prikazuje jednostavna metoda za proračune svih bitnih pokazatelja pouzdanosti elemenata distributivnog sistema i načini njihovog obuhvatanja kod procena pouzdanosti napajanja potrošača na različitim naponskim nivoima. Uvodi se pojam korelacione matrice koja se sastavlja tabelarnim pregledom mogućih kvarova i njihovih efekata. Predložena metoda jednostavna je za praktičnu primenu i zasniva se samo na poznavanju delovanja zaštite i automatike i procedura kod nalaženja i otklanjanja kvara.

**Ključne reči:** distributivni sistemi, pouzdanost, korelaciona matrica

---

**Abstract:**

**EVALUATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS RELIABILITY  
BY APPLICATION OF CORRELATION MATRICES**

The reliability analysis is a crucial task in assessing the quality performances of distribution systems. The frequency and duration of supply interruptions directly affect the cost of consumers of electrical energy as well as their comfort. In the majority of deregulated electric power systems the quality of operation of a distribution company is quantified by the Regulator by referring to its reliability indices. These indices affect the decisions on allowable profits and means for further system reinforcement and development. In many countries the distribution company pays, under certain conditions, the costs caused to the consumers due to interruptions of power delivery. This paper presents a simple practical method for the calculation of all of the reliability indices that affect the consumer costs, for all distribution voltage levels. The correlation tables and matrices are introduced as a new approach describing the correlation between the faults and associated activities with their consequences to the major system functions. The proposed approach is very simple for practical application, being only based upon the knowledge of the operation of the substations and networks, their relay protection and the procedures and means for fault location and associated switching manipulations.

**Key words:** distribution systems, reliability, correlation matrix

---

Prof. dr Jovan Nahman, prof. dr Dragutin Salamon – Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73  
Prof. dr Dragoslav Perić, mr Ivana Vlajić-Naumovska – Viša elektrotehnička škola, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 283

## 1. POSTROJENJA

### 1.1. Modelovanje postrojenja

Da bi se utvrdile posledice prekida napajanja usled kvarova i održavanja potrebno je izračunati merodavne pokazatelje pouzdanosti postrojenja/mreže. Pomenuti proračun može se podeliti u nekoliko koraka :

- Obrazovanje funkcionalnih blokova;
- Utvrđivanje funkcija postrojenja čija se pouzdanost želi analizirati;
- Formiranje korelacione matrice između ispada funkcionalnih blokova i funkcija koje ovi ispadi prekida pri čemu se uzimaju u obzir kvarovi generalno, aktivni kvarovi i planske aktivnosti vezane za održavanje, neophodne manipulacije u eksploataciji i dr.;
- Proračun pokazatelja pouzdanosti za obavljanje svake od razmatranih funkcija (učestanosti prekida različitog trajanja, trajanje pomenutih prekida, ukupno godišnje trajanje prekida, ukupni godišnji broj prekida, srednje trajanje prekida) i
- Proračun šteta usled narušavanja razmatranih funkcija zavisno od strukture potrošnje kojoj se prekida napajanje i

Pod *funkcionalnim blokom* podrazumeva se skup elemenata postrojenja koji su funkcionalno povezani tako da isključenje iz pogona bilo kog elementa bloka isključuje iz pogona i ostale elemente bloka.

Pojam *aktivni kvar* odnosi se na kvarove koji zahtevaju delovanje zaštite i prekidača. Kvarovi uopšte izbacuju iz pogona blok u kvaru. Oni uključuju u sebi i aktivne kvarove. Međutim, aktivni kvar nekog elementa bloka, pored izbacivanja iz pogona odgovarajućeg bloka u kome se taj element nalazi, može da, zbog delovanja susednih prekidača, isključi i ispravne delove postrojenja i prekine i neke druge funkcije postrojenja. U proračunima se u vezi sa aktivnim kvarovima obuhvataju samo pomenuti dodatni efekti koji se odnose na elemente postrojenja van bloka.

### 1.2. Pokazatelji pouzdanosti funkcionalnog bloka

Neka se funkcionalni blok sastoji iz  $n$  elemenata. Učestanost kvarova bloka tada je jednaka zbiru učestanosti kvarova pojedinih elemenata

$$f_B = \sum_{k=1}^n f_k \quad (1)$$

Srednje trajanje prekida rada bloka usled kvarova njegovih elemenata jednako je

$$r_B = \frac{\sum_{k=1}^n f_k r_k}{f_B} \quad (2)$$

Simbol  $r_k$  u izrazu (2) označava trajanje kvara  $k$ -tog elementa bloka.

Ako blok sadrži prekidače, aktivni kvarovi bloka sa dodatnim efektima su aktivni kvarovi ovih prekidača. Naime, aktivni kvar prekidača dovodi do delovanja prekidača susednih blokova koji ih isključuju i tako mogu da uzrokuju dodatne prekidne nekih funkcija. Pomenuti dodatni efekti aktivnih kvarova traju onoliko vremena koliko je potrebno da se utvrdi vrsta kvara i izvedu potrebne manipulacije kako bi se isključeni ispravni delovi postrojenja ponovo stavili u pogon. Ovo vreme zavisi od toga da li je postrojenje posednuto ili ne i od postojeće zaštite i automatike.

Racionalna je pretpostavka da se planski remont radi jednovremeno za sve elemente bloka za koje je to predviđeno. Tako je učestanost isključenja bloka zbog planskog remonta jednaka učestanosti zbog planskog remonta elementa bloka koji se najčešće remontuje

$$f_{Br} = \max_k (f_{rk}) \quad (3)$$

gde se indeks  $k$  odnosi na elemente bloka.

Radi primera, na slici 1 su isprekidanim linijama označeni funkcionalni blokovi za jedno jednostavno postrojenje sa dve transformatorske jedinice jednakih snaga i jednim sistemom sabirnica na oba naponska nivoa. Granice blokova idu preko rastavljača jer se preko ovih blokovi mogu rastaviti. Rastavljači su obično vrlo pouzdani elementi tako da se kod proračuna pokazatelja blokova njihovi kvarovi mogu izostaviti. Izuzetak su blokovi sabirničkih sistema. Ovdje se kvarovi sabirničkih rastavljača uzimaju u obzir pri čemu se zbirna učestanost njihovih kvarova dodaje učestanosti kvarova samih sabirnica.

### 1.3. Korelaciona matrica kvarova i prekida funkcija

Da bi se formirala korelaciona matrica za šemu postrojenja treba utvrditi funkcije čija se pouzdanost želi analizirati. Za postrojenje na slici 1 te funkcije mogu biti:

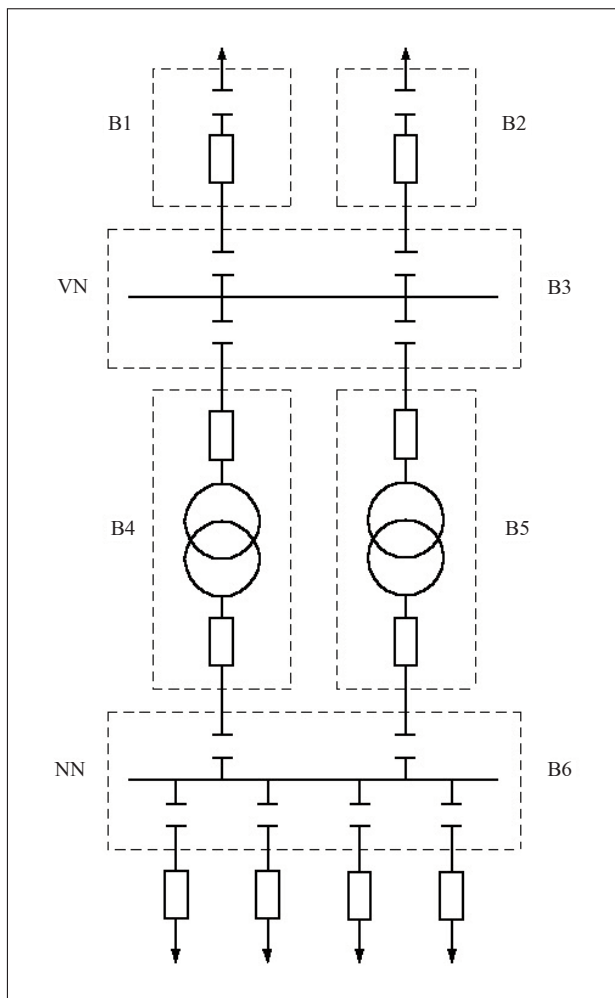
1. Prekid tranzita snage i energije kroz postrojenje na visokonaponskoj strani;
2. Ispad cele instalisane snage i
3. Ispad samo polovine instalisane snage.

Korelaciona matrica ima onoliko kolona koliko ima funkcija koje se analiziraju i onoliko redova koliko ima kvarova koji se mogu dogoditi u postroje-

nju. Ako kvar  $i$  dovodi do prekida neke od funkcija, u red  $i$  matrice upisuje se jedinica u kolonu koja se odnosi na tu funkciju. Ako kvar ne prekida neku od funkcija, u odgovarajuću kolonu upisuje se nula.

Ako se uzimaju u obzir samo kvarovi pojedinačno, a ne i njihove koincidencije, što je opravdano s obzirom na relativno veliku pouzdanost elemenata postrojenja, ukupan broj kvarova u srazmeri je sa brojem funkcionalnih blokova. U slučaju kada se imaju dodatni efekti kod aktivnih kvarova svih blokova, ukupan broj kvarova je bar dva puta veći od broja blokova.

Isključenje blokova zbog planskog održavanja obično se analizira odvojeno od kvarova jer se ove aktivnosti izvode u vremenskim periodima kada je to najpovoljnije za potrošače pa su i moguće štete zbog prekida napajanja manje nego kod kvarova.



Slika 1. Distributivna transformatorska stanica

Podatke za proračune najjednostavnije je pripremiti u obliku tabele. U prvu kolonu tabele upisuje se učestanost kvarova blokova, u drugu trajanje

kvarova, a u ostale kolone jedinice i nule, u zavisnosti od toga koje funkcije postrojenja prekida razmatrani kvar. Za postrojenje na slici 1 pomenuta tabela imala bi izgled prikazan u tabeli 1. Tri poslednje kolone tabele 1 predstavljaju u stvari korelacionu matricu.

Aktivni kvarovi blokova B1 i B2 (prekidača vodova) dovode do delovanja prekidača na drugom napojnom vodu  $i$ , kao posledicu, do isključenja celog postrojenja. Ovo su dodatni efekti aktivnih kvarova koji se obuhvataju. Njihov efekat na sam blok kome pripadaju obuhvaćen je kvarom bloka.

Svaki kvar sabirničkog bloka B3 prekida tranzit kroz postrojenje i napajanje svih potrošača iz posmatranog postrojenja. Ovde nema efekata aktivnog kvara koji nisu obuhvaćeni kvarom pa zato ovih nema u tabeli.

Kvar bloka B4 dovodi do ispada polovine instalisane snage postrojenja. Aktivni kvar prekidača na višenaponskoj strani uzrokuje prekid tranzita kroz postrojenje i isključenje celog postrojenja zbog delovanja prekidača napojnih vodova. Aktivni kvar prekidača na niženaponskoj strani aktivira prekidače na višenaponskoj strani bloka B4 i na niženaponskoj strani bloka B5 čime se prekida napajanje potrošača, ali se ne narušava tranzit kroz postrojenje na višenaponskoj strani. Za blok B5 važi isto što i za blok B4.

Tabela 1.

Pokazatelji blokova i korelaciona matrica za TS na slici 1.

| $f_{B_i}$<br>kvarova/godišnje | $r_{B_i}, h$ | Funkcija 1 | Funkcija 2 | Funkcija 3 |
|-------------------------------|--------------|------------|------------|------------|
| $f_{B1}$                      | $r_{B1}$     | 1          | 0          | 0          |
| $f_{aB1}$                     | $r_{aB1}$    | 0          | 1          | 0          |
| $f_{B2}$                      | $r_{B2}$     | 1          | 0          | 0          |
| $f_{aB2}$                     | $r_{aB2}$    | 0          | 1          | 0          |
| $f_{B3}$                      | $r_{B3}$     | 1          | 1          | 0          |
| $f_{B4}$                      | $r_{B4}$     | 0          | 0          | 1          |
| $f_{aB4VN}$                   | $r_{aB4}$    | 1          | 1          | 0          |
| $f_{aB4NN}$                   | $r_{aB4}$    | 0          | 1          | 0          |
| $f_{B5}$                      | $r_{B5}$     | 0          | 0          | 1          |
| $f_{aB5VN}$                   | $r_{aB5}$    | 1          | 1          | 0          |
| $f_{aB5NN}$                   | $r_{aB5}$    | 0          | 1          | 0          |
| $f_{B6}$                      | $r_{B6}$     | 0          | 1          | 0          |
| $f_{aB6}$                     | $r_{aB6}$    | 0          | 1          | 0          |

Svaki kvar sabirničkog bloka B<sub>6</sub>, u koji treba uračunati i sve vrste kvarova sabirničkih rastavljača, dovodi do prekida napajanja svih potrošača dok se kvar ne otkloni. Zato, kao i kod VN sabirnice, nema dodatnih efekata aktivnih kvarova ovog bloka koji već nisu obuhvaćeni kvarom. Kod sabirnice su ipak uvedeni efekti aktivnih kvarova, ne elemenata blo-

ka, već prekidača odvoda pošto ovi dovode do delovanja prekidača transformatora i isključenja svih potrošača. Učestanost aktivnih kvarova prekidača odvoda jednaka je

$$f_{ae} = f_a + p f_{av} \quad (4)$$

Sa  $f_a$  u (4) označena je učestanost aktivnih kvarova prekidača,  $f_{av}$  je učestanost aktivnih kvarova odvoda koji se napaja preko prekidača, a  $p$  je verovatnoća otkaza delovanja zaštite i/ili prekidača kod kvarova na odvodu. Učestanost  $f_{aB6}$  izračunava se kao zbir učestanosti  $f_{ae}$  prekidača odvoda.

Efekte planskih aktivnosti na postrojenju obuhvataju se na isti način kao u tabeli 1, sa odgovarajućim podacima o učestanosti i trajanju tih aktivnosti.

#### 1.4. Pokazatelji pouzdanosti

Učestanosti narušavanja funkcije i postrojenja dobijaju se u obliku vektora kolone ako se iz prve kolone tabele 1 izdvoje oni elementi koji u koloni za funkciju i imaju jedinicu. Primenom istog postupka na drugu kolonu tabele 1 dobija se vektor kolona trajanja prekida funkcije  $i$ . Ako pomenute vektore označimo sa  $[f_i]$  i  $[r_i]$ , ukupno trajanje prekida posmatrane funkcije (neraspoloživost), izraženo u časovima godišnje, biće

$$u_i = [f_i]^T [r_i] \quad (5)$$

Ukupna učestanost prekida funkcije  $i$  dobija se sabiranjem učestanosti kvarova koji prekidaju ovu funkciju

$$f_{is} = \sum_k f_{ik} \quad (6)$$

Sa  $f_{ik}$  označena je učestanost prekidanja funkcije  $i$  kod kvara  $k$ . Indeks  $k$  obuhvata sve kvarove koji prekidaju funkciju  $i$ .

Srednje trajanje prekida funkcije  $i$  kada dođe do prekida jednako je

$$r_{ia} = \frac{u_i}{f_{is}} \quad (7)$$

Vektori  $[f_i]$  i  $[r_i]$ , neraspoloživost  $u_i$ , učestanost  $f_{is}$  i prosečno trajanje kvara  $r_{ia}$  su osnovni pokazatelji za procenu pouzdanosti sa kojom postrojenje obavlja funkciju  $i$ . Na osnovu njih mogu se proceniti i štete koje treba očekivati godišnje usled prekidanja ove funkcije. Kao što je poznato, štete zavise od vrste potrošača, učestanosti i trajanja prekida. Potrebni podaci o učestanosti i trajanju prekida sadržani su u vektorima  $[f_i]$  i  $[r_i]$ .

#### 1.5. MATLAB program nssavail.m

Program *nssavail.m* određuje ranije navedene pokazatelje pouzdanosti za svaku od analiziranih funkcija postrojenja. Ako se sa  $n$  označi ukupan broj kvarova u postrojenju, *ulazne veličine* su:

$f$  –  $n$  dimenzionalni vektor kolona učestanosti kvarova u postrojenju, u kvarovima/godišnje;

$r$  –  $n$  dimenzionalni vektor kolona trajanja kvarova u postrojenju, u h;

$m$  – ukupan broj razmatranih funkcija postrojenja i  $g$  –  $(n \times m)$  dimenzionalna korelaciona matrica za kvarove i funkcije.

*Izlazni podaci* iz programa su:

$r_i$  – vektor trajanja prekida funkcije  $i$  sa trajanjima poredanim po narastajućim vrednostima, u h;

$f_i$  – vektor učestanosti prekida funkcije  $i$  sa različitim trajanjem prema  $r_i$ , u kvarovima/godišnje;

$u_i$  – ukupno trajanje prekida funkcije  $i$ , u h/godišnje;

$f_{is}$  – ukupna učestanost prekida funkcije  $i$ , u

prekida/godišnje i

$r_{ia}$  – prosečno trajanje jednog prekida funkcije  $i$ , u h.

Izlazni podaci se navode za svaku funkciju redom, onako kako su one numerisane.

Radi ilustracije, razvijeni program primenjen je na jednostavnom primeru postrojenja na slici 1. U tabeli 2 navedeni su potrebni podaci za postrojenje, saglasno tabeli 1.

Tabela 2.

Podaci za postrojenje na slici 1

| Kvar              | $f_B$ ,<br>kvarova/<br>godišnje | $r_B$ , h | Funkcija 1 | Funkcija 2 | Funkcija 3 |
|-------------------|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| B <sub>1</sub>    | 0.04                            | 8.0       | 1          | 0          | 0          |
| B <sub>a1</sub>   | 0.02                            | 0.1       | 0          | 1          | 0          |
| B <sub>2</sub>    | 0.04                            | 8.0       | 1          | 0          | 0          |
| B <sub>a2</sub>   | 0.02                            | 0.1       | 0          | 1          | 0          |
| B <sub>3</sub>    | 0.02                            | 6.0       | 1          | 1          | 0          |
| B <sub>4</sub>    | 0.10                            | 12.0      | 0          | 0          | 1          |
| B <sub>a4VN</sub> | 0.02                            | 0.1       | 1          | 1          | 0          |
| B <sub>a4NN</sub> | 0.02                            | 0.1       | 0          | 1          | 0          |
| B <sub>5</sub>    | 0.10                            | 12.0      | 0          | 0          | 1          |
| B <sub>a5VN</sub> | 0.02                            | 0.1       | 1          | 1          | 0          |
| B <sub>a5NN</sub> | 0.02                            | 0.1       | 0          | 1          | 0          |
| B <sub>6</sub>    | 0.05                            | 6.0       | 0          | 1          | 0          |
| B <sub>a6</sub>   | 0.02                            | 0.1       | 0          | 1          | 0          |

Ulazni podaci u MATLAB formatu su :

- m=3;
- f= [0.04 0.02 0.04 0.02 0.02 0.1 0.02 0.02 0.1 0.02 0.02 0.05 0.2]’;
- r= [8 0.1 8 0.1 6 12 0.1 0.1 12 0.1 0.1 6 0.1]’;

–  $g=[1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0$   
 $0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1$   
 $0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$ .

Izlazni rezultati iz programa :

– ans = Interrupted function index:  $i = 1$   
–  $f_i = 0.0400\ 0.0200\ 0.0800$ ,  $r_i = 0.1000\ 6.0000$   
 $8.0000$   
–  $u_i = 0.7640$ ,  $f_{is} = 0.140$ ,  $r_{ia} = 5.457\ 1$   
– ans = Interrupted function index:  $i = 2$   
–  $f_i = 0.3200\ 0.0700\ 0$ ,  $r_i = 0.1000\ 6.0000\ 8.0000$   
–  $u_i = 0.4520$ ,  $f_{is} = 0.3900$ ,  $r_{ia} = 1.1590$   
– ans = Interrupted function index:  $i = 3$   
–  $f_i = 0.2000\ 0\ 0$ ,  $r_i = 12\ 0\ 0$   
–  $u_i = 2.4000$ ,  $f_{is} = 0.2000$ ,  $r_{ia} = 12.0000$

Ulazni podaci za MATLAB program unose se direktno iz tabele 2, naredbom *past*. Tako se, na primer, za vektor učestanosti u MATLAB radnoj površini upiše  $f=[a$  zatim se iz tabele 2 naredbom *past* unesu podaci i onda ukuca ]; kako bi se vektor zatvorio i ne bi bio ponovo ispisan na ekranu. Kod matrice  $g$  kopiraju se odmah sve tri odgovarajuće kolone tabele 2. Nulte vrednosti u izlaznim rezultatima za poslednje elemente odgovarajućih vektora označavaju da ovi elementi ne postoje. Radi uštede u prostoru, navedene matrice/vектори su ispisane transponovano.

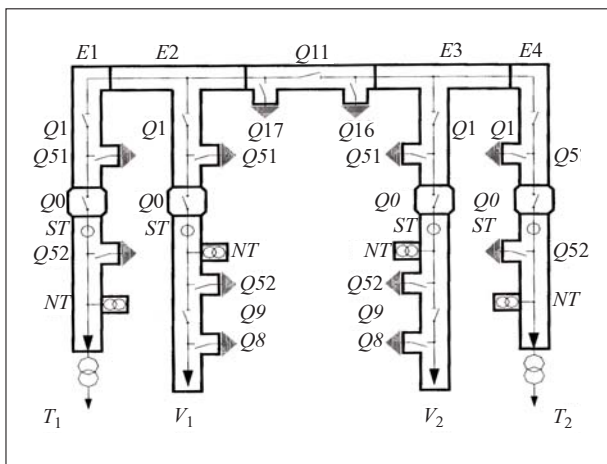
Obrazovanje korelacione tabele i matrice prikazaćemo na realnom primeru transformatorske stanice TS 110/10 kV/kV „Kalemegdan”. Na slici 2 prikazana je jednopolna šema višenaponskog dela ove transformatorske stanice.

Sekcioni rastavljač  $Q11$  na višenaponskoj strani u normalnom pogonu je zatvoren.

Na niženaponskoj strani svaki transformator napaja dve sekcije sabirnica sa po devet odvoda. Svaka sekcija štiti se svojim transformatorskim prekidačem. Susedne sekcije sabirnica mogu se povezati sekcionim prekidačima i tako potrošači vezani za sekcije sabirnica jednog transformatora prebaciti na drugi transformator u slučaju potrebe, ako to ukupno opterećenje transformatorske stanice dozvoljava.

Kako se vidi, šema ove TS je simetrična što pojednostavljuje proračune.

U proračunima pokazatelja pouzdanosti koji su potrebni za procenu šteta usled prekida napajanja najracionalnije je odvojeno odrediti pokazatelje za višenaponski i niženaponski deo postrojenja. Pri tome se štete usled prekida određenih funkcija zbog kvarova u višenaponskom delu sabiraju sa štetama prekida istih funkcija usled kvarova na niženaponskom delu. To isto važi i za ukupnu učestanost prekida funkcija i ukupnu neraspoloživost postrojenja



Slika 2. Jednopolna šema višenaponskog dela TS 110/10 kV/kV „Kalemegdan”

za obavljanje tih funkcija. U narednom tekstu se pokazuje kako izgledaju korelacione matrice za oba razmatrana dela postrojenja.

Tabela 3 prikazuje korelacionu matricu za višenaponski deo postrojenja. Sa 1 je označen tranzit kroz postrojenje, sa 2 je označen ispad iz pogona cele TS, sa 3 je označen ispad transformatora  $T_1$ , a sa 4 ispad transformatora  $T_2$ .

Blok BR obuhvata elemente komore sa sekcionim rastavljačem višenaponskih sabirnica. Svaki kvar ovog bloka dovodi do istih ukupnih posledica tako da dodatnih efekata aktivnih kvarova nema. Blok BS1 obuhvata elemente sabirničke komore transformatora  $T_1$ . Svaki kvar ovog bloka prekida rad transformatora  $T_1$  i tranzit. Dodatni efekat aktivnog kvara bloka je ispad iz pogona cele TS. Sve što je rečeno za prethodno razmatrani blok važi i za blokove BS2 i BS2a s tom razlikom što kvarovi bloka BS2 isključuju transformator  $T_2$ . Blok  $BT_1V$  obuhvata sve elemente transformatorskog polja transformatora  $T_1$  sa izuzetkom prekidača na niženaponskoj strani. Efekti aktivnih kvarova ovog bloka (aktivni kvarovi transformatorskog prekidača na višenaponskoj strani) su prekid tranzita i ispad cele TS. Efekti kvarova bloka  $BT_2V$  isti su kao i za blok  $BTV_1$ , ali sada obuhvataju transformator  $T_2$ . Blok  $BV_1$  čine prekidač voda  $V_1$  i prateća merna i zaštitna oprema polja. Smatra se da svaki od oba voda koji napajaju TS može sam da podnese celo opterećenje TS. Ako je to slučaj, kvar bloka  $BV_1$  narušava samo tranzit. Dodatni efekat aktivnog kvara ovog bloka je ispad cele TS. Sve što je rečeno za blok  $BV_1$  važi i za blok  $BV_2$ .

Zbog simetrije šeme TS dovoljno je odrediti pokazatelje pouzdanosti samo za napajanje sekcija niženaponskih sabirnica transformatora  $T_1$ . Pokazatelji pouzdanosti ovih sekcija transformatora  $T_2$  jedna-

ki su pokazateljima za transformator  $T_1$ . Tabela 4 prikazuje korelacionu matricu za sekcije niženaponskih sabirnica transformatora  $T_1$ .

Tabela 3.  
Korelaciona matrica za višenaponsku stranu TS

| Blok              | Funkcija            |                   |                 |                 |
|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                   | 1 – prekid tranzita | 2 – ispad cele TS | 3 – ispad $T_1$ | 4 – ispad $T_2$ |
| BR                | 1                   | 1                 | 0               | 0               |
| BS <sub>1</sub>   | 1                   | 0                 | 1               | 0               |
| BS <sub>1a</sub>  | 0                   | 1                 | 0               | 0               |
| BS <sub>2</sub>   | 1                   | 0                 | 0               | 1               |
| BS <sub>2a</sub>  | 0                   | 1                 | 0               | 0               |
| BT <sub>1</sub>   | 0                   | 0                 | 1               | 0               |
| BT <sub>1a</sub>  | 1                   | 1                 | 0               | 0               |
| BT <sub>2V</sub>  | 0                   | 0                 | 0               | 1               |
| BT <sub>2Va</sub> | 1                   | 1                 | 0               | 0               |
| BV <sub>1</sub>   | 1                   | 0                 | 0               | 0               |
| BV <sub>1a</sub>  | 0                   | 1                 | 0               | 0               |
| BV <sub>2</sub>   | 1                   | 0                 | 0               | 0               |
| BV <sub>2a</sub>  | 0                   | 1                 | 0               | 0               |

Tabela 4.  
Korelaciona matrica za sekcije nižeg napona sabirnica transformatora  $T_1$

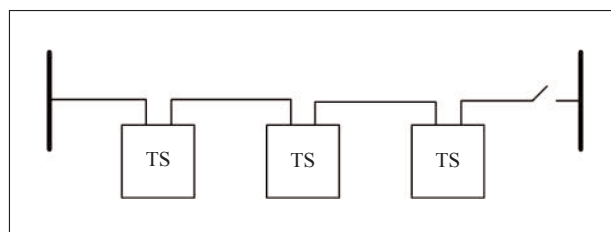
| Blok   | Funkcija                  |                            |                             |
|--------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|        | 1 – napajanje obe sekcije | 2 – napajanje prve sekcije | 3 – napajanje druge sekcije |
| BP1    | 0                         | 1                          | 0                           |
| BP1a   | 1                         | 0                          | 0                           |
| BP2    | 0                         | 0                          | 1                           |
| BP2a   | 1                         | 0                          | 0                           |
| BSEK1  | 0                         | 1                          | 0                           |
| BSEK1a | 1                         | 0                          | 0                           |
| BSEK2  | 0                         | 0                          | 1                           |
| BSEK2a | 1                         | 0                          | 0                           |

Blok BP1 je prekidač na niženaponskoj strani transformatora  $T_1$  kojim se isključuje prva sekcija sabirnica koje transformator napaja. Efekat aktivnog kvara ovog prekidača je jednovremeno isključenje obe sekcije. Blok BP2 je prekidač na niženaponskoj strani transformatora  $T_1$  kojim se isključuje druga sekcija sabirnica. Efekat aktivnog kvara ovog prekidača je takođe jednovremeno isključenje obe sekcije. Blok BSEK1 je prva sekcija sabirnica. Kvar bloka BSEK1 isključuje ovu sekciju dok se kvar ne otkloni. Sa BSEK1a obuhvaćeni su aktivni kvarovi (izvlačivih) prekidača odvoda koji polaze sa razmatrane sekcije. Ovi se kvarovi razmatraju posebno jer kod njih prekid rada sekcije traje samo onoliko vre-

mena koliko je potrebno da se prekidač u kvaru otkloni/zameni. Sve rečeno za BSEK1 i BSEK1a važi i za BSEK2 i BSEK2a.

## 2. NAPOJNI VODOVI

Napojni vodovi mogu značajno da utiču na pokazatelje pouzdanosti i troškove i smetnje kod potrošača usled prekida napajanja. Način proračuna ovih pokazatelja i efekata napojnog puta biće prikazan na primeru voda na slici 3. Na pomenutoj slici je prikazana najprostija šema napajanja radi jednostavnosti. Sva razmatranja u ovom odeljku i navedeni izrazi međutim važe i u slučaju bilo kakve razgranate radialne mreže. U opštem slučaju termin „vod” zamenjuje se terminom „napojni put” do posmatrane TS ili potrošača za koji se određuje pouzdanost napajanja.



Slika 3. Primer napojnog voda

### 2.1. Mreže 110 kV i 35 kV sa dvostranim napajanjem

Prvo se razmatra slučaj kada se na sabirnice u prolaznim TS vod priključuje preko prekidača, što je uobičajeno kod vodova 110 kV i 35 kV, kao i da postoji mogućnost napajanja sa drugog kraja. Učestanost i trajanje prekida napajanja  $k$ -te TS tada su jednaki

$$[f_k] = \left[ \lambda_k + \sum_{i=1}^{k-1} f_{Ti} \right] \quad (8)$$

$$[r_k] = [s] \quad (9)$$

U (8) i (9) su

$\lambda$  – broj kvarova voda po 1 km dužine godišnje;  
 $l_k$  – dužina puta napajanja do  $k$ -te TS;  
 $f_{Ti}$  – učestanosti prekida tranzita u svim TS ispred  $k$ -te TS gledano od izvornog postrojenja i  
 $s$  – trajanje prebacivanja na napajanje sa drugog kraja.

Kako se vidi, vektori i učestanosti trajanja prekida koji su ulazni parametri za program *nssavail.m*, imaju u razmatranom slučaju samo jedan element jer se kod svih prekida napajanja pogon nastavlja nakon vremena koje je potrebno da se postrojenja koja su ostala bez napona priključe na napajanje sa drugog kraja.



Ako se intenziteti otkaza razlikuju na pojedinim deonicama puta napajanja, prvi član na desnoj strani

izraza (8) treba zameniti sa  $\sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i l_i$  gde su sa  $\lambda_i$

označeni intenziteti otkaza na deonicama puta a sa  $\lambda_i$  njihove dužine.

## 2.2. Mreže 110 kV i 35 kV bez dvostranog napajanja

U posmatranom slučaju napajanje TS koja zbog kvarova na napojnom putu ostaje bez napona ponovo će se uspostaviti kada se otklone efekti kvarova. Efekti aktivnih kvarova prolaznih postrojenja na tranzit otklanjaju se manipulacijama unutar postrojenja, a kvarovi u postrojenjima koji prekidaju tranzit i kvarovi na vodu otklanjaju se opravkom ili zamenom. Učestanost i trajanje prekida napajanja  $k$ -te TS jednaki su

$$[f_k] = \left[ \lambda l_k \quad \bigcup_{i=1}^{k-1} [f_{Ti}] \right]^T \quad (10)$$

$$[r_k] = \left[ r_v \quad \bigcup_{i=1}^{k-1} [r_{Ti}] \right]^T \quad (11)$$

Simbol  $\bigcup$  u ovim izrazima označava da se vektori kolone učestanosti i trajanja obrazuju nastavljanjem jedan na drugi odgovarajućih vektora za prolazne TS. Sa  $r_v$  je označeno trajanje opravke napojnog puta.

## 2.3. Mreže 20 kV i 10 kV sa dvostranim napajanjem

U TS 10(20)/0,4 kV/kV napojni vodovi se sa višenaponskim sabirnicama vezuju preko rastavljača koji ne isključuju struje kvara. Ove struje se isključuju prekidačem u izvornoj TS. Zato kvarovi na celoj dužini mreže prekidaju napajanje  $k$ -te TS. Vreme trajanja prekida napajanja jednako je vremenu potrebnom da se locira kvar i izvedu manipulacije potrebne da se iz šeme napajanja izdvoji deo u kvaru, a TS iza mesta kvara, gledano sa strane izvorne TS, priključe na izvor na drugom kraju. U posmatranom slučaju učestanost i trajanje prekida napajanja  $k$ -te TS izračunava se primenom izraza

$$[f_k] = \left[ \lambda l + \sum_{i=1}^n f_{Ti} \right] \quad (12)$$

$$[r_k] = [s] \quad (13)$$

gde je  $n$  ukupan broj TS koje vod napaja. Ostali simboli imaju isto značenje kao u izrazima (8) i (9). Vreme  $s$  kod vodova 110 kV i 35 kV je znatno duže jer obuhvata i vreme traženja mesta kvara koje nije kratko ako ne postoji daljinski nadzor i upravljanje.

## 2.4. Mreže 20 kV i 10 kV bez dvostranog napajanja

Kvarovi na dužini napojnog puta koji je iza  $k$ -te TS, gledano sa strane izvora, isključuju iz pogona ovu TS samo za vreme koje je potrebno da se locira kvar i izvedu manipulacije potrebne da se iz šeme napajanja izdvoji deo u kvaru. Kod kvarova ispred  $k$ -te TS, računato sa strane izvora, prekid napajanja ove TS traje toliko vremena koliko je potrebno da se manipulacijama u prolaznim postrojenjima otklone efekti aktivnih kvarova transformatorskih prekidača odnosno da se poprave ili zamene elementi u kvaru. Učestanosti i trajanja prekida napajanja  $k$ -te TS u razmatranom slučaju su jednaki

$$[f_k] = \left[ \lambda(l - l_k) + \sum_{i=k+1}^n f_{Ti} \quad \lambda l_k \quad \bigcup_{i=1}^{k-1} [f_{Ti}] \right]^T \quad (14)$$

$$[r_k] = \left[ s \quad r_v \quad \bigcup_{i=1}^{k-1} [r_{Ti}] \right]^T \quad (15)$$

sa istim značenjem simbola kao ranije.

## 2.5. Mreže 0,4 kV sa dvostranim napajanjem

Prekid napajanja potrošača  $k$  traje onoliko vremena koliko je potrebno da se ustanovi mesto kvara i prevezivanjem potrošač priključi na napajanje sa drugog kraja. S obzirom na prethodno, i u razmatranom slučaju se za proračun trajanja i učestanosti prekida napajanja koriste izrazi (8) i (9).

## 2.6. Mreže 0,4 kV bez dvostranog napajanja

Uslovi napajanja su slični onima za vodove 20 (10) kV. Jedina razlika se sastoji u tome što u razmatranom slučaju nema prolaznih TS i njihovih efekata. Trajanja i učestanosti prekida napajanja jednaki su

$$[f_k] = [\lambda(l - l_k) \quad \lambda l_k]^T \quad (16)$$

$$[r_k] = [s \quad r_v]^T \quad (17)$$

sa istim značenjem simbola kao ranije.

Ilustracije radi, razmotrimo sledeći primer proračuna: Vod 35 kV napaja tri TS 35/10 kV/kV bez mogućnosti dvostranog napajanja. Treba ustanoviti

uticaj voda na pouzdanost napajanja potrošača krajnje transformatorske stanice. Pokazatelji za napojni vod su  $\lambda = 0,1$  kvar/(km godina),  $l=10$  km,  $r_v=8$  h, a za prolazne transformatorske stanice su

$$[f_{t1}] = [0.32 \ 0,07] \quad [r_{t1}] = [0.1 \ 6.0]$$

$$[f_{t2}] = [0.24 \ 0.05] \quad [r_{t2}] = [0.1 \ 6.0]$$

Prema navedenim podacima i izrazima (10) i (11) je

$$[f_k] = [1 \ 0.32 \ 0,07 \ 0.24 \ 0.05]$$

$$[r_k] = [8 \ 0.1 \ 6.0 \ 0.1 \ 6.0]$$

Ulazni podaci za program *nssavail.m* su, napisani u MATLAB formatu su

$$m = 1; f = [1 \ 0.32 \ 0.07 \ 0.24 \ 0.05]';$$

$$r = [8 \ 0.1 \ 6.0 \ 0.1 \ 6.0]';$$

$$g = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]';$$

Matrica-vektor  $g$  sastavljena je isključivo od jedinica jer svi događaji prekidaju istu, jedinu funkciju - napajanje  $k$ -te TS.

Primenom programa *nssavail.m* dobija se

ans = Interrupted function index:  $i = 1$

$$f_i = 0.5600 \ 0.1200 \ 1.0000,$$

$$r_i = 0.1000 \ 6.0000 \ 8.0000$$

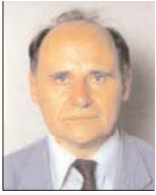
$$u_i = 8.7760, f_{is} = 1.6800, r_{ia} = 5.2238$$

### 3. ZAKLJUČAK

*U radu je prikazana jednostavna praktična metoda za proračune pokazatelja pouzdanosti distributivnih postrojenja i mreža radialne strukture. Uveden je pojam korelacione matrice kojom se uspostavlja veza između kvarova i njihovog uticaja na pouzdanost izvršavanja određenih funkcija. Korelaciona matrica neposredno se sastavlja iz radne tabele postrojenja ili napojnog puta u mreži za čije je obrazovanje potrebno jedino poznavanje rada postojeće automatike i zaštite i pokazatelja pouzdanosti osnovnih elemenata postrojenja i mreža. Proračunom se dobijaju podaci o učestanosti prekida napajanja potrošača različitog trajanja koji predstavljaju osnovne ulazne parametre za procene šteta kod potrošača i stepene neprihvatljivosti.*

### 4. LITERATURA

- [1] METHODS TO CONSIDER CUSTOMER INTERRUPTION COSTS IN POWER SYSTEM ANALYSIS, CIGRE Task Force 38.06.01 report, convener R. Billinton, Paris, 2002.
- [2] J. Nahman sa saradnicima, VREDNOVANJE ŠTETA OD PREKIDA NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM POTROŠAČA DISTRIBUTIVNIH MREŽA J. P. „ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD”, studija urađena za J. P. „Elektrodistribucija Beograd”, april, 2005.
- [3] J. Nahman sa saradnicima, POUZDANOST DISTRIBUTIVNIH SISTEMA, Studija urađena za EPS, oktobar 1999.
- [4] Warren C.A., R. Ammon, G. Welch, A SURVEY OF DISTRIBUTION RELIABILITY MEASUREMENT PRACTICES IN THE U.S., IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No 1, 1999, pp.250-257.
- [5] Billinton R., DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY PERFORMANCE AND EVALUATION, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 10, No 3, 1988, pp.190-200.
- [6] Brown R.E., i dr., DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY ASSESSMENT: MOMENTARY INTERRUPTIONS AND STORMS, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.12, No 4, 1997, pp. 1569-1575.
- [7] Pearson D. J., Rose V. G., RISK ASSESSMENT MODEL FOR DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.38.1-4.
- [8] Nippert T., IMPROVEMENT OF THE (N-1) CRITERION INTRODUCING A PROBABILISTIC FAILURE RATE RELIABILITY CRITERION, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.37.1-6.
- [9] Niechziol R., STRATEGY FOR THE RENEWAL OF 110 kV SUBSTATIONS, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.33.1-6.
- [10] Backes, J., Koglin, H.,J., Klein, L., NETWORK PLANNING UNDER ECONOMIC ASPECTS WITH SPECIAL REGARD TO RELIABILITY, CIRED 97, Conference Publication No 438, 1997, pp. 6.02.1-5.
- [11] FAULT MANAGEMENT IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS, CIRED Working Group WG-03, final report, CIRED Conf. Nice, 1999.
- [12] Brown R.E., ELECTRIC POWER DISTRIBUTION RELIABILITY, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [13] J. Nahman, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, ANKETIRANJE DOMAĆINSTAVA O STEPENU NEPRIHVATLJIVOSTI PREKIDA NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM, ETRAN, Zlatibor, 2001.



**Jovan Nahman** rođen je u Beogradu. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Energetskom odseku, diplomirao je 1960. godine i doktorirao 1969. godine. Do 2001. godine bio je stalno zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu kao redovni profesor. Na diplomskim studijama predavao je predmete Elektrane i razvodna postrojenja i Opšta energetika, a na postdiplomskim studijama predmete Visokonaponska postrojenja i Pouzdanost elektroenergetskih sistema. Drži nastavu iz navedenih predmeta na postdiplomskim studijama. Bavi se problematikom projektovanja, eksploatacije, planiranja i održavanja elektroenergetskih postrojenja i mreža.



**Dragoslav M. Perić** je rođen 1958. godine u Rači. Diplomirao je 1983. na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, gde je i magistrirao 1989. na smeru Elektroenergetski sistemi i odbranio doktorsku tezu 1997. godine. Radi kao profesor na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu i kao nastavnik u zvanju docenta na Fakultetu za dizajn. Objavio je više naučnih i stručnih radova i knjiga. Bavi se elektrodistributivnim sistemima i primenom softverskih alata u projektovanju.



**Dragutin D. Salamon** rođen je u Vukovaru, Republika Hrvatska, 1949. godine. Na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu diplomirao je 1973. godine, na Energetskom odseku. Na istom fakultetu magistrirao je 1978, a doktorirao 1992. godine. Od 1973. godine stalno je zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, trenutno u zvanju vanrednog profesora. Na diplomskim studijama predaje predmete iz oblasti električnih merenja na Energetskom odseku, dok na postdiplomskim studijama drži nastavu iz predmeta Merne sprege i merni transformatori i Merne metode i instrumentacija u elektroenergetici na smeru za Metrologiju. Bavi se problematikom merenja u elektroenergetici i projektovanja, eksploatacije i održavanja elektroenergetskih postrojenja i mreža.



**Ivana Vlajić-Naumovska** rođena je u Smederevskoj Palanci. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu diplomirala 1998. godine na Energetskom odseku na smeru za Energetske pretvarače i pogone, a magistrirala 2003. godine na smeru Elektroenergetska postrojenja i oprema. Od 1999. godine radi na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu kao asistent, a od 2004. godine kao predavač na predmetima Električne instalacije i osvetljenje, Elementi elektroenergetskih sistema i Aplikativni softver. Bavi se pouzdanošću distributivnih sistema i primenom računara u elektroenergetici i obrazovanju.

---

*Dobrivoje Stojanović,  
Ivana Mladenović i Lidija Korunović*

# **Alokacija gubitaka u radijalnim distributivnim mrežama**

Stručni rad  
UDK: 621.311.1

---

*Rezime:*

*U ovom radu je data uporedna analiza različitih metoda alokacije gubitaka aktivne snage u radijalnim distributivnim mrežama. Alokacija gubitaka vrši se na osnovu tokova struja ili njihovih komponenti po grana-ma mreže. Daju se formule za proračun i raspodelu gubitaka u svakoj grani mreže. Koristi se linearni i kva-dratni princip raspodele zajedničkih gubitaka. Rezultati proračuna su diskutovani na test mreži sa 32 čvora.*

**Ključne reči:** *alokacija gubitaka, gubici snage, distributivne mreže*

---

*Abstract:*

## **LOSS ALLOCATION IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS**

*Comparative analysis of different real power allocation methods in radial distribution networks is pre-sented in this paper. Loss allocation is performed on the basis of current flows or flows of their components through network branches. Formulas for total loss calculation in each network branch and its allocation are given. Linear and square distribution principles of total losses are used. Calculation results are disscu-sed on the example of test network with 32 nodes.*

**Key words:** *loss allocation, power losses, distribution networks*

---

## **1.UVOD**

Distributivna preduzeća snabdevaju potrošače električnom energijom koja je preuzeta iz prenosne mreže ili, neposredno, od proizvođača. U procesu distribucije električne energije neizbežno se javljaju gubici snage i energije. Ovi gubici direktno utiču na poslovanje distributivnog preduzeća. S obzirom na činjenicu da u stvaranju gubitaka učestvuju svi po-trošači distributivne mreže, prirodno je da oni treba da učestvuju i u plaćanju dela troškova nastalih usled gubitaka. Troškovi gubitaka snage i energije nadoknađuju se od potrošača kroz odgovarajući ta-

rifni sistem. Mnoge zemlje u svetu imaju tarifne si-steme koji uvažavaju aktivnu i reaktivnu energiju i vršnu (maksimalnu) snagu kroz tarifne stavove ve-zane za period dana i sezonu. Takav je i naš tarifni sistem, u ovom trenutku. Međutim, u uslovima dere-gulacije elektroprivrede, gde se električna energija tretira kao roba široke potrošnje, nužno je da se tačno utvrdi udeo svakog potrošača u stvaranju ukup-nih gubitaka kako bi potrošač mogao da izmiri oba-veze u pogledu plaćanja dela troškova gubitaka. Drugim rečima potrebno je da se izvrši alokacija gu-bitaka na čvorove odnosno potrošače u tim čvorovi-ma, kako bi se kroz tarifni sistem uvažio stvarni uti-

---

*Prof. dr Dobrivoje Stojanovic, dipl. ing. el., Ivana Mladenovic, dipl. ing. el., mr Lidija Korunovic, dipl. ing. el.,  
– Elektronski fakultet, 18 000 Niš, A. Medvedeva 14*

caj svakog potrošača na troškove gubitaka električne energije.

Koliki će biti uticaj nekog potrošača na gubitke u distributivnoj mreži zavisi od brojnih faktora, kao što su: snaga potrošača, dijagram potrošnje, tip potrošnje, naponski nivo napajanja, relativna lokacija čvora, topologija mreže i tokovi struja i snaga po elementima mreže.

Tačan proračun gubitaka snage i energije, kao i utvrđivanje uzroka i lokacija njihovog nastajanja su polazne pretpostavke za fer alokaciju gubitaka na potrošače, koja podrazumeva to da se troškovi gubitaka rasporede potrošačima shodno teretu koji oni nameću distributivnoj mreži. Činjenica da su gubici u mreži nelinearna funkcija struja (snaga) pojedinih potrošača (čvorova), čini nemogućim analitički tačno deljenje ukupnih gubitaka u mreži na sumu članova. Pored toga, treba imati u vidu i to da je u distributivne mreže uključen veoma veliki broj pojedinačnih, tokom vremena vrlo promenljivih i prostorno različito raspoređenih potrošača. Sve to dodatno otežava proračun gubitaka i ugrožava tačnost proračuna alokacije gubitaka na pojedine čvorove (potrošače). Bez obzira na poteškoće, u mnogim zemljama odvija se intenzivan rad na istraživanju metoda i razvoju algoritama za alokaciju gubitaka i za obračun preuzete snage i energije od strane potrošača [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], koji, u većoj ili manjoj meri, uvažavaju zahteve za fer alokaciju. Iako je, u ovom trenutku, problem alokacije gubitaka posebno izražen u prenosnim mrežama, perspektivno, on može biti interesantan i za distributivne mreže. Tačnost nijedne od metoda za alokaciju gubitaka matematički ne može da se dokaže, zato što sve metode vrše procenu, više ili manje tačnu, zavisno od usvojenih kriterijuma za raspodelu gubitaka koji su posledica nelinearnih članova u jednačinama gubitaka.

Metode alokacije gubitaka predviđene za prenosne mreže mogu se u osnovi koristiti i za distributivne mreže. Međutim, zbog radialne strukture distributivnih mreža poslednjih godina pojavilo se nekoliko radova u kojima se nude posebne metode alokacije gubitaka [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Najjednostavnija, ali i najmanje tačna, je proporcionalna metoda prema kojoj se alokacija gubitaka vrši proporcionalno aktivnoj snazi potrošača, odnosno tako što se gubici pridružuju čvorovima na bazi udela aktivne snage potrošnje nekog čvora u ukupnoj snazi potrošnje distributivne mreže [6]. Metoda ne uzima u obzir reaktivne snage čvorova niti relativne lokacije čvorova unutar mreže, usled čega su potrošači na većoj udaljenosti od napojnog čvora privilegovani u odnosu na ostale. Jedina prednost ove metode je jednostavnost u realizaciji. Faktor snage i naponske prilike mogu se uvažiti ako se gubici razdele proporci-

onalno strujama koje se injektiraju u distributivnu mrežu [12, 13]. Tako se ostvaruje pravednija alokacija gubitaka, ali za njenu realizaciju potrebno je poznavati, pored aktivnih i reaktivne snage injektiranja kao i naponske prilike u distributivnom sistemu. Relativni položaj potrošača u mreži može se uvažiti ako se prate tokovi struja u mreži, kako je to predloženo u [12]. U [13] je data uporedna analiza rezultata proračuna alokacije gubitaka za neke od metoda koje su bazirane na tokovima struja. Pokazano je da neuvažavanje tokova struja (snaga) može dovesti do neravnopravne raspodele troškova, pogotovu u uslovima izrazito različitih faktora snaga po čvorovima mreže. Razlog tome leži u činjenici da je algebarski zbir struja uvek manji od prostog aritmetičkog zbira struja. Da bi se prevazišao i ovaj problem u [14] je predloženo da se struja razloži na svoje komponente: aktivnu i reaktivnu. Polazeći od činjenice da su naponi čvorova distributivne mreže praktično u fazi, odgovarajuće komponente struja pojedinih potrošača mogu se jednostavno zbrajati. Gubici snage iskazuju se preko kompleksnih komponenti struja potrošača. Na taj način, u jednačinama za proračun gubitaka u pojedinim granama, mogu se lako izdvojiti delovi gubitaka koji nastaju isključivo od struje razmatranog potrošača. Međutim, i dalje ostaje nerešen problem kako raspodeliti gubitke koji su posledica istovremenog dejstva struja različitih potrošača, a to su članovi u kojima se javlja proizvod komponenti struja. Mogući su razni pristupi, ali se obično koriste linearni ili kvadratni. U ovom radu razmatraju se oba pristupa podele.

Metoda predložena u [14], po mišljenju autora ovog rada, u najboljoj meri uvažava gore pomenute zahteve za pravednu alokaciju gubitaka. Zbog toga će njena teorijska osnova biti detaljno izložena u drugom poglavlju. Alokacija gubitaka vrši se po linearnom ili kvadratnom principu vodeći računa o tokovima komponenti struja po granama distributivne mreže. Osim toga, daju se i uprošćene formule za alokaciju gubitaka koje se svode na poznate metode za alokaciju gubitaka, kao što su metode proporcionalne raspodele zajedničkih gubitaka po struji ili snazi (*Proportional sharing allocation*) i proporcionalna metoda (*pro rata method*).

U trećem poglavlju daju se uporedni rezultati proračuna pomoću metoda zasnovanih na tokovima struja na primeru radialne test mreže sa 32 čvora. Četvrto poglavlje sadrži zaključna razmatranja.

## 2. METODOLOGIJA

Ukupni gubici aktivne snage,  $\Delta P$ , u distributivnoj mreži sa  $n$  grana dobijaju se kao suma gubitaka u pojedinim granama  $\Delta P_i$ ,

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (1)$$

Gubici aktivne snage u  $i$ -toj grani mreže su

$$\Delta P_i = R_i \cdot J_i^2 \quad (2)$$

gde je:

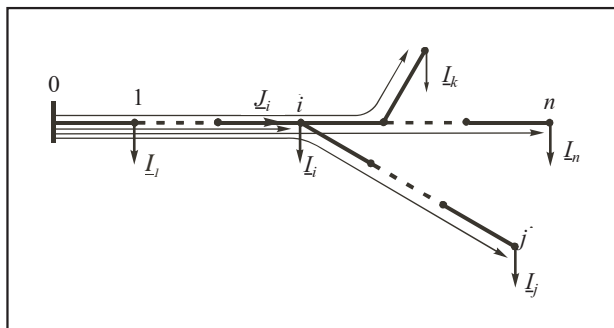
$R_i$  – aktivna otpornost  $i$ -te grane i

$J_i$  – efektivna vrednost struje  $i$ -te grane.

Struja  $i$ -te grane je određena kao zbir struja onih potrošača ( $Z$ ) koji se napajaju preko te grane,  $I_j$ , tj.

$$\underline{J}_i = \sum_{j \in Z} \underline{I}_j \quad (3)$$

što je ilustrovano na slici 1.



Slika 1. Formiranje puteva radialne mreže

Struje su dominantan faktor gubitaka u mreži. Da bi se utvrdio doprinos svakog potrošača ovde se razmatraju dve metode na bazi tokova struja.

### 2.1. Metoda zasnovana na komponentama struja opterećenja

Kada se struje pojedinih potrošača izraze preko svojih komponenti  $I_j = I_{pj} + jI_{qj}$ , lako se utvrđuju doprinosi svakog potrošača realnom i imaginarnom delu struje  $i$ -te grane,

$$\underline{J}_i = \sum_{j \in Z} \underline{I}_j = \sum_{j \in Z} I_{pj} + j \sum_{j \in Z} I_{qj} \quad (4)$$

Ako se (4) uvrsti u (2), za gubitke aktivne snage u  $i$ -toj grani se ima

$$\Delta P_i = R_i \left[ \left( \sum_{j \in Z} I_{pj} \right)^2 + \left( \sum_{j \in Z} I_{qj} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Razvojem (5) dobija se

$$\Delta P_i = R_i \left[ \sum_{j \in Z} I_{pj}^2 + 2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{pj} I_{pk} + \sum_{j \in Z} I_{qj}^2 + 2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{qj} I_{qk} \right] = \sum_{j \in Z} \Delta P_{ij} \quad (6)$$

odakle se može izračunati uticaj  $j$ -tog potrošača na gubitke u  $i$ -toj grani, koji je ovde označen sa  $\Delta P_{ij}$ .

Iz (6) sledi da  $j$ -ti potrošač ima uticaj na gubitke u  $i$ -toj grani preko članova  $I_{pj}$  i  $I_{qj}$ , koji odgovaraju isključivo  $j$ -tom potrošaču i preko članova

$2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{pj} I_{pk}$  i  $2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{qj} I_{qk}$  koji predstavljaju istovremeni uticaj  $j$ -tog i  $k$ -tog potrošača na gubitke u  $i$ -toj grani.

Ukoliko struja  $j$ -tog potrošača ne prolazi kroz  $i$ -tu granu ( $j \notin Z$ ) tada je  $\Delta P_{ij} = 0$ .

Postavlja se pitanje kako raspodeliti gubitke snage u nekoj grani na pojedine potrošače ( $\Delta P_{ij}$ ). Problem nije jednoznačan s obzirom na nelinearnost tipa proizvoda koji se javlja u (6). Moguća su dva lako ostvarljiva principa: linearni i kvadratni. Po prvom principu, gubitke treba raspodeliti proporcionalno komponentama struje potrošača. Tako se dobija

$$\Delta P_{ij} = R_i \left[ I_{pj}^2 + 2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{pj} I_{pk} \frac{I_{pj}}{I_{pj} + I_{pk}} + I_{qj}^2 + 2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{qj} I_{qk} \frac{I_{qj}}{I_{qj} + I_{qk}} \right] \quad (7)$$

Prema kvadratnom principu, gubici u  $i$ -toj grani koji potiču od  $j$ -tog opterećenja  $\Delta P_{ij}$  su

$$\Delta P_{ij} = R_i \left[ I_{pj}^2 + 2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{pj} I_{pk} \frac{I_{pj}^2}{I_{pj}^2 + I_{pk}^2} + I_{qj}^2 + 2 \sum_{\substack{j \in Z \\ k \in Z \\ j \neq k}} I_{qj} I_{qk} \frac{I_{qj}^2}{I_{qj}^2 + I_{qk}^2} \right] \quad (8)$$

I ovde treba napomenuti da u literaturi ne postoji jedinstven matematički dokaziv princip raspodele gubitaka koji je posledica istovremenog delovanja dveju struja. Autori ovoga rada smatraju da je linearna raspodela pravednija.

Polazeći od usvojenog principa raspodele (linearni (7) ili kvadratni (8)), gubici u mreži koji pripa-

daju  $j$ -tom potrošaču/čvoru dobijaju se kao suma pripadajućih gubitaka po granama mreže na putu od razmatranog čvora do izvornog čvora (slika 1)

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ij}, \quad (9)$$

gde  $n$  predstavlja broj grana.

Nadalje, ova metoda alokacije gubitaka biće tretirana kao metoda zasnovana na komponentama struja opterećenja sa dva principa raspodele zajedničkih gubitaka u granama: linearni i kvadratni.

## 2.2. Metoda zasnovana na tokovima struja opterećenja

Ukoliko su svi potrošači u distributivnoj mreži sličnih karakteristika, tada se (4) može napisati kao

$$J_i \approx \sum_{j \in Z} I_j. \quad (10)$$

Polazeći od principa linearne raspodele, gubici u  $i$ -toj grani,  $\Delta P_{ij}$ , koji potiču od  $j$ -tog potrošača su

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_i \frac{I_j}{\sum_{j \in Z} I_j} = R_i J_i^2 \frac{I_j}{\sum_{j \in Z} I_j}. \quad (11)$$

Kada se (10) uvrsti u (11), udeo  $j$ -tog potrošača u ukupnim gubicima u mreži dobija se kao suma udela u gubicima grana na putu od tog čvora do najpogodnijeg čvora,

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ij} = \sum_{i=1}^n R_i J_i^2 \frac{I_j}{\sum_{j \in Z} I_j} \cong \sum_{i=1}^n R_i J_i I_j \quad (12)$$

Ako se gubici u pojedinim granama alociraju na osnovu kvadrata struje opterećenja u čvoru dobija se

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_i \frac{I_j^2}{\sum_{j \in Z} I_j^2} = R_i J_i^2 \frac{I_j^2}{\sum_{j \in Z} I_j^2} \quad (13)$$

i

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ij} \cong \sum_{i=1}^n R_i J_i^2 \frac{I_j^2}{\sum_{j \in Z} I_j^2} \quad (14)$$

Kvadratna raspodela odražava činjenicu da su varijabilni gubici proporcionalni kvadratu opterećenja. Međutim, može se primetiti da je kvadratni zakon već uzet u obzir kod proračuna gubitaka, tako da može doći do smanjenja efikasnosti metode i narušenja načela pravičnosti. Naime, većim potrošačima alociraju se neopravdano veći gubici.

## 2.3. Metoda zasnovana na tokovima aktivnih snaga

Jednačine za alokaciju gubitaka po ovoj metodi dobijaju se kada se u (11) i (14) umesto struja čvorova stave aktivne snage. Odgovarajuće jednačine su:

– linearni princip,

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \frac{P_j}{\sum_{j \in Z} P_j}, \quad (15)$$

– kvadratni princip,

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \frac{P_j^2}{\sum_{j \in Z} P_j^2}, \quad (16)$$

pri čemu  $P_j$  predstavlja aktivnu snagu potrošnje u  $j$ -tom čvoru.

Alokacija gubitaka samo na osnovu aktivnih snaga potrošnje favorizuje potrošače sa lošijim faktorom snage, što nije pravedno. Jedini razlog za ovu alokaciju može biti to što su brojala, po pravilu, opremljena maksigrafom koji pokazuje maksimalnu srednju petnaestominutnu aktivnu snagu u obračunskom periodu. Ovo je dostupan, lako merljiv i upotrebljiv podatak.

## 2.4. Proporcionalna metoda

Proporcionalna metoda je najprostija metoda alokacije gubitaka. Gubici se pridružuju čvorovima na bazi učešća aktivne snage potrošnje svakog čvora u ukupnoj snazi potrošnje

$$\Delta P_j = \Delta P \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (17)$$

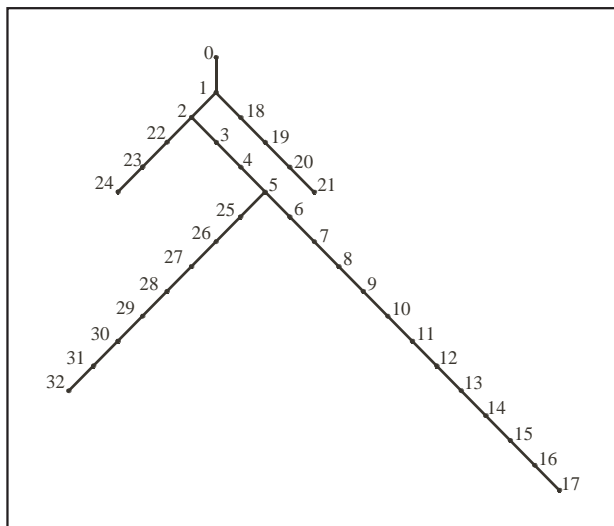
Proporcionalna metoda ne uvažava tokove snaga niti lokaciju čvora. Ova metoda alokacije gubitaka poznata je u literaturi kao *pro rata method*.

## 3. NUMERIČKI PRIMER I ANALIZA REZULTATA

Za analizu izloženih metoda alokacije gubitaka u distributivnim mrežama uzet je primer test mreže sa 32 čvora koja je prikazana na slici 2 [16]. Opterećenja i elementi distributivne mreže su simetrični. Usvojeno je da su svi potrošači tipa konstantne snage.

Proračun napona i tokova snaga vrši se po metodi sumiranja snaga [17,18]. Po okončanju iterativ-

nog postupka dobijaju se tokovi snaga i struja, kao i komponenti struja po granama mreže na osnovu kojih se računaju gubici snage u svakoj grani, kao i ukupni gubici u mreži.



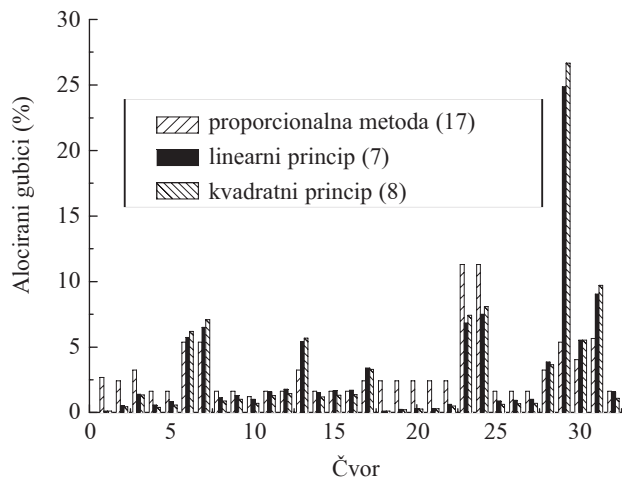
Slika 2. Test mreža

Gubici aktivne snage u mreži zadate konfiguracije zavise od veličine snage pojedinih potrošača, lokacije pojedinih potrošača, tipa potrošnje i napona napojnog čvora. Za napon napojnog čvora od  $U_0 = 12,66$  kV i osnovna opterećenja ukupni gubici aktivne snage u razmatranoj mreži iznose  $\Delta P = 202,677$  kW, ako su svi potrošači tipa konstantne snage.

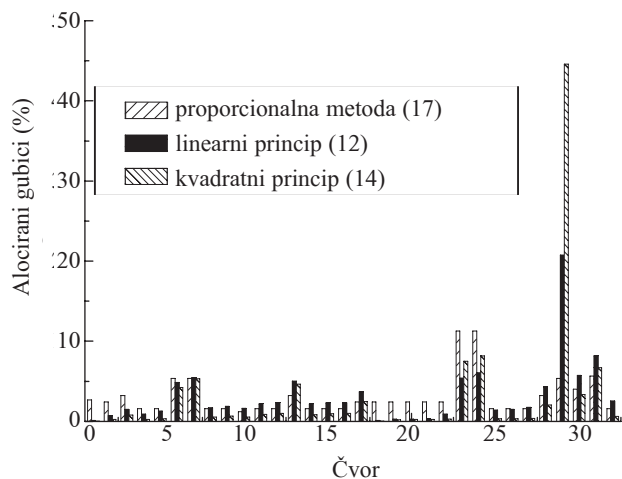
Od navedenih metoda alokacije gubitaka ovde će biti diskutovano pet algoritama po sledećim metodama:

1. Metoda zasnovana na tokovima komponenti struja opterećenja,
  - 1.a) linearni princip (7),
  - 1.b) kvadratni princip (8);
2. Metoda zasnovana na tokovima struja opterećenja,
  - 2.a) linearni princip (12),
  - 2.b) linearni princip (14);
3. Proporcionalna metoda (17).

Rezultati proračuna alokacije gubitaka za navedene algoritme su prikazani u tabeli 1. Procentualno učešće aktivne snage pojedinih potrošača u ukupnoj snazi potrošnje distributivne mreže iskazano je preko rezultata proporcionalne metode. Grafički prikaz rezultata iz table 1 dat je radi preglednosti na dvema slikama. Na slici 3 su prikazani rezultati dobijeni po proporcionalnoj metodi i po metodi zasnovanoj na komponentama struja za linearni i kvadratni princip raspodele gubitaka u granama mreže, a na slici 4 rezultati dobijeni po proporcionalnoj metodi i po metodi zasnovanoj na ukupnim strujama opterećenja čvora.



Slika 3. Alocirani gubici po proporcionalnoj metodi i metodi zasnovanoj na strujama opterećenja



Slika 4. Alocirani gubici po proporcionalnoj metodi i metodi zasnovanoj na komponentama struja opterećenja

Kako je već rečeno, u literaturi ne postoji jedinstven matematički dokaziv princip raspodele gubitaka koji je posledica istovremenog delovanja dveju struja, pa je zbog toga nemoguće dati preciznu ocenu tačnosti pojedinih algoritama. Generalno, može se zaključiti da linearni princip raspodele zajedničkih gubitaka pogoduje potrošačima veće snage. Koj je to snaga zavisi od konkretne mreže, distribucije opterećenja po čvorovima i metode alokacije. Ukoliko se alokacija vrši na bazi komponenti struja, tada je linearni princip pogodniji za potrošače u čvorovima 6, 7, 13, 23, 24, 29 i 31 mreže sa slike 2. Ako se alokacija gubitaka vrši na bazi ukupnih struja potrošača, linearni princip je povoljniji samo za potrošače u čvorovima 23, 24 i 29.

Odstupanje rezultata alociranih gubitaka po linearnom i kvadratnom principu je mnogo manje ka-



da se računa sa tokovima komponenti struja (slika 3), nego sa ukupnim strujama potrošnje (slika 4). Razlog tome je što se preko komponenti mogu tačnije razdeliti gubici u granama na pojedine potrošače. Tačnost metode alokacije na bazi ukupnih struja zavisi od toga u kojoj meri je zadovoljena relacija (9).

Proporcionalna metoda alokacije gubitaka koristi princip po kome se alokacija gubitaka vrši proporcionalno učešću aktivnih snaga pojedinih čvorova u ukupnoj snazi potrošnje. Ova metoda ne uvažava lokaciju potrošača i faktor snage potrošnje, što nije u skladu sa osnovnim principima fer alokacije.

Jasno je da potrošač na većoj udaljenosti stvara veće gubitke snage za isto opterećenje. Ostale metode alokacije uvažavaju lokaciju i faktor snage potrošnje, tako što se sumiranju pripadajući delovi gubitaka u svim granama mreže preko kojih se napaja dotični potrošač. To se najbolje vidi poređenjem rezultata proračuna alokacije gubitaka koji se odnose na čvorove 5, 8, 9, 15 i 16 ili čvorove 17, 18, 19, 20 i 21, u kojima su potrošači iste snage. Tako, na primer, potrošači u čvorovima 17 i 18 imaju jednake snage, ali zbog nejednake udaljenosti od napojnog čvora potrošaču u čvoru 17 su alocirani znatno veći

Tabela 1.

Alokacija gubitaka u distributivnoj mreži

| Čvor | $P$   | $Q$   | Proporcionalna metoda |         | Metoda struja opterećenja |         |                       |         | Metoda komponenti struja |         |                        |         |
|------|-------|-------|-----------------------|---------|---------------------------|---------|-----------------------|---------|--------------------------|---------|------------------------|---------|
|      |       |       |                       |         | linearni princip (6)      |         | kvadratni princip (7) |         | linearni princip (11)    |         | kvadratni princip (13) |         |
|      |       |       |                       |         | (kW)                      | (%)     | (kW)                  | (%)     | (kW)                     | (%)     | (kW)                   | (%)     |
| 1    | 100   | 60    | 5,456                 | 2,692   | 0,298                     | 0,147   | 0,123                 | 0,061   | 0,244                    | 0,120   | 0,216                  | 0,107   |
| 2    | 90    | 40    | 4,910                 | 2,423   | 1,465                     | 0,723   | 0,488                 | 0,241   | 1,066                    | 0,526   | 0,875                  | 0,432   |
| 3    | 120   | 80    | 6,547                 | 3,230   | 3,104                     | 1,531   | 1,588                 | 0,783   | 2,854                    | 1,408   | 2,709                  | 1,337   |
| 4    | 60    | 30    | 3,273                 | 1,615   | 1,890                     | 0,932   | 0,460                 | 0,227   | 1,177                    | 0,581   | 0,832                  | 0,411   |
| 5    | 60    | 20    | 3,273                 | 1,615   | 2,692                     | 1,328   | 0,637                 | 0,314   | 1,661                    | 0,819   | 1,179                  | 0,582   |
| 6    | 200   | 100   | 10,911                | 5,384   | 9,905                     | 4,887   | 8,593                 | 4,240   | 11,604                   | 5,725   | 12,527                 | 6,181   |
| 7    | 200   | 100   | 10,911                | 5,384   | 11,049                    | 5,451   | 10,772                | 5,315   | 13,176                   | 6,501   | 14,343                 | 7,077   |
| 8    | 60    | 20    | 3,273                 | 1,615   | 3,494                     | 1,724   | 1,131                 | 0,558   | 2,332                    | 1,151   | 1,764                  | 0,870   |
| 9    | 60    | 20    | 3,273                 | 1,615   | 3,840                     | 1,895   | 1,383                 | 0,682   | 2,643                    | 1,304   | 2,046                  | 1,010   |
| 10   | 45    | 30    | 2,455                 | 1,211   | 3,334                     | 1,645   | 1,042                 | 0,514   | 2,077                    | 1,025   | 1,436                  | 0,709   |
| 11   | 60    | 35    | 3,273                 | 1,615   | 4,396                     | 2,169   | 1,804                 | 0,890   | 3,229                    | 1,593   | 2,601                  | 1,283   |
| 12   | 60    | 35    | 3,273                 | 1,615   | 4,794                     | 2,366   | 2,100                 | 1,036   | 3,589                    | 1,771   | 2,925                  | 1,443   |
| 13   | 120   | 80    | 6,547                 | 3,230   | 10,223                    | 5,044   | 9,454                 | 4,665   | 10,955                   | 5,405   | 11,492                 | 5,670   |
| 14   | 60    | 10    | 3,273                 | 1,615   | 4,394                     | 2,168   | 1,748                 | 0,863   | 3,035                    | 1,497   | 2,424                  | 1,196   |
| 15   | 60    | 20    | 3,273                 | 1,615   | 4,655                     | 2,297   | 1,959                 | 0,967   | 3,361                    | 1,658   | 2,685                  | 1,325   |
| 16   | 60    | 20    | 3,273                 | 1,615   | 4,763                     | 2,350   | 2,041                 | 1,007   | 3,458                    | 1,706   | 2,772                  | 1,368   |
| 17   | 90    | 40    | 4,910                 | 2,423   | 7,475                     | 3,688   | 5,010                 | 2,472   | 6,914                    | 3,411   | 6,698                  | 3,305   |
| 18   | 90    | 40    | 4,910                 | 2,423   | 0,292                     | 0,144   | 0,128                 | 0,063   | 0,229                    | 0,113   | 0,198                  | 0,098   |
| 19   | 90    | 40    | 4,910                 | 2,423   | 0,570                     | 0,281   | 0,406                 | 0,200   | 0,507                    | 0,250   | 0,476                  | 0,235   |
| 20   | 90    | 40    | 4,910                 | 2,423   | 0,621                     | 0,306   | 0,457                 | 0,225   | 0,558                    | 0,275   | 0,527                  | 0,260   |
| 21   | 90    | 40    | 4,910                 | 2,423   | 0,665                     | 0,328   | 0,501                 | 0,247   | 0,602                    | 0,297   | 0,571                  | 0,282   |
| 22   | 90    | 50    | 4,910                 | 2,423   | 1,852                     | 0,914   | 0,612                 | 0,302   | 1,281                    | 0,632   | 1,011                  | 0,499   |
| 23   | 420   | 200   | 22,914                | 11,306  | 10,993                    | 5,424   | 15,226                | 7,512   | 13,842                   | 6,830   | 15,022                 | 7,412   |
| 24   | 420   | 200   | 22,914                | 11,306  | 12,318                    | 6,078   | 16,618                | 8,199   | 15,193                   | 7,496   | 16,386                 | 8,085   |
| 25   | 60    | 25    | 3,273                 | 1,615   | 2,887                     | 1,425   | 0,696                 | 0,343   | 1,809                    | 0,892   | 1,289                  | 0,636   |
| 26   | 60    | 25    | 3,273                 | 1,615   | 3,049                     | 1,505   | 0,725                 | 0,358   | 1,892                    | 0,934   | 1,342                  | 0,662   |
| 27   | 60    | 20    | 3,273                 | 1,615   | 3,544                     | 1,748   | 0,790                 | 0,390   | 2,081                    | 1,027   | 1,439                  | 0,710   |
| 28   | 120   | 70    | 6,547                 | 3,230   | 8,725                     | 4,305   | 4,175                 | 2,060   | 7,828                    | 3,862   | 7,392                  | 3,647   |
| 29   | 200   | 600   | 10,911                | 5,384   | 42,103                    | 20,773  | 90,394                | 44,600  | 50,447                   | 24,890  | 54,088                 | 26,687  |
| 30   | 150   | 70    | 8,183                 | 4,038   | 11,630                    | 5,738   | 6,751                 | 3,331   | 11,193                   | 5,522   | 11,167                 | 5,510   |
| 31   | 210   | 100   | 11,457                | 5,653   | 16,521                    | 8,151   | 13,551                | 6,686   | 18,347                   | 9,052   | 19,691                 | 9,715   |
| 32   | 60    | 40    | 3,273                 | 1,615   | 5,137                     | 2,534   | 1,317                 | 0,650   | 3,160                    | 1,559   | 2,219                  | 1,095   |
|      | 3 715 | 2 300 | 202,677               | 100,000 | 202,342                   | 100,000 | 202,342               | 100,000 | 202,677                  | 100,000 | 202,677                | 100,000 |

gubici, koji, zavisno od metode alokacije, iznose: 3,688 %, 2,472 %, 3,411 % i 3,305 %. Za istu snagu i odgovarajuće metode alokacije, čvoru 18 su alocirani gubici u iznosu: 0,144 %, 0,063 %, 0,113 % i 0,098 %.

Metode alokacije gubitaka zasnovane na tokovima struja vode računa i o faktoru snage, odnosno o tokovima reaktivnih snaga. Ovo je značajno s obzirom na činjenicu da reaktivne snage u velikoj mjeri utiču na iznos gubitaka aktivne snage. Tako, potrošač u čvoru 31 ima veću aktivnu snagu i nalazi se na većoj udaljenosti, a ipak učestvuje manje u gubicima od potrošača u čvoru 29, koji ima izrazito loš faktor snage. Shodno tome, čvoru 31 se alociraju manji gubici.

S obzirom na činjenicu da nivo potrošnje po čvorovima varira u toku dana varirajuće i alocirani gubici aktivne snage. Zbog toga je potrebno da se procedura alokacije gubitaka snage ponovi za svaki sat ili ugovoreni vremenski interval. Na taj način mogu se dobiti alocirani gubici energije po čvorovima. Izvršavanjem kompletne procedure alokacije gubitaka za duži period, na primer sezona ili godina, mogu se utvrditi faktori gubitaka za distributivnu mrežu i za delove mreže koji se napajaju iz nekog čvora.

#### 4. ZAKLJUČAK

*U radu je dat prikaz i uporedna analiza metoda i algoritama za alokaciju gubitaka u radialnim distributivnim mrežama. Proporcionalna metoda ne uvažava lokaciju i faktor snage potrošnje, pa se kao takva ne preporučuje za alokaciju gubitaka u distributivnim mrežama. Metode zasnovane na tokovima struja uvažavaju lokaciju potrošnje i nivo i strukturu potrošnje u čvoru, što je osnovni zahtev za fer alokaciju gubitaka. Razlaganje struja opterećenja na komponente omogućava da se gubici u granama tačno razdele na pojedine potrošače u skladu sa usvojenim principom. Odstupanje rezultata alociranih gubitaka po linearnom i kvadratnom principu je mnogo manje kada se računa sa tokovima komponenti struja, nego sa ukupnim strujama potrošnje. Kvadratni princip raspodele zajedničkih gubitaka u granama u manjoj mjeri pogoduje potrošačima veće snage.*

*Rezultati proračuna mogu da se koriste kao osnova za izbor kriterijuma za obračun snage i energije, kao i za formiranje jednog pravednijeg tarifnog sistema.*

#### 5. LITERATURA

[1] J. Bialek, TRACING THE FLOW OF ELECTRICITY, Proc. IEE Gen. Transm. Dist., vol. 143, July 1996, pp. 313-320.

[2] G. Strbac, D. Kirschen, S. Ahmed, ALLOCATING TRANSMISSION SYSTEM USAGE ON THE BASIS OF TRACEABLE CONTRIBUTIONS OF GENERATORS AND LOADS TO FLOWS, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 13, May 1998, pp. 527 - 534.

[3] D. Kirschen, G. Strbac, TRACING ACTIVE AND REACTIVE POWER BETWEEN GENERATORS AND LOADS USING REAL AND IMAGINARY CURRENTS, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, Nov. 1999, pp. 1312-1319.

[4] A. Gomez, J. M. Riquelme, T. Gonzalez, and E. Ruiz, FAIR ALLOCATION OF TRANSMISSION POWER LOSSES, IEEE Trans. on Power System, vol. 15, Feb. 2000, pp. 184-188.

[5] J. Conejo, F. D. Galiana, and I. Kockar, Z-BUS LOSS ALLOCATION, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 16, Feb. 2001, pp. 105-110.

[6] J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A. L. Gujjarro, TRANSMISSION LOSS ALLOCATION: A COMPARISON OF DIFFERENT PRACTICAL ALGORITHMS, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, No. 3, August 2002, pp. 571-576.

[7] F. D. Galiana, A. J. Conejo, and I. Kockar, INCREMENTAL TRANSMISSION LOSS ALLOCATION UNDER POOL DISPATCH, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, Feb. 2002, pp. 26-33.

[8] D. Stojanovic, V. Kostic, L. Korunovic, M. Docic, LOSS ALLOCATION IN TRANSMISSION NETWORKS, 2nd Balkan Power Conference, Belgrade, Yugoslavia, jun 19-23, 2002.

[9] D. Stojanović, V. Kostić, L. Korunović, M. Dočić, RASPODELA GUBITAKA AKTIVNE SNAGE U PRENOSNOJ MREŽI, XLVI Konferencija ETRAN-a, Banja Vrućica - Teslić, jun 2002., Zbornik radova, str. 271-274.

[10] C. N. Macqueen, M. R. Irving, AN ALGORITHM FOR THE ALLOCATION OF DISTRIBUTION SYSTEM DEMAND AND ENERGY LOSSES, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, February 1996, pp. 338-343.

[11] J. Mutale, G. Strbac, S. Curcic and N. Jenkins, ALLOCATION OF LOSSES IN DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMBEDDED GENERATION, Proc. IEE Gen. Transm. Dist., vol. 147, Jan. 2000, pp. 1-8.

[12] D. Stojanović, V. Kostić, L. Korunović, UČEŠĆE POTROŠAČA U GUBICIMA SNAGE I ENERGIJE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI, Zbornik radova XL Konf. ETRAN-a, Arandelovac 2001, str. 52-58.

[13] D. Stojanović, V. Kostić, L. Korunović, M. Dočić, RASPODELA TROŠKOVA GUBITAKA AKTIVNE SNAGE NA POTROŠAČE DISTRIBUTIVNE MREŽE, Treće jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama - JUKO CIRED, Vr-

njačka Banja, 15-18. oktobar 2002, Sveska 3, str. 49-54.

- [14] P. Costa, M. Matos, LOSS ALLOCATION IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH EMBEDDED GENERATION, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.19, No. 1, February 2004, pp. 384-389
- [15] R. Čirić, ALOKACIJA GUBITAKA U DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA SA MALIM GENERATORIMA, Elektrodistribucija br. 1, 2003, str. 24-30.
- [16] M. E. Baran, F. F. Wu, NETWORK RECONFIGURATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS FOR

LOSS REDUCTION AND LOAD BALANCING, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4. No 2, April 1989, pp. 1401-1407.

- [17] D. Stojanović, P. Grković, D. Savović, PDM - PROGRAMSKI PAKET ZA PRORAČUN SREDNJE-NAPONSKIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA, Elektroprivreda br. 3, 1997. str. 65-72.
- [18] G. Cespedes, NEW METHOD FOR THE ANALYSIS OF DISTRIBUTION NETWORKS, IEEE Trans. on PWRD, vol. 5, No. 1, January 1990, pp. 391-396.

Rad je primljen u uredništvo 9. 02. 2007. godine



**Dobrivoje P. Stojanović** (1946) je diplomirao 1971. na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini, magistrirao 1978. na Elektrotehničkom fakultetu u Skoplju i doktorirao 1985. na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini. Zaposlen je na Elektronskom fakultetu u Nišu, gde predaje Prenos i distribuciju električne energije i Elektroenergetska postrojenja. Kao autor ili koautor objavio je dve zbirke zadataka i preko 100 radova koji su prezentirani u časopisima i na domaćim i inostranim konferencijama. Učestvovao je u realizaciji 10 naučno istraživačkih projekata. Realizovao je preko 50 stručnih radova u oblasti eksperimentalne i analitičke verifikacije uslova bezbednosti u elektroenergetskim postrojenjima.

Oblasti interesovanja su mu analiza prenosnih i distributivnih mreža i elektroenergetska postrojenja.



**Ivana Lj. Mladenović** je rođena 1980. godine u Nišu. Diplomirala je 2005. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu na smeru za Industrijsku energetiku. Trenutno je student postdiplomskih studija na Elektronskom fakultetu na smeru za Elektroenergetske mreže i postrojenja. Oblasti interesovanja su joj analiza i eksploatacija distributivnih mreža.



**Lidija M. Korunović** je rođena 1971. godine u Pirotu. Diplomirala je 1996. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu, na smeru za Industrijsku energetiku. Magistrirala je 2002. godine na istom fakultetu gde radi kao asistent iz predmeta Prenos i distribucija električne energije i Eksploatacija elektroenergetskih mreža. Do sada je bila angažovana na nekoliko naučnih projekata. Autor je 38 naučnih i stručnih radova i jedne zbirke zadataka. Oblasti interesovanja su joj analiza i eksploatacija distributivnih mreža.

# Kompenzacija neaktivne snage potrošača pri složenoperiodičnim i nesimetričnim naponima i strujama

Stručni rad  
UDK: 621.3.02.5

---

**Rezime:**

U radu je data originalna definicija i postupak kompenzacije neaktivne snage potrošača pri složenoperiodičnim i nesimetričnim naponima i strujama. Postupak se zasniva na dekompoziciji snaga iz uslova minimizacije efektivnih vrednosti struja u napojnom vodu potrošača. Dva kriterijuma dekompozicija snaga su razmatrana u radu: prvi se zasniva na konceptu srednje snage a drugi se zasniva na konceptu trenutne snage. U radu je data formulacija aktivnih struja koja važi bez obzira da li su naponi simetrični ili nesimetrični i koja dozvoljava da bilo koja tačka u sistemu bude usvojena kao referentna tačka za napon. Prikazani postupak minimizacije je generalizovan i važi za monofazne sisteme, simetrične i nesimetrične trofazne i polifazne sisteme. Testovi sa eksperimentalnim podacima potvrđuju upotrebnu vrednost prikazane minimizacione procedure za različite oblike struja potrošača.

**Ključne reči:** minimizacija struja, neaktivna snaga, faktor snage

---

**Abstract:**

**NON-ACTIVE POWER COMPENSATION UNDER COMPLEX-PERIODIC  
AND ASYMETRICAL VOLTAGES AND CURRENTS**

Original definition and method of non-active power definition and compensation under complex-periodic and asymmetrical voltages and currents are presented. The method is based on power decomposition and stems from the condition for the minimum rms values of the current in the line supplying load. Two power decomposition criteria have been considered in the paper: one based on the average power concept and the other on the instantaneous power concept. The paper offers formulation of active currents which is valid regardless of whether the voltages and currents are balanced or unbalanced and it permits any point of the system to be chosen for the voltage reference. The minimization procedure is generalized and it is valid for the single phase, symmetrical and asymmetrical three-phase, and poly-phase systems. Tests with experimental data confirm the applicability of the minimization procedure for a variety of load currents.

**Key words:** current minimization, non-active power, power factor

---

## 1. UVOD

Reaktivna snaga u elektroenergetskim sistemima sa prostoperiodičnim naponima i strujama se definiše

kao mera oscilatorne razmene energije između potrošača i izvora. Priključenjem potrošača nelinearnih karakteristika u elektroenergetskom sistemu se javlja prisustvo harmonijskih komponenti napona i struja.

---

Mr Jovan Č. Mikulović, dipl. ing. el., dr Tomislav B. Šekara, dipl. ing. el.  
– Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Postoji veliki broj definicija snaga pri složenoperiodičnim naponima i strujama [1]–[12]. Problem definisanja snaga postaje znatno složeniji jer se oscilatorna razmena energije između potrošača i izvora ne može jasno odvojiti od gubitaka energije koji su prouzrokovani harmonijskim izobličenjima i zbog toga se umesto reaktivne snage često koristi pojam neaktivna snaga [3], [9], [12]. Teorije koje se bave definicijama snaga se zasnivaju na pretpostavci da se trenutna snaga može razložiti na dve komponente, aktivnu i neaktivnu. Dva različita načina dekompozicija snaga su razvijena: prvi se zasniva na konceptu srednje vrednosti snage i drugi se zasniva na konceptu trenutne vrednosti snage. Prvi koncept je uveden od strane Frizea [1] a drugi je koncept je definisan u „*p-q* teoriji” od strane Akagia [2]. Oba koncepta definišu aktivne i neaktivne struje i napone: u prvom konceptu se ne menja prenos srednje snage, a u drugom konceptu se ne menja prenos trenutne snage. Frizeova definicija neaktivne snage za monofazne sisteme je proširena na polifazne sisteme i ova teorija je u literaturi poznata kao FDB metod [3]. Kusters i Mure su razložili dalje Frizeovu neaktivnu snagu na komponentu koja može da se kompenzuje reaktivnim elementima i na preostalu nekompenzovanu komponentu [4].

Nesimetrije u sistemu takođe doprinose prenosu neaktivne snage u trofaznim sistemima. Ovaj fenomen se mora uzeti u obzir pri definisanju i poboljšanju faktora snage potrošača. Nesimetrično opterećenje zbog svog slučajnog karaktera prouzrokuje nesimetrične padove napona. Koncept dekompozicija snaga je proširen u [5] sa ciljem da se pokaže da nesimetrija napona doprinosi prenosu neaktivne snage. U [11] je data tačna formulacija aktivnih struja pri nesimetričnim naponima, ali se ista može koristiti samo ako se kao referenta tačka za napone koristi veštačka neutralna tačka tako da suma napona bude jednaka nuli.

U ovom radu je prikazan optimizacioni postupak koji daje formulacija aktivnih struja bez obzira da li su naponi i struje simetrični ili nesimetrični, prostoperiodični ili složenoperiodični, pri čemu bilo koja tačka u sistemu može biti usvojena kao referentna tačka za napon. Prikazani postupak minimizacije je generalizovan i važi u opštem slučaju za polifazne sisteme koji mogu biti simetrični ili nesimetrični u koje spadaju monofazni i trofazni sistemi u najširem smislu.

## 2. TROFAZNI ČETVOROŽIČNI SISTEMI

Za trofazni četvorožični sistem na slici 1, trenutne vrednosti faznih napona  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ , trenutna vrednost napona neutralnog provodnika  $v_n$ , struje faznih provodnika  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  i struja neutralnog provod-

nika  $i_n$ , mogu se predstaviti preko četvorodimenzionalnih vektora  $\mathbf{v}$  i  $\mathbf{i}$ :

$$\mathbf{v} = [v_a \quad v_b \quad v_c \quad v_n]^T \quad (1)$$

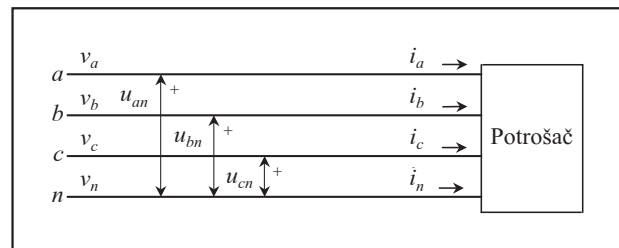
$$\mathbf{i} = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_n]^T \quad (2)$$

Referentna tačka za napon može biti bilo koja tačka u sistemu. Naponi i struje su složenoperiodične veličine označene sa:

$$v_j = \sum_{k=1}^{n_j} \sqrt{2} V_{jk} \cos(k\omega t + \theta_{jk}) \quad j = a, b, c, n \quad (3)$$

$$i_j = \sum_{k=1}^{m_j} \sqrt{2} I_{jk} \cos(k\omega t + \psi_{jk}) \quad j = a, b, c \quad (4)$$

Veličine  $V_{jk}$  i  $I_{jk}$  su efektivne vrednosti  $k$ -tih harmonika napona i struje i njihovi odgovarajući fazni uglovi  $\theta_{jk}$  i  $\psi_{jk}$ ,  $n_j$  je red najvišeg harmonika napona,  $m_j$  je red najvišeg harmonika struje i  $\omega$  je ugaona učestanost (jednaka  $2\pi f$ ,  $f$  je osnovna učestanost).



Slika 1. Trofazni četvorožični sistem

Struja neutralnog provodnika je:

$$i_n = -i_a - i_b - i_c \quad (5)$$

Trenutna snaga potrošača u trofaznom četvorožičnom sistemu se može dobiti kao skalarni proizvod vektora napona i vektora struja i predstavlja zbir trenutnih snaga pojedinih faza:

$$p = \mathbf{v}^T \mathbf{i} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + v_n i_n = u_{an} i_a + u_{bn} i_b + u_{cn} i_c = \mathbf{u}^T \mathbf{i} = p_a + p_b + p_c \quad (6)$$

gde je  $\mathbf{u}$  četvorodimenzionalni vektor koji sadrži napone između faznih provodnika i neutralnog provodnika (Slika 1):

$$\mathbf{u} = [u_{an} \quad u_{bn} \quad u_{cn} \quad 0]^T = [v_a - v_n \quad v_b - v_n \quad v_c - v_n \quad 0]^T \quad (7)$$

Aktivna snaga  $P$  se definiše kao srednja vrednost trenutne snage  $p$  u jednoj periodu  $T = 2\pi / \omega$ :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (8)$$

U opštem slučaju trenutna snaga svake faze se može razložiti na aktivnu komponentu i na neaktivnu komponentu tako da aktivne komponente trenutne snage daju srednju snagu  $P$ , a da neaktivne komponente daju srednju snagu koja je jednaka nuli u svakoj fazi [3], [9], [12]:

$$p_j = p_{jp} + p_{jq} \quad j = a, b, c \quad (9)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T (p_{ap} + p_{bp} + p_{cp}) dt = P \quad (10)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T p_{jq} dt = 0 \quad j = a, b, c \quad (11)$$

Neaktivne komponente snaga predstavljaju nekorisnu snagu tako da se problem može posmatrati sa stanovišta eliminisanja odnosno kompenzacije neaktivnih komponenti snaga. Osnovno pitanje dekompozicija i definicija snaga jeste kako izabrati komponente  $p_{jp}$  i  $p_{jq}$  od beskonačno mnogo komponenti koje zadovoljavaju jednačine (9), (10) i (11).

Drugi mogući način dekompozicije se dobija kada aktivne komponente daju istu trenutnu snagu  $p$ , a oscilatorne neaktivne komponente daju trenutnu snagu jednaku nuli [2], [6]–[8], [10], [11], tj. takav slučaj se dobija kada posmatrani interval usrednjavanja nije jednak periodu  $T$  već teži nuli [9]. To znači da se mogu posmatrati dva različita pristupa koja se odnose na prenos snage: nepromenjen prenos srednje snage ili nepromenjen prenos trenutne snage.

Gubici energije pri prenosu snage su srazmerni kvadratima efektivnih vrednosti struja u napojnom vodu potrošača. Zbog toga se problem prenosa neaktivne snage može rešiti minimizacijom efektivnih vrednosti struja u napojnom vodu potrošača.

Na osnovu prvog pristupa, kada se prenos aktivne snage ne može menjati i uvažavajući prvi Kirhfov zakon, sledeći kriterijum se može definisati za trofazni četvorožični sistem:

$$J_1 = \int_0^T f(i(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 + i_n^2) dt \rightarrow \min \quad (12)$$

uz ograničenja

$$\int_0^T g(i(t), u(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{j=a,b,c} u_j(t) i_j(t) \right) dt = P \quad (13)$$

$$h(i(t), u(t)) = i_a + i_b + i_c + i_n = 0 \quad (14)$$

Iz uslova da funkcional  $J_1$  ima minimalnu vrednost, korišćenjem Lagranžove metode, dobijaju se linijske struje koje imaju minimalne efektivne vrednosti (t.j. minimalne struje):

$$\mathbf{i}_{\min 1} = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{A}_4 \mathbf{v} dt} \mathbf{A}_4 \mathbf{v} \quad (15)$$

gde je sa  $\mathbf{A}_4$  označena sledeća matrica:

$$\mathbf{A}_4 = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Korišćenjem osobine  $\mathbf{v}^T \mathbf{A}_M^2 \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \mathbf{A}_M \mathbf{v}$  ( $M=4$  u ovom slučaju) dobija se minimalna vrednost funkcionala  $J_1$ :

$$J_{1\min} = \frac{P^2}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{A}_4 \mathbf{v} dt} = I_{amin1}^2 + I_{bmin1}^2 + I_{cmin1}^2 + I_{nmin1}^2 \quad (17)$$

gde su  $I_{amin1}$ ,  $I_{bmin1}$ ,  $I_{cmin1}$  i  $I_{nmin1}$  efektivne vrednosti struja koje su definisane jednačinom (15).

Izraz (15) daje minimalne struje koje uspostavljaju do potrošača istu srednju snagu kao i struje pre kompenzacije, bez eliminisanja struje neutralnog provodnika („time-average compensation” [11]). Za razliku od definicije date u [11], izraz (15) dozvoljava da bilo koja tačka u sistemu bude usvojena kao referentna tačka za napon.

Kompensator projektovan na osnovu ove minimizacione procedure optimalno redukuje linijske struje (uključujući i struju neutralnog provodnika). Faktor snage koji uključuje gubitke u neutralnom provodniku napojnog voda potrošača (faktor snage nekompensovanog potrošača) se može definisati na sledeći način:

$$\lambda_1 = \frac{\sqrt{J_{1\min}}}{\sqrt{J_1}} = \frac{\sqrt{I_{amin1}^2 + I_{bmin1}^2 + I_{cmin1}^2 + I_{nmin1}^2}}{\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}} \quad (18)$$

gde su  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  i  $I_n$  efektivne vrednosti struja  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  i  $i_n$  (2). Faktor snage koji se dobija nakon kompenzacije (označen sa  $\eta_1$ ) na osnovu usvojenog minimizacionog kriterijuma će biti jednak jedinici, tj.  $\eta_1=1$ .

U slučaju kada su naponi izvora simetrični, tj. kada naponi između faznih provodnika i neutralnog provodnika zadovoljavaju uslov:

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1] \mathbf{u} = u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (19)$$

izraz (15) postaje:

$$\mathbf{i}_{\min 1} = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{u} dt} \mathbf{u} \quad (20)$$

Izraz (20) sadrži Frizeove aktivne struje za trofazni sistem [3] i struju neutralnog provodnika jednaku nuli kao posledicu simetrije napona. Struje date u (20) su u fazi sa naponima izvora i imaju iste talasne oblike kao i naponi izvori.

Na osnovu drugog pristupa, kada se prenos trenutne snage ne može menjati, prethodni funkcional (12) ima sledeće ograničenje umesto ograničenja (13):

$$g(i(t), u(t)) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + v_n i_n = P \quad (21)$$

Iz uslova da funkcional  $J_1$  (12) ima minimalnu vrednost pod ograničenjima (14) i (21), dobijaju se sledeće linijske struje koje imaju minimalne efektivne vrednosti:

$$\mathbf{i}_{\min 1'} = \frac{P}{\mathbf{v}^T \mathbf{A}_4 \mathbf{v}} \mathbf{A}_4 \mathbf{v} \quad (22)$$

gde je  $\mathbf{A}_4$  matrica definisana sa (16). Minimalna vrednost funkcionala  $J_1$  je sada:

$$J_{1\min}' = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2}{\mathbf{v}^T \mathbf{A}_4 \mathbf{v}} dt = I_{a\min 1'}^2 + I_{b\min 1'}^2 + I_{c\min 1'}^2 + I_{n\min 1'}^2 \quad (23)$$

gde su  $I_{a\min 1}'$ ,  $I_{b\min 1}'$ ,  $I_{c\min 1}'$  i  $I_{n\min 1}'$  efektivne vrednosti struja koje su definisane jednačinom (22).

Izraz (22) daje minimalne struje koje obezbeđuju istu trenutnu snagu potrošača kao i struje pre kompenzacije, bez eliminisanja struje neutralnog provodnika („time-instantaneous compensation” [11]). Za razliku od definicije date u [11], izraz (22) dozvoljava da bilo koja tačka u sistemu bude usvojena kao referentna tačka za napon.

Kompenzator projektovan na osnovu ove minimizacione procedure ne zahteva akumulaciju energije zato što prenos trenutne snage nakon kompenzacije ostaje nepromenjen. Takav kompenzator, u stvari, menja raspodelu trenutne snage između faznih provodnika zadržavajući prenos ukupne trenutne snage nepromenjen.

Ako se uporede prethodne dve minimalne vrednosti funkcionala  $J_1$  definisane sa (17) i (23), na osnovu nejednakosti Koši-Švarc-Buniakovski dobija se  $J_{1\min} \leq J_{1\min}'$ . Minimalne struje (22) koje obezbeđuju istu trenutnu snagu potrošača daju veće gubitke u vodu od minimalnih struja (15) koje obezbeđuju istu srednju snagu.

Efikasnost kompenzacije kada je prenos trenutne snage nepromenjen se može odrediti na osnovu odnosa dve minimalne vrednosti funkcionala  $J_1$ , (17) i (23):

$$\eta_1 = \frac{\sqrt{J_{1\min}}}{\sqrt{J_{1\min}'}} = \frac{\sqrt{I_{a\min 1}^2 + I_{b\min 1}^2 + I_{c\min 1}^2 + I_{n\min 1}^2}}{\sqrt{I_{a\min 1'}^2 + I_{b\min 1'}^2 + I_{c\min 1'}^2 + I_{n\min 1'}^2}} \quad (24)$$

Izraz (24) predstavlja faktor snage koji se dobija nakon kompenzacije pod uslovom da prenos trenutne snage ostane nepromenjen.

U slučaju kada su naponi izvora simetrični, tj. kada naponi između faznih provodnika i neutralnog provodnika zadovoljavaju uslov (19), izraz (22) daje aktivne struje koje su definisane u „p-q” teoriji [2], [6]–[8], [10]:

$$\mathbf{i}_{\min 1'} = \frac{P}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}} \mathbf{u} \quad (25)$$

### 3. TROFAZNI TROŽIČNI SISTEMI

Na osnovu prvog pristupa, kada se prenos srednje snage ne može menjati, sledeći kriterijum se može definisati za trofazni trožični sistem:

$$J_2 = \int_0^T f(i(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) dt \rightarrow \min \quad (26)$$

uz ograničenja

$$\int_0^T g(i(t), u(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt = P \quad (27)$$

$$h(i(t), u(t)) = i_a + i_b + i_c = 0 \quad (28)$$

Iz uslova da funkcional  $J_2$  ima minimalnu vrednost dobijaju se linijske struje koje imaju minimalne efektivne vrednosti:

$$\mathbf{i}_{\min 2} = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{A}_3 \mathbf{v} dt} \mathbf{A}_3 \mathbf{v} \quad (29)$$

gde je sa  $\mathbf{A}_3$  označena sledeća matrica

$$\mathbf{A}_3 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

i gde je  $\mathbf{v}$  sada trodimenzionalni vektor napona:

$$\mathbf{v} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T \quad (31)$$

Referentna tačka za napon može biti bilo koja tačka u sistemu. Minimalna vrednost funkcionala  $J_2$  je:

$$J_{2\min} = \frac{P^2}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{A}_3 \mathbf{v} dt} = I_{a\min 2}^2 + I_{b\min 2}^2 + I_{c\min 2}^2 \quad (32)$$

gde su  $I_{a\min 2}$ ,  $I_{b\min 2}$  i  $I_{c\min 2}$  efektivne vrednosti struja koje su definisane jednačinom (29).

Izraz (29) daje minimalne struje koje obezbeđuju istu srednju snagu potrošača kao i struje pre kompenzacije, pri čemu je njihov zbir jednak nuli. Izraz (29) dozvoljava da bilo koja tačka u sistemu bude usvojena kao referentna tačka za napon. Izraz (29) se može primeniti i u slučaju trofaznog četvoržičnog sistema kada se zahteva minimizacija struja faznih provodnika i eliminisanje struje neutralnog provodnika (pod uslovom da se prenos srednje snage ne menja).

Za trofazni trožični sistem, faktor snage nekompenzovanog potrošača se može definisati na sledeći način:

$$\lambda_2 = \frac{\sqrt{J_{2\min}}}{\sqrt{J_2}} = \frac{\sqrt{I_{a\min 2}^2 + I_{b\min 2}^2 + I_{c\min 2}^2}}{\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}} \quad (33)$$

Faktor snage koji se dobija nakon kompenzacije na osnovu usvojenog minimizacionog kriterijuma će biti  $\eta_2=1$ .

U slučaju kada su naponi izvora simetrični, izraz (29) daje Frizeove struje za trofazni sistem [3]. Kada su naponi mreže nesimetrični zbir Frizeovih struja nije jednak nuli tako da se Frizeova definicija ne može primeniti na trofazni trožični sistem zato što ne postoji neutralni provodnik za uspostavljanje nulte struje.

Na osnovu drugog pristupa, kada se prenos trenutne snage ne može menjati, prethodni funkcional (26) ima sledeće ograničenje umesto ograničenja (27):

$$g(i(t), u(t)) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = p \quad (34)$$

Iz uslova da funkcional  $J_2$  (26) ima minimalnu vrednost pod ograničenjima (28) i (34), dobijaju se sledeće linijske struje koje imaju minimalne efektivne vrednosti:

$$\mathbf{i}_{\min 2'} = \frac{p}{\mathbf{v}^T \mathbf{A}_3 \mathbf{v}} \mathbf{A}_3 \mathbf{v} \quad (35)$$

gde je  $\mathbf{A}_3$  matrica definisana sa (30). Minimalna vrednost funkcionala  $J_2$  je sada:

$$J_{2\min}' = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{\mathbf{v}^T \mathbf{A}_3 \mathbf{v}} dt = I_{a\min 2'}^2 + I_{b\min 2'}^2 + I_{c\min 2'}^2 \quad (36)$$

gde su  $I_{a\min 2'}$ ,  $I_{b\min 2'}$  i  $I_{c\min 2'}$  efektivne vrednosti struja koje su definisane jednačinom (35).

Izraz (35) daje minimalne struje koje obezbeđuju istu trenutnu snagu potrošača kao i struje pre kompenzacije, pri čemu je njihov zbir jednak nuli. Izraz (35) dozvoljava da bilo koja tačka u sistemu bude usvojena kao referentna tačka za napon. Izraz (35) se može primeniti i u slučaju trofaznog četvoržičnog sistema kada se zahteva minimizacija stru-

ja faznih provodnika i eliminisanje struje neutralnog provodnika (pod uslovom da se prenos trenutne snage ne menja).

Faktor snage nakon kompenzacije pod uslovom da je prenos trenutne snage nepromenjen ( $J_{2\min} \leq J_{2\min}'$ , zbog nejednakosti Koši-Švarc-Bunjakovski) može se odrediti iz odnosa dve minimalne vrednosti funkcionala  $J_2$ , (32) i (36):

$$\eta_2' = \frac{\sqrt{J_{2\min}}}{\sqrt{J_{2\min}'}} = \frac{\sqrt{I_{a\min 2}^2 + I_{b\min 2}^2 + I_{c\min 2}^2 + I_{n\min 2}^2}}{\sqrt{I_{a\min 2'}^2 + I_{b\min 2'}^2 + I_{c\min 2'}^2 + I_{n\min 2'}^2}} \quad (37)$$

U slučaju kada su naponi izvora simetrični, izraz (35) daje aktivne struje koje su definisane u „ $p$ - $q$ ” teoriji [2], [6]–[8], [10]. Kada su naponi mreže nesimetrični zbir struja definisanih u „ $p$ - $q$ ” teoriji nije jednak nuli tako da se struje definisane u „ $p$ - $q$ ” teoriji ne mogu primeniti na trofazni trožični sistem zato što ne postoji neutralni provodnik za uspostavljanje nulte struje.

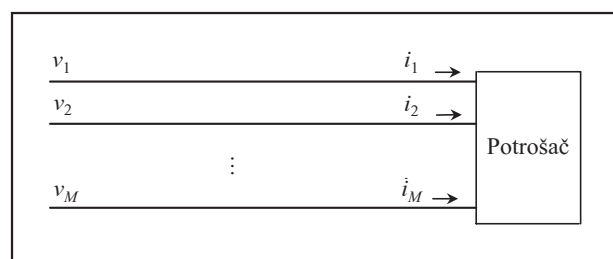
#### 4. MONOFAZNI I POLIFAZNI SISTEMI

Prethodne formulacije minimalnih struja omogućavaju generalizaciju minimizacionih procedura na polifazne i monofazne sisteme. Za polifazni  $M$ -žični sistem ( $M > 1$ ) prikazan na slici 2, trenutne vrednosti napona  $v_1, v_2, \dots, v_M$ , i linijskih struja  $i_1, i_2, \dots, i_M$  se mogu prikazati kao  $M$ -dimenzionalni vektori  $\mathbf{v}$  i  $\mathbf{i}$ :

$$\mathbf{v} = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_M]^T \quad (38)$$

$$\mathbf{i} = [i_1 \quad i_2 \quad \dots \quad i_M]^T \quad (39)$$

Referentna tačka za napon može biti bilo koja tačka u sistemu.



Slika 2. Polifazni sistem

Trenutna snaga u polifaznom sistemu je:

$$p = \mathbf{v}^T \mathbf{i} = \sum_{j=1}^M v_j i_j \quad (40)$$



Na osnovu prvog pristupa, kada se prenos aktivne snage ne može menjati, sledeći kriterijum se može definisati za polifazni sistem:

$$J_3 = \int_0^T f(i(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{j=1}^M i_j^2 dt \rightarrow \min \quad (41)$$

uz ograničenja

$$\int_0^T g(i(t), u(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{j=1}^M v_j i_j dt = P \quad (42)$$

$$h(i(t), u(t)) = \sum_{j=1}^M i_j = 0 \quad (43)$$

Iz uslova da funkcional  $J_3$  ima minimalnu vrednost dobijaju se linijske struje koje imaju minimalne efektivne vrednosti:

$$\mathbf{i}_{\min 3} = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{A}_M \mathbf{v} dt} \mathbf{A}_M \mathbf{v} \quad (44)$$

gde je sa  $\mathbf{A}_M$  označena sledeća matrica:

$$\mathbf{A}_M = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} M-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & M-1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -1 & -1 & \dots & M-1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Minimalna vrednost funkcionala  $J_3$  je:

$$J_{3\min} = \frac{P^2}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{A}_M \mathbf{v} dt} \quad (46)$$

Za polifazni sistem, faktor snage nekompensovanog potrošača se može definisati na sledeći način:

$$\lambda_3 = \frac{\sqrt{J_{3\min}}}{\sqrt{J_3}} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^M I_{j\min 3}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M I_j^2}} \quad (47)$$

gde  $I_{j\min 3}$  ( $j=1, \dots, M$ ) predstavljaju efektivne vrednosti minimalnih struja koje su definisane jednačinom (44) i  $I_j$  ( $j=1, \dots, M$ ) predstavljaju efektivne vrednosti linijskih struja pre kompenzacije (39).

Definicije snaga zasnovane na konceptu nepromenjene srednje snage se mogu izvesti iz opšteg izraza (44). U slučaju kada su naponi simetrični, minimalne struje (15) za trofazni četvorožični sistem se dobijaju kao specijalan slučaj izraza (44) kada je  $M=4$ , a minimalne struje (29) za trofazni trožični sistem se dobijaju kao specijalan slučaj izraza (44) kada je  $M=3$ . U slučaju simetričnih napona, Frizeove aktivne struje (20) i struja neutralnog provodnika jednaka nuli se dobijaju kao specijalan slučaj izraza (44) kada je  $M=4$  i samo Frizeove aktivne struje ka-

da je  $M=3$ . Prethodna minimizaciona procedura važi i za monofazne sisteme, za  $M=2$  izraz (44) daje Frizeove aktivne struje u dva provodnika monofaznog sistema (dve jednake struje različitih znakova).

Na osnovu drugog pristupa, kada se prenos trenutne snage ne može menjati, prethodni funkcional (41) ima sledeće ograničenje umesto ograničenja (42):

$$g(i(t), u(t)) = \sum_{j=1}^M v_j i_j = p \quad (48)$$

Iz uslova da funkcional  $J_3$  (41) ima minimalnu vrednost pod uslovima (43) i (48), dobijaju se sledeće linijske struje koje imaju minimalne efektivne vrednosti:

$$\mathbf{i}_{\min 2'} = \frac{P}{\mathbf{v}^T \mathbf{A}_M \mathbf{v}} \mathbf{A}_M \mathbf{v} \quad (49)$$

gde je  $\mathbf{A}_M$  matrica definisana sa (45). Minimalna vrednost funkcionala  $J_3$  je sada:

$$J_{3\min'} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{\mathbf{v}^T \mathbf{A}_M \mathbf{v}} dt \quad (50)$$

Faktor snage nakon kompenzacije pod uslovom da je prenos trenutne snage nepromenjen ( $J_{3\min} \leq J_{3\min'}$ , zbog nejednakosti Koši-Švarc-Bunjakovski) može se odrediti iz odnosa dve minimalne vrednosti funkcionala  $J_3$ , (46) i (50):

$$\eta_3 = \sqrt{\frac{J_{3\min}}{J_{3\min'}}} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^M I_{j\min 3}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M I_{j\min 3'}^2}} \quad (51)$$

gde  $I_{j\min 3}$  ( $j=1, \dots, M$ ) predstavljaju efektivne vrednosti minimalnih struja koje su definisane jednačinom (49).

Definicije snaga zasnovane na konceptu nepromenjene trenutne snage se mogu izvesti iz opšteg izraza (49). U slučaju kada su naponi simetrični, minimalne struje (22) za trofazni četvorožični sistem se dobijaju kao specijalan slučaj izraza (49) kada je  $M=4$ , a minimalne struje (35) za trofazni trožični sistem se dobijaju kao specijalan slučaj izraza (49) kada je  $M=3$ . U slučaju simetričnih napona dobijaju se aktivne struje definisane u „ $p$ - $q$ ” teoriji (25) i struja neutralnog provodnika jednaka nuli kao specijalan slučaj izraza (49) kada je  $M=4$  i samo aktivne struje definisane u „ $p$ - $q$ ” teoriji kada je  $M=3$ . Za  $M=2$  izraz (49) daje postojeće struje u dva provodnika monofaznog sistema zato što minimizacija linijskih struja u monofaznom sistemu pod uslovom da je trenutna snaga nepromenjena ne menja linijske struje.

## 5. NEAKTIVNE KOMPONENTE STRUJA I SNAGE

Neaktivne komponente linijskih struja su:

$$\mathbf{i}_q = \mathbf{i} - \mathbf{i}_{\min} \quad (52)$$

gde  $\mathbf{i}_{\min}$  predstavlja vektor koji sadrži minimalne struje koje su dobijene jednim od prikazanih minimizacionih postupaka.

Aktivne i neaktivne komponente trenutne snage su:

$$p_p = \mathbf{v}^T \mathbf{i}_{\min} \quad (53)$$

$$p_q = p - p_p \quad (54)$$

Nakon kompenzacije neaktivna komponenta trenutne snage će biti eliminisana i struje uvodu koji napaja potrošač će biti minimalne na osnovu usvojenog kriterijuma.

Oznake za neaktivnu komponentu trenutne snage  $p_q$  i faktor snage  $\lambda$  su oznake koje su korišćene u literaturi pri definicijama snaga u slučaju kada su naponi i struje izobličeni [6], [8], [11]. Oznaka  $\eta$  za faktor snage nakon kompenzacije je uvedena radi upoređivanja efikasnosti dva prikazana kriterijuma kompenzacije.

## 6. UTICAJ KOMPENZACIJE NEAKTIVNE SNAGE NA HARMONIJSKA IZOBLIČENJA

THD (*Total Harmonic Distortion*) faktori linijskih struja se mogu izračunati u vremenskom domenu na sledeći način:

$$\text{THD}_j = \sqrt{1 - \frac{2 \left( \left( \frac{1}{T} \int_0^T i_j(t) \cos(\omega t) dt \right)^2 + \left( \frac{1}{T} \int_0^T i_j(t) \sin(\omega t) dt \right)^2 \right)}{\frac{1}{T} \int_0^T i_j^2(t) dt}} \quad (55)$$

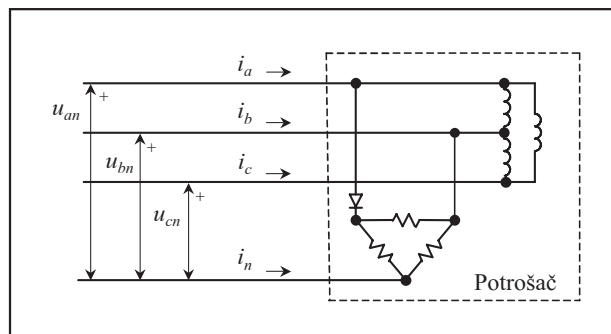
$j = a, b, c, n$

Poređenjem THD faktora linijskih struja pre i posle kompenzacije može se sagledati uticaj kompenzacije neaktivne snage na harmonijska izobličenja.

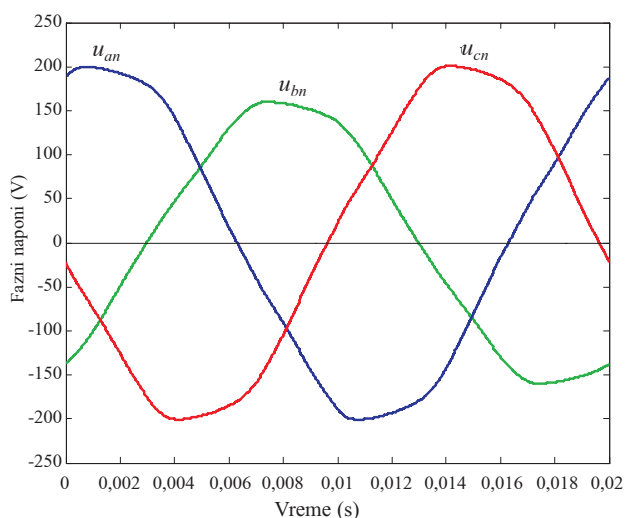
## 7. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Razmatran je slučaj trofaznog četvorožičnog sistema sa izobličanim i nesimetričnim naponima izvora i strujama potrošača. Nesimetrični potrošač kori-

šćen u eksperimentu se sastoji od trofaznog induktivnog potrošača čije su induktivnosti  $L=0,5$  H i omskog potrošača sastavljenog od tri otpornika  $R=160 \Omega$  koji su priključeni između dva fazna i neutralnog provodnika, uz korišćenje energetske diode u jednoj fazi, kao na slici 3. Izmereni naponi izvora i struje potrošača su prikazani na slikama 4 i 5, respektivno.

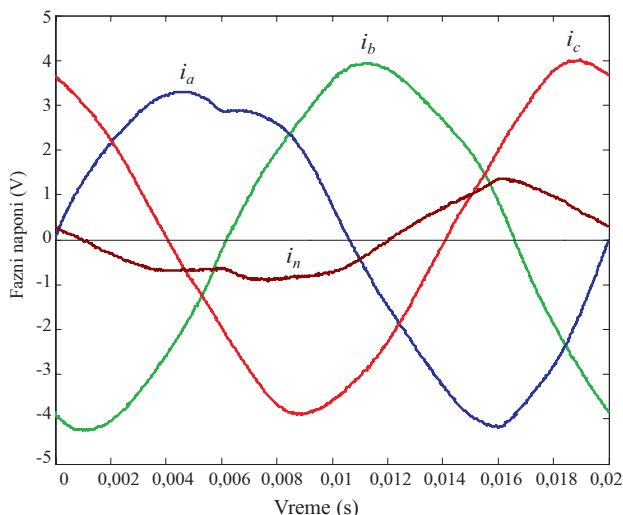


Slika 3. Trofazni nesimetrični potrošač

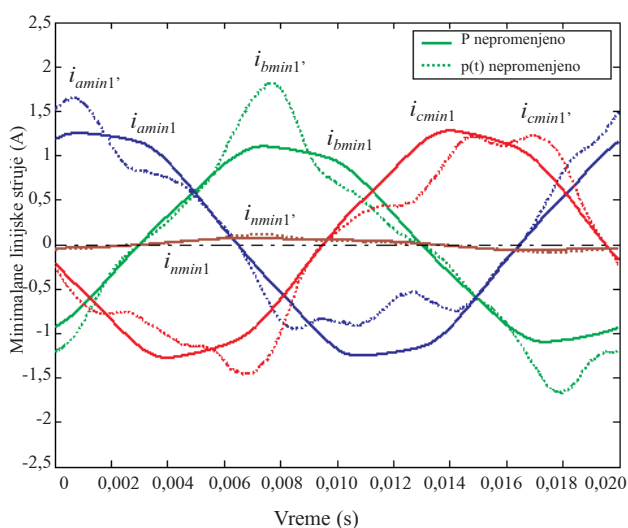


Slika 4. Izmereni fazni naponi

Izračunate minimalne struje pod ograničenjima da je nepromenjen prenos srednje, odnosno trenutne snage su prikazane na slici 6. Veličine koje definišu svojstva potrošača, pre minimizacije (funkcional  $J_1$  i faktor snage  $\lambda_1$ ), nakon minimizacije pod uslovom da je nepromenjen prenos srednje snage ( $J_{1\min}$  i  $\eta_1$ ) i nakon minimizacije pod uslovom da je nepromenjen prenos trenutne snage ( $J_{1\min}$  i  $\eta_1$ ) su prikazane u tabeli 1. Kompenzacija pod uslovom da je nepromenjen prenos srednje snage daje manji funkcional, odnosno manje gubitke energije pri prenosu snage do potrošača.



Slika 5. Izmerene linijske struje



Slika 6. Izračunate minimalne struje pod uslovima da je nepromenjen prenos srednje i trenutne snage

Tabela 1.

Veličine koje definišu kompenzaciju zasnovanu na konceptu srednje ( $P$  nepromenjeno) i trenutne snage ( $p$  nepromenjeno)

| Nekompenzovani potrošač |             | Kompenzacija zasnovana na konceptu srednje snage ( $P$ nepromenjeno) |          | Kompenzacija zasnovana na konceptu trenutne snage ( $p$ nepromenjeno) |           |
|-------------------------|-------------|--|----------|---|-----------|
| $J_1$                   | $\lambda_1$ | $J_{1min}$   | $\eta_1$ | $J_{1min}'$   | $\eta_1'$ |
| 22,61                   | 0,313 9     | 2,227 7  | 1        | 2,452 5   | 0,953 1   |

$THD$  faktori linijskih struja i efektivna vrednost struje neutralnog provodnika pre kompenzacije i nakon kompenzacije pod uslovima da je nepromenjen prenos srednje ili trenutne snage, prikazani su u ta-

beli 2. Kompenzacija neaktivne snage pod uslovom da je nepromenjen prenos srednje snage smanjuje izobličenosť i nesimetriju struja. Kompenzacija pod uslovom da je nepromenjen prenos trenutne snage smanjuje nesimetriju ali znatno povećava izobličenosť struja. Linijske struje dobijene nakon kompenzacije po prvom kriterijumu sadrže samo one harmonike koji su posledica harmonika napona (15) za razliku od linijskih struja dobijenih kompenzacijom po drugom kriterijumu koje sadrže još i harmonike koji su sadržani u struji potrošača pre kompenzacije (22).

Tabela 2.

$THD$  faktori linijskih struja

|   | $THD_a$ | $THD_b$ | $THD_c$ | $THD_n$ | $I_n$   |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| Nekompenzovani potrošač                           | 0,138 1 | 0,060 8 | 0,039 4 | 0,260 2 | 0,743 3 |
| Kompenzacija zasnovana na konceptu srednje snage  | 0,031 3 | 0,028 7 | 0,030 2 | 0,155 7 | 0,046 6 |
| Kompenzacija zasnovana na konceptu trenutne snage | 0,277 5 | 0,225 5 | 0,235 5 | 0,235 5 | 0,056 9 |

## 5. ZAKLJUČAK

Problem definicije i kompenzacije neaktivne snage potrošača pri složenoperiodičnim i nesimetričnim naponima i strujama može se rešiti na osnovu kriterijuma minimizacije efektivnih vrednosti linijskih struja. Kompenzacija neaktivne snage pod uslovom da je prenos srednje snage nepromenjen daje manje gubitke energije i manja izobličjenja struja u napojnom vodu potrošača u odnosu na kompenzaciju pod uslovom da je prenos trenutne snage nepromenjen. Prikazana metodologija omogućava procesiranje merenih napona i struja u realnom vremenu i može se koristiti za realizaciju sistema za upravljanje dinamičkom kompenzacijom neaktivne snage pri nesimetričnim i izobličnim naponima i strujama potrošača.

## 6. LITERATURA

- [1] S. Fryze, ACTIVE, REACTIVE AND APPARENT POWER IN NONSINUSOIDAL SYSTEMS Przegled Elektrotek. No 7, pp. 193-203, 1931.
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, INSTANTANEOUS REACTIVE POWER COMPENSATORS

- COMPRISING SWITCHING DEVICES WITHOUT ENERGY STORAGE COMPONENTS, IEEE Trans. on Ind. Applications, Vol.IA-20, No. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- [3] M. Depenbrock, THE FBD METHOD, A GENERALLY APPLICABLE TOOL FOR ANALYZING POWER RELATIONS, IEEE Trans. on Power Systems, vol.8, May 1993, pp. 381-387.
- [4] N. L. Kusters and W. J. M. Moore, ON THE DEFINITION OF REACTIVE POWER UNDER NON-SINUSOIDAL CONDITIONS, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp. 1845-1854, Oct. 1980.
- [5] L. Czarnecki, MINIMISATION OF UNBALANCED AND REACTIVE CURRENTS IN THREE-PHASE ASYMMETRICAL CIRCUITS WITH NON-SINUSOIDAL VOLTAGE, IEE Proceedings-B, pp. 347-354, Vol.139, No. 4, July 1992.
- [6] J. Willems, A NEW INTERPRETATION OF THE AKAGI-NABAE POWER COMPONENTS FOR NONSINUSOIDAL THREE-PHASE SITUATIONS, IEEE Trans. On Instr. And Meas., pp. 698-703, Vol.41, August 1992.
- [7] A. Nabae, T. Tanaka, A NEW DEFINITION OF INSTANTANEOUS ACTIVE-REACTIVE CURRENT AND POWER BASED ON INSTANTANEOUS SPACE VECTORS ON POLAR COORDINATES IN THREE-PHASE CIRCUITS, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No. 3, pp. 1238-1243, July 1996.
- [8] F. Peng, G. Ott, D. Adams, HARMONIC AND REACTIVE POWER COMPENSATION BASED ON THE GENERALIZED INSTANTANEOUS REACTIVE POWER THEORY FOR THREE-PHASE FOUR-WIRE SYSTEMS, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, No. 6, pp 1174-1181, November 1998.
- [9] Y. Xu, L. M. Tolbert, F. Peng, COMPENSATION-BASED NON-ACTIVE POWER DEFINITION, IEEE Power Electronics Letters, vol 1, no.2, pp. 45-50, June 2003.
- [10] X. Dai, G. Liu, R. Gretsche, GENERALIZED THEORY OF INSTANTANEOUS REACTIVE QUANTITY FOR MULTIPHASE POWER SYSTEM, IEEE Trans. on Power Delivery, vol 19, no.3, pp. 956-972, July 2004.
- [11] P. Salmeron, L. Montano, COMPENSATION IN NONSINUSOIDAL, UNBALANCED THREE-PHASE FOUR-WIRE SYSTEMS WITH ACTIVE POWER CONDITIONER, IEEE Trans. on Power Delivery, vol 19, no. 4, pp. 1968-1974, October 2004.
- [12] T. B. Šekara, J. Č. Mikulović, OPTIMAL NON-ACTIVE POWER COMPENSATION UNDER NON-SINUSOIDAL CONDITION, Electrical Engineering, Volume 88, No. 5, June 2006.

Rad je primljen u uredništvo 27. 09. 2006. godine



**Jovan Mikulović** je rođen 1968. godine u Zaječaru. Diplomirao je 1994. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru za elektroenergetske sisteme. Titulu magistra nauka je stekao na istom fakultetu 2001. godine. Zaposlen je kao asistent na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.



**Tomislav Šekara** je rođen 1965. godine u Mjedeniku (Gacko). Diplomirao je 1991. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu na smeru za automatiku i elektroniku. Titulu magistra nauka je stekao 1997. godine i titulu doktora nauka 2006. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Zaposlen je kao asistent na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

# Granični potencijali i dimenzionisanje uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV u uzemljenim elektrodistributivnim mrežama

Originalni naučni rad  
UDK: 621.3.053; 621.316.99

---

## Rezime:

Prema našim propisima sistemi uzemljenja transformatorskih stanica (TS) 10(20)/0,4 kV/kV koje rade u mrežama uzemljenim preko male impedanse dimenzionišu se prema struji koja se uvek računa kao proizvod redukcionog faktora napojnog voda i ukupne struje zemljospoja. Posledice ovakvog pristupa mogu biti izuzetno niske otpornosti uzemljivača u odnosu na realne vrednosti kojima se obezbeđuje sigurnost ljudi i imovine. U radu se analiziraju moguće razlike između vrednosti struja kroz uzemljivač dobijenih propisanim postupkom i stvarnih vrednosti ovih struja, kao i maksimalni mogući potencijali uzemljivača. Takođe se navode formule pomoću kojih se dobija realna procena napona i struja uzemljivača.

**Ključne reči:** raspodela struje zemljospoja, otpornost uzemljivača, potencijal uzemljivača

---

## Abstract:

### MAXIMUM POSSIBLE GROUND POTENTIALS OF 10(20)/0,4 kV/kV SUBSTATIONS AND THEIR MAXIMUM PERMISSIBLE GROUND RESISTANCES

The maximum permissible ground resistance of a 10(20)/0,4 kV/kV substation is determined by the national regulations procedure which assumes that the portion of the ground fault current flowing through substation grounding is always equal to the product of the feeding line reduction factor and the total ground fault current. However, such an approach may lead to ground resistance limits that are significantly lower than necessary. A method of evaluating the maximum possible ground potentials, as well as correct substation ground resistances, is presented in the paper.

**Key words:** ground fault current division, permissible ground resistance, ground potential

---

## 1. UVOD

Transformatorske stanice (TS) nazivnog napona 10/0,4 kV/kV i 20/0,4 kV/kV nesumnjivo predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata naših distributivnih mreža. Prosečan broj TS 10(20)/0,4 kV/kV (TS SN/0,4 kV/kV) koji se svake godine izgradi i priključi na distributivnu mrežu u Srbiji kreće se između 400 i 500 [1].

Kod ovako brojnih objekata svaka, pa i najmanja ušteda u jediničnoj ceni gradnje globalno može u datom vremenskom razdoblju da naraste do vrednosti koje uopšte nisu za potcenjivanje. U tom kontekstu u najmanju ruku je neobično da tu činjenicu godinama ignorišu odgovorni za inoviranje postojećih i donošenje novih propisa. Kao primer može da posluži slučaj, za delatnost distribucije veoma va-

žnog, ako ne i najvažnijeg pravilnika [2] koji se odnosi na zaštitu niskonaponskih mreža i pripadajućih transformatorskih stanica. Donošenje inovirane verzije ovog pravilnika oteže se već osam godina!

Pomenuti pravilnik [2] još od 1978. godine, dakle, bezmalo punih trideset godina, implicitno dozvoljava da se pri dimenzionisanju uzemljenja TS SN/0,4 kV/kV u mrežama sa uzemljenom neutralnom tačkom, primeni procedura koja obezbeđuje bezbednost ljudi i imovine, ali sa cenom koja je znatno veća od cene uz koju se ista takva bezbednost može garantovati sa mnogo manjim utroškom sredstava.

U tekstu koji sledi učinjen je pokušaj da se ukaže na nepotrebne troškove koji mogu nastati kao posledica nedovoljno preciznih formulacija pojedinih odredbi važećeg propisa [2].

## 2. RAZLAGANJE STRUJE ZEMLJOSPOJA PRI KVARU U TS SN/0,4 kV/kV

### 2.1. Redukcioni faktor napojnog voda

Zaštitno uže ili sistem od dva zaštitna užeta energetskog nadzemnog voda, isto kao i električna zaštita trožilnog energetskog kabla ili sistem od tri električne zaštite tri jednožilna energetska kabla, predstavljaju *redukcione provodnike* u odnosu na fazne provodnike energetskog voda, ali samo pod uslovom da su zaštitna užad, odnosno, električne zaštite uzemljeni na oba svoja kraja. I zaštitno uže i električna zaštita dobili su atribut *redukcioni* zbog toga što naizmenične struje koje u njima indukuju struje faznih provodnika, slabe magnetsko polje faznih struja i time smanjuju elektromotornu silu (ems) koju to polje indukuje u okruženju voda.

Efekti ovog slabljenja kvantitativno se procenjuju pomoću redukcionog faktora oko koga u diskusijama na temu razlaganja ukupne struje zemljospoja među našim energetičarima neretko dolazi do sporenja. Uzroci za to se uglavnom kriju u različitim prilazima definiciji samog redukcionog faktora.

U nameri da se izbegnu mogući nesporazumi na tu temu u ovom izlaganju polazi se od izvorne definicije redukcionog faktora napojnog voda kakva je, na primer, ona na strani 351 u [4] prema kojoj je ovaj faktor jednak odnosu dve indukovane ems:

$$r = \frac{ems_{SA}}{ems_{BEZ}} \quad (1)$$

pri čemu je:

$ems_{SA}$  – indukovana ems koju struje faznih provodnika indukuju na rastojanju  $d$  od ose voda kada su redukciono provodnici direktno uzemljeni na oba kraja voda i

$ems_{BEZ}$  – indukovana ems koju struje faznih provodnika indukuju na rastojanju  $d$  od ose voda kada su redukciono provodnici izolovani od zemlje ili uopšte ne postoje.

U slučaju kada je jedan fazni provodnik u zemljospoju i kada je rastojanje  $d_m$  između tog provodnika i navedenih redukcionih provodnika zanemarivo u odnosu na rastojanje  $d$ , tada se iz definicione relacije (1) izvodi da je redukciono faktor napojnog voda jednak

$$r = \frac{I_k - I_r}{I_k} = \frac{I_z}{I_k} = 1 - \frac{Z_m}{Z_r} \quad (2)$$

gde je:

$I_k$  – ukupna struja zemljospoja (struja kroz fazni provodnik pogođen zemljospojem);

$I_r$  – deo ukupne struje zemljospoja kroz sistem zaštitnih užadi (ili, kroz sistem električnih zaštita);

$I_z$  – deo ukupne struje zemljospoja kroz zemlju;

$Z_m$  – međusobna impedansa između sistema zaštitnih užadi (sistema električnih zaštita) i faznog provodnika pogođenog zemljospojem i

$Z_r$  – sopstvena impedansa sistema zaštitnih užadi (sistema električnih zaštita) napojnog voda.

Kako se kod realnih energetskih vodova uvek može izabrati rastojanje  $d$  takvo da je  $d_m \ll d$  iz (2) se vidi da se, osim indukovanih ems, pomoću redukcionog faktora može izračunati i komponenta ukupne struje zemljospoja koja se na mestu kvara zatvara preko zemlje. (Kasnije će se videti da je to moguće samo ako su ispunjeni određeni uslovi.)

Nadalje, iz (2) se takođe vidi da ovako definisan redukciono faktor napojnog voda zavisi samo od parametara napojnog voda ( $Z_m$ ,  $Z_r$ ), a uopšte ne zavisi od načina uzemljenja redukcionih provodnika na njegovim krajevima. On je, dakle, i sam jedan od parametara napojnog voda koji zavisi isključivo od električnih osobina i geometrije provodnika od kojih je vod napravljen, a nikako od lokalnih uslova na mestu kvara, niti na krajevima voda. Samim tim on je konstantan duž trase voda sve dok su  $Z_m$  i  $Z_r$  konstantni. Zbog toga i vrednosti redukcionih faktora koje navode proizvođači kablovskih vodova mogu biti utvrđene ili na bazi relacija (1) i (2), ili merenjem na uzorku na kome su krajevi električne zaštite kratko spojeni.

Nesporazumi, o kojima je napred bilo reči, mogu nastati zbog toga što se često gubi iz vida da napred navedena „strujna” definicija redukcionog faktora  $r = I_z/I_k = 1 - Z_m/Z_r$ , koja je uostalom identična sa definicijom ovog faktora u našim propisima [7], podrazumeva da su redukciono provodnici na oba kraja uzemljeni preko zanemarivih otpornosti. U protivnom relacija (2) ne vredi.

## 2.2. Faktor razlaganja ukupne struje zemljospoja

Kod dimenzionisanja sistema uzemljenja u TS SN/0,4 kV/kV u distributivnim mrežama čija je neutralna tačka uzemljena preko male otpornosti, naši važeći Propisi bezuslovno nalažu da impedansa sistema uzemljenja TS SN/0,4 kV/kV mora da zadovolji uslov [2,3].

$$Z_{su} = \frac{U_u}{I_{su}} = \frac{U_u}{r \cdot I_k} \leq \frac{k_d U_{doz}}{r \cdot I_k} \quad (3)$$

gde je:

$Z_{su}$  (Ω) – otpornost rasprostiranja sistema uzemljenja u TS SN/0,4 kV/kV;

$U_u$  (V) – napon uzemljivača u TS SN/0,4 kV/kV;

$U_{doz}$  (V) – dozvoljeni napon dodira;

$k_d$  – sačinilac jednak količniku napona uzemljivača TS i napona dodira;

$I_{su}$  (A) – komponenta ukupne struje zemljospoja kroz sistem uzemljenja TS SN/0,4 kV/kV;

$I_k$  (A) – ukupna struja zemljospoja i

$r$  – redukcioni faktor napojnog voda.

Ako je  $R_u$  (u Ω) otpornost rasprostiranja uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV tada uvek mora biti  $Z_{su} \leq R_u$ , pa je uslov (3) sigurno zadovoljen kada je ispunjen kriterijum

$$R_u \leq \frac{k_d U_{doz}}{r \cdot I_k} \quad (3a)$$

Iako je ovaj poslednji kriterijum (3a) oštiji od uslova (3), Propis ničim ne ograničava njegovu primenu.

Međutim, u uglednoj monografiji [5] navodi se da se deo ukupne struje zemljospoja  $I_u$  koja se odvodi preko uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV određuje iz izraza

$$I_u = \frac{r I_k}{1 + R_u \sum_i \frac{1}{Z_i^{(u)}}} \quad \text{za}, \quad R_{uiz} \ll R_u \quad (4)$$

gde je:

$I_u$  (A) – komponenta ukupne struje zemljospoja kroz uzemljivač TS SN/0,4 kV/kV;

$I_k$  (A) – ukupna struja zemljospoja;

$R_u$  (Ω) – otpornost rasprostiranja uzemljivača u TS SN/0,4 kV/kV;

$R_{uiz}$  (Ω) – otpornost rasprostiranja uzemljivača u izvornoj TS VN(SN)/SN;

$r$  – redukcioni faktor napojnog voda i

$Z_i^{(u)}$  (Ω) – impedanse uzemljenja svih vodova koji ulaze u TS SN/0,4 kV/kV.

U ovom izlaganju pod uzemljenjem nadzemnog voda podrazumeva se uzemljivački sistem koga čine zaštitno uže i uzemljenja stubova koja su sa njim u galvanskoj vezi. Analogno ovome, pod uzemljenjem kablovskog voda podrazumeva se uzemljivački sistem koga čine električna zaštita i uzemljenja TS SN/0,4 kV/kV koja su sa njom u galvanskoj vezi.

Analizom napajanja jedne TS SN/0,4 kV/kV na kraju trofaznog kablovskog voda izvedenog sa tri jednožilna 20 kV kabla sa neprovodnim spoljnjim omotačem, u [6] je dobijeno da je za  $R_{uiz} \ll R_u$  komponenta ukupne struje zemljo-spoja kroz uzemljivač

$$I_u = \frac{r I_k}{1 + R_u \frac{3}{(z_{ez1} + 2 z_{mee})l}} \quad (5)$$

gde je:

$z_{ez1}$  (Ω/km) – podužna sopstvena impedansa električne zaštite jedne fazne žile;

$z_{mee}$  (Ω/km) – podužna međusobna impedansa između električnih zaštita dve fazne žile;

$l$  (km) – dužina napojnog voda i

$\frac{(z_{ez1} + 2 z_{mee})l}{3}$  (Ω) – ukupna impedansa električnih zaštita napojnog voda.

Ostala označavanja ista su kao u (4).

Pošto je impedansa  $\frac{(z_{ez1} + 2 z_{mee})l}{3}$  u slučaju

jedne TS na kraju voda ujedno i impedansa uzemljenja  $Z_1^{(u)}$  jedinog kablovskog voda koji ulazi u TS, očigledno je da je (5) specijalan slučaj formule (4) koji se za  $i=1$  dobija iz ove poslednje smenom

$$Z_1^{(u)} = \frac{(z_{ez} + 2 z_{mee})l}{3}$$

Iz obe formule sledi da se u opštem slučaju vrednost komponente ukupne struje zemljospoja kroz uzemljivač TS SN/0,4 kV/kV ne može korektno odrediti pomoću izraza  $I_u = r \cdot I_k$ , sa redukcionim faktorom  $r$  definisanim sa (1) i (2), već pomoću izraza  $I_u = r_D \cdot I_k$ , u kome je  $r_D$  faktor razlaganja (dekompozicije) ukupne struje zemljospoja koji se prema (4) definiše kao

$$r_D = \frac{r}{1 + R_u \sum_i \frac{1}{Z_i^{(u)}}}, \quad (6)$$

gde je:

$R_u$  (Ω) – otpornost rasprostiranja uzemljivača u TS SN/0,4 kV/kV;

$r$  – redukcioni faktor napojnog voda i

$Z_i^{(u)}$  (Ω) – impedansa uzemljenja  $i$ -tog od svih vodova koji ulaze u TS SN/0,4 kV/kV.

Iz definicionog izraza (6) vidi se: prvo, da je  $r_D \leq r$  i drugo, da se ukupna struja zemljospoja razlaže na komponente ne samo u zavisnosti od električnih karakteristika napojnog voda izraženih preko njegovog redukcionog faktora  $r$ , već da to razlaganje bitno zavisi i od lokalnih uslova koji se menjaju od TS SN/0,4 kV/kV do TS SN/0,4 kV/kV. Očigledno je, dakle, da u opštem slučaju mora biti  $r_D \neq r$  i da uslov  $r_D \approx r$  može biti ispunjen samo u specijalnom slučaju

kada je  $R_u \sum_i \frac{1}{Z_i^{(u)}} \approx 0$ , a to se događa kada je otpornost uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV zanemariva u odnosu na ekvivalentnu impedansu uzemljenja svih vodova koji ulaze u TS SN/0,4 kV/kV.

Kako kod napajanja TS kablovskim vodom otpornost njenog uzemljivača nije zanemariva u odnosu na ekvivalentnu impedansu uzemljenja svih vodova, u realnim SN mrežama struja kroz uzemljivač  $I_u$  može se sa više ili manje tačnosti izračunavati pomoću redukcionog faktora samo kod TS koje se napajaju nadzemnim vodovima sa zaštitnim užetom i bez zaštitnog užeta, jer je sopstvena podužna impedansa  $z_g$  zaštitnog užeta realnih nadzemnih vodova znatno veća od otpornosti uzemljivača TS.

Kada su napojni vodovi kablovi tipa NPO, tada za rastojanja do 1 km (3) pravi grešku od najmanje 60 % za  $R_u = 1 \Omega$  i najmanje 90 % za  $R_u = 5 \Omega$ . Kada su napojni vodovi kablovi tipa XHE, za ista rastojanja greške su istog reda kao kod NPO kablova. Dobijeni numerički rezultati takođe pokazuju da su kod rastojanja do izvorne TS VN/SN kV koja ne prelaze 1 km razlike između faktora razlaganja NPO

### 2.3. Procena razlika vrednosti redukcionog faktora i faktora razlaganja

Iz (4) i (6) sledi da je napon uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV

$$U_u = r_D I_k R_u \quad (7)$$

što znači da je odnos napona uzemljivača TS koji je u (7) sračunat pomoću faktora  $r_D$ , prema istom naponu uzemljivača koji je sračunat pomoću redukcionog faktora napojnog voda, jednak količniku  $r_D/r$ . Da bi se ilustrovale razlike u rezultatima koji se dobijaju primenom procedure sa redukcionim faktorom i primenom procedure sa faktorom razlaganja koja obezbeđuje tačniju procenu stvarnih napona i struja u uzemljivačkom sistemu TS, u tabeli 1. date su vrednosti odnosa  $r_D/r$  za razne dužine napojnog voda koji napaja jednu TS SN/0,4 kV/kV na svom kraju čiji uzemljivač ima pretpostavljene otpornosti  $R_u = 1$  i  $R_u = 5 \Omega$ . Posmatrane su tri vrste napojnog voda:

- nadzemni vod sa alučeličnim faznim provodnicima sa zaštitnim užetom preseka 35 mm<sup>2</sup> Če koje ima podužnu impedansu 6,174 + j 2,254 Ω/km
- kablovski vod tipa NPO čiji plašt ima podužnu impedansu 0,437 + j 0,309 Ω/km
- kablovski vod tipa XHE čija električna zaštita ima podužnu impedansu 0,376 + j 0,468 Ω/km.

*Napomena:* Podužna impedansa NPO kabla uz uvažavanje njegovih efekata prirodnog uzemljivača izračunata je prema formuli (6.67) iz [5]. Račun je sproveden sa vrednošću sopstvene podužne impedanse olovnog plašta  $z_{pb} = 0,7 + j2 \Omega/\text{km}$ , specifičnom otpornošću tla  $\rho = 50 \Omega\text{m}$  i sa vrednošću podužne očne admitanse  $y = 7,411 \text{ S/km}$ .

Kada su napojni vodovi kablovi tipa NPO, tada za rastojanja do 1 km (3) pravi grešku od najmanje 60 % za  $R_u = 1 \Omega$  i najmanje 90 % za  $R_u = 5 \Omega$ . Kada su napojni vodovi kablovi tipa XHE, za ista rastojanja greške su istog reda kao kod NPO kablova.

Dobijeni numerički rezultati takođe pokazuju da su kod rastojanja do izvorne TS VN/SN kV koja ne prelaze 1 km razlike između faktora razlaganja NPO

Tabela 1.

Odnos  $r_D/r$  u funkciji rastojanja do izvorne TS sračunat za napojni vod sa jednom TS SN/0,4 kV/kV na svom kraju ( $\rho = 50 \Omega\text{m}$ )

| Rastojanje<br>(km) | $R_u = 1 \Omega$                   |                                   |                                   | $R_u = 5 \Omega$                   |                                   |                                   |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                    | AlČe+Če<br>$\frac{z_g}{R_u} = 6,6$ | NPO<br>$\frac{z_{ez}}{R_u} = 2,1$ | XHE<br>$\frac{z_{ez}}{R_u} = 0,6$ | AlČe+Če<br>$\frac{z_g}{R_u} = 1,3$ | NPO<br>$\frac{z_{ez}}{R_u} = 0,4$ | XHE<br>$\frac{z_{ez}}{R_u} = 0,1$ |
| 0,2                | 0,557                              | 0,296                             | 0,111                             | 0,210                              | 0,072                             | 0,024                             |
| 0,4                | 0,733                              | 0,358                             | 0,206                             | 0,349                              | 0,095                             | 0,047                             |
| 0,5                | 0,775                              | 0,363                             | 0,248                             | 0,402                              | 0,097                             | 0,058                             |
| 0,7                | 0,829                              | 0,362                             | 0,322                             | 0,487                              | 0,098                             | 0,080                             |
| 1                  | 0,874                              | 0,364                             | 0,413                             | 0,577                              | 0,098                             | 0,111                             |
| 2                  | 0,933                              | 0,374                             | 0,604                             | 0,733                              | 0,102                             | 0,206                             |
| 5                  | 0,972                              | 0,385                             | 0,809                             | 0,874                              | 0,106                             | 0,413                             |
| 10                 | 0,986                              | 0,394                             | 0,899                             | 0,933                              | 0,110                             | 0,604                             |
| 15                 | 0,991                              | 0,398                             | 0,932                             | 0,954                              | 0,111                             | 0,706                             |
| 20                 | 0,993                              | 0,401                             | 0,949                             | 0,965                              | 0,113                             | 0,768                             |
| 30                 | 0,995                              | 0,406                             | 0,966                             | 0,977                              | 0,114                             | 0,838                             |



i XHE kablova znatno manje od razlika njihovih redukcionih faktora. Ako je redukcionni faktor trofaznog NPO kabla 0,16 [5], a redukcionni faktor trofaznog XHE kabla 0,544 [6] (dakle, više nego trostruko veći), iz tabele 1. se za rastojanje 0,5 km za  $R_u = 1 \Omega$  dobija  $r_D = 0,058$  za NPO kabl i  $r_D = 0,135$  za XHE kabl, što je 2,3 puta veće od 0,058. Za  $R_u = 5 \Omega$  ove vrednosti su 0,016 i 0,032. Sa porastom specifične otpornosti tla razlika između faktora razlaganja NPO i XHE kablova se smanjuje, tako na primer, da za  $\rho = 500 \Omega\text{m}$  ta razlika pada na cca 20 %.

Kao što se vidi, konstrukcija električne zaštite polietilenskih kablova omogućava da su, uprkos izolovanom spoljnjem omotaču, i ovi kablovi prirodni uzemljivači, posebno na terenima sa visokom specifičnom otpornošću tla.

Kada na napojnom kablovskom vodu ima više od jedne TS SN/0,4 kV/kV, tada je impedansa uzemljenja voda manja od impedanse njegove električne zaštite, što još više smanjuje faktor razlaganja, a time i napon uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV, tako da se dobijaju još veće razlike u proceni ovog napona nego što je dobijeno u tabeli 1.

### 3. MOGUĆI OPSEZI NAPONA I GRANIČNI POTENCIJAL UZEMLJIVAČA TS

#### 3.1. Mogući opsezi napona uzemljivača

Napon uzemljivača jedne TS SN/0,4 kV/kV koja se napaja iz mreže sa uzemljenom neutralom preko nadzemnog voda koji nema zaštitno uže, zadovoljava nejednakost

$$U_u < \frac{U_f}{1 + \frac{R_N}{R_u}}, \quad (8)$$

gde je:

$U_f$  – fazni napon napojne mreže;  
 $R_N$  – impedansa u neutrali mreže i  
 $R_u$  – otpornost uzemljivača TS.

Iz ove relacije se vidi da se napon uzemljivača približava faznom naponu mreže kada  $R_u$  uzima velike vrednosti, što znači da je teoretski mogući opseg u kome se mogu naći vrednosti napona uzemljivača ovakvih TS

$$0 < U_u < U_f. \quad (9)$$

Kod TS SN/0,4 kV/kV koje se iz uzemljene mreže napajaju ili nadzemnim vodovima sa zaštitnim užetom ili kablovskim vodovima, napon njihovih uzemljivača može se prema (6) i (7) uz napred usvojena označavanja izraziti u obliku

$$U_u = \frac{r I_k}{\frac{1}{R_u} + \frac{1}{Z_{nv}^{(u)}} + \sum_{i=1} \frac{1}{Z_i^{(u)}}} \quad (10)$$

gde je:

$Z_{nv}^{(u)}$  ( $\Omega$ ) – impedansa uzemljenja napojnog voda i

$Z_i^{(u)}$  ( $\Omega$ ) – impedansa uzemljenja  $i$ -tog od vodova koji osim napojnog ulaze u TS SN/0,4 kV/kV

U skladu sa praksom koja se primenjuje u sve-tu naši propisi [7] u srednjenaponskim mrežama uzemljenim preko male impedanse ograničavaju ukupnu struju zemljospoja na 1 000 A, tako da za datu struju  $I_k$  i dato  $r$  napon  $U_u$  postaje maksimalan kada je imenilac razlomka na desnoj strani (10) minimalan. Teoretski to se događa kada impedanse  $R_u$  i  $Z_i^{(u)}$  postanu neograničeno velike. Impedansa uzemljenja napojnog  $Z_{nv}^{(u)}$  voda uvek ima konačnu vrednost, jer bi u suprotnom to značilo da zaštitno uže, odnosno, električna zaštita napojnog voda ili ne postoje, ili da su izolovani od tla, što se kosi sa činjeničnim stanjem na TS koje su izgrađene i koje se eksploatišu saglasno važećim propisima.

Svoju najveću moguću vrednost koju može imati impedansa uzemljenja  $Z_{nv}^{(u)}$  napojnog voda dobija tada kada su sve odočne admitanse redukcionog provodnika voda nule. Impedansa  $Z_{nv}^{(u)}$  tada postaje jednaka impedansi sistema njegovih zaštitnih užadi, odnosno, impedansi sistema njegovih električnih zaštita, pa je teoretski najveća vrednost koju pri datim lokalnim uslovima i datoj ukupnoj struji zemljospoja  $I_k$  može dostići napon uzemljivača TS

$$\max U_u = r I_k Z_r, \quad (11)$$

gde je:

$Z_r = z_g \cdot l$  – impedansa zaštitnog užeta ili sistema zaštitnih užadi kada je napojni vod nadzemni;

$Z_r = z_{ez} \cdot l$  – impedansa električne zaštite ili sistema električnih zaštita kada je napojni vod kablovski;

$z_g$  ( $\Omega/\text{km}$ ) – podužna impedansa zaštitnog užeta ili sistema zaštitnih užadi;

$z_{ez}$  ( $\Omega/\text{km}$ ) – podužna impedansa električne zaštite ili sistema električnih zaštita i

$l$  (km) – dužina napojnog voda.

Prema tome, teoretski mogući opseg u kome se mogu naći vrednosti napona uzemljivača TS koje se napajaju nadzemnim vodovima sa zaštitnim užetom ili SN kablovskim vodovima je

$$0 < U_u < r I_k Z_r. \quad (12)$$

Ako se uzmu u obzir red veličine struje zemljospoja, zatim vrednosti impedanse zaštitnih užadi i

električnih zaštita napojnih vodova u distributivnim mrežama, odmah se vidi da je čak i za  $r = 1$  maksimalni mogući napon uzemljivača kablovski napajane TS SN/0,4 kV/kV daleko ispod maksimalno mogućeg napona uzemljivača iste takve TS SN/0,4 kV/kV koja se napaja nadzemnim vodom.

Štaviše, u realnim uslovima moguć je slučaj da je maksimalni mogući napon uzemljivača manji od dozvoljenog napona kojim se garantuje bezbednost pri kvaru na višenaponskom delu TS!

### 3.2. Granični potencijal uzemljivača TS

Formula (10) izvedena je iz formule (4) koja vredi uz uslov  $R_{uiz} \ll R_u$ , tj. uz zanemarivanje otpornosti uzemljenja izvorne TS VN/SN kV/kV, tako da se može postaviti pitanje u kojoj se meri ova aproksimacija odražava na procenu maksimalnih mogućih napona uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV.

Odgovor na to pitanje može se dobiti analizom najopštijeg slučaja jednog napojnog voda sa redukcionim provodnikom u kome se posmatra radialno napajana TS SN/0,4 kV/kV sa zemljospojem na strani visokog napona (slika 1.).

TS SN/0,4 kV/kV priključena je na mrežu u čvoru označenom na slici 1. sa  $K$ . Kolo nultog redosleda preko kojega se zatvara ograničena struja zemljospoja za vreme kvara u  $K$  predstavljeno je lestvičastom mrežom. Na slici je sa  $Z_{ezi}$  označena impedansa električne zaštite, odnosno, zaštitnog užeta  $i$ -te deonice (raspona) napojnog voda (u  $\Omega$ ), sa  $Z_{mef}$  međusobna impedansa (u  $\Omega/\text{km}$ ) između faznog provodnika i električnih zaštita, odnosno, zaštitnih užadi ako je vod nadzemni, sa  $R_u$  otpornost rasprostiranja uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV (u  $\Omega$ ) u kojoj se događa zemljospoj, sa  $R_{uiz}$  otpornost rasprostiranja uzemljivača

u izvornoj TS VN(SN)/SN kV, i sa  $Y_i$  (u  $1/\Omega$ ) označene su admitanse uzemljivača ostalih TS SN/0,4 kV/kV na istom kablovskom vodu, odnosno, admitanse uzemljenja stubova ako je vod nadzemni. Najzad, sa  $l_i$  biće označene dužine kablovskih deonica, odnosno, raspona nadzemnog napojnog voda u km.

Napon na uzemljivaču TS u čvoru  $K$  za vreme zemljospoja može se izraziti na dva načina: najpre kao proizvod

$$U_u^{(1)} = R_u I_u. \quad (13)$$

a zatim kao suma ems na putu  $KPG$

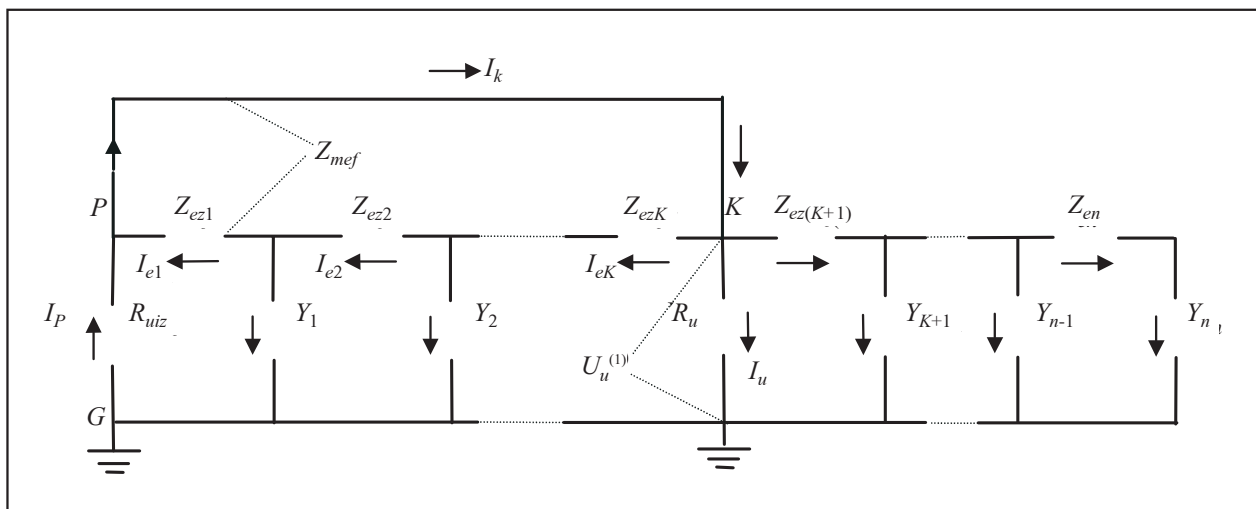
$$U_u^{(1)} = \sum_{i=1}^K Z_{ezi} I_{ei} - Z_{mef} I_k \sum_{i=1}^K l_i - R_{uiz} I_P. \quad (14)$$

Iz stvarne mreže na slici 1. može se izvesti fiktivna mreža u kojoj su u svim TS SN/0,4 kV/kV na kablovskom izvodu električne zaštite izolovane od uzemljenja, odnosno u kojoj je na svim stubovima nadzemnog voda zaštitno uže izolovano od uzemljenja stuba, jednom rečju u kojoj su sve otočne admitanse  $Y_i$ , uključujući i onu u čvoru  $K$  postale jednake nuli. Neka u toj mreži koja je prikazana na slici 2 zemljospoj sa ukupnom strujom  $I_k$  i dalje postoji u čvoru  $K$ .

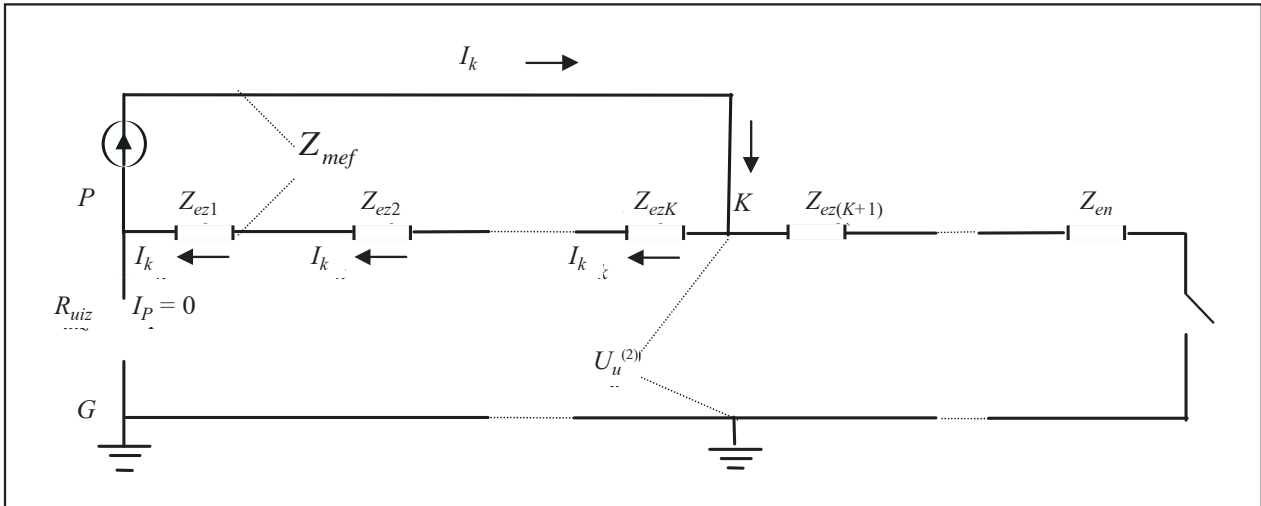
U tako izmenjenim uslovima napon na uzemljivaču TS u čvoru  $K$  postaje

$$U_u^{(2)} = I_k \sum_{i=1}^K Z_{ezi} - Z_{mef} I_k \sum_{i=1}^K l_i. \quad (15)$$

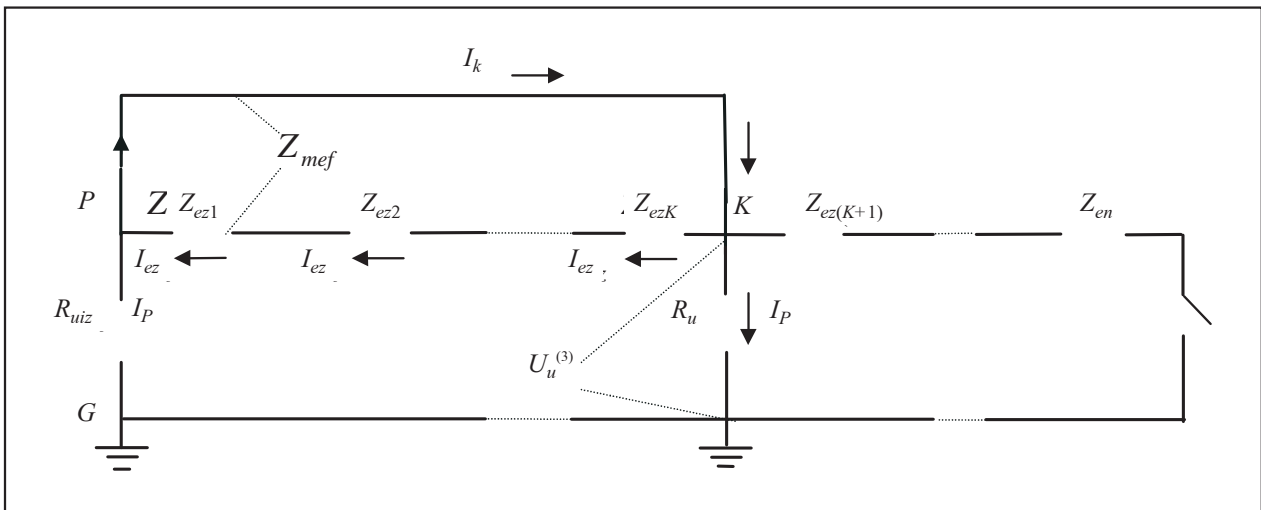
S obzirom da je u stvarnoj mreži u svakoj kablovskoj deonici (odnosno, rasponu) struja kroz električne zaštite (odnosno, zaštitno uže)  $Z_{ezi}$  bila manja od ukupne struje  $I_k$ , tj. pošto je za svako  $i$  bilo  $I_{ei} < I_k$ , tada sigurno mora biti



Slika 1. Raspodela struja za vreme zemljospoja u čvoru  $K$  u stvarnoj mreži.



Slika 2. Raspodela struja za vreme zemljospoja u čvoru K u fiktivnoj mreži.



Slika 3. Raspodela struja za vreme zemljospoja u čvoru K u fiktivnoj mreži sa konačnim  $R_u$ .

$$\sum_{i=1}^K Z_{ezi} I_{ei} < I_k \sum_{i=1}^K Z_{ezi}, \quad (16)$$

odakle sledi da je uvek

$$U_u^{(1)} < U_u^{(2)}. \quad (17)$$

Prema tome, nezavisno od izbora otpornosti uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV u čvoru  $k$ , uvek postoji broj  $U_u^{(2)} = V_{GR}$  koji je veći od napona na uzemljivaču.

Kada se u (15) stavi da je

$$\sum_{i=1}^K Z_{ezi} = Z_{ez} \quad \text{i} \quad \sum_{i=1}^K \ell_{ei} = \ell \quad (18)$$

dobija se da je

$$V_{GR} = U_u^{(2)} = Z_{ez} \left( 1 - \frac{Z_{mef} \ell}{Z_{ez}} \right) I_k = Z_{ez} r I_k \quad (19)$$

što se slaže sa rezultatom (11) s obzirom da je  $Z_r \equiv Z_{ez}$ .

Prema tome, **svakoj TS SN/0,4 kV/kV koja se napaja iz radijalne sredjenaponske mreže uzemljene preko male impedanse, pridružen je granični potencijal uzemljivača  $V_{GR}$ , takav da za bilo koju vrednost otpornosti uzemljivača trafostanice  $R_u$  iz opsega  $0 < R_u < \infty$  napon na uzemljivaču  $U_u$  uvek zadovoljava nejednakost  $U_u < V_{GR}$ .**

Kako se moglo pretpostaviti, a kao što se vidi iz formule (19) i postupka preko kojeg se do nje došlo, granični potencijal uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV ne zavisi od otpornosti uzemljenja izvorne TS VN/SN kV/kV  $R_{uiz}$ .

Navedeni stav o graničnom potencijalu uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV  $V_{GR}$  lako se verifikuje i u

slučaju kada u fiktivnoj mreži sa slike 3. TS u kojoj je zemljospoj, ima konačnu otpornost  $R_u$ .

Naime, ako se imaju u vidu relacije (18) tada se za zatvorenu konturu KPGS sa slike 3 može napisati

$$Z_{ez} (I_k - I_p) - Z_{mef} \ell I_k - (R_u + R_{uiz}) I_p = 0 \quad (20)$$

odakle se napon uzemljivača  $U_u^{(3)}$  kao proizvod  $R_u I_p$  dobija u obliku

$$U_u^{(3)} = \frac{R_u}{Z_{ez} + R_u + R_{uiz}} \cdot Z_{ez} r I_k, \quad (21)$$

Pošto je razlomak na desnoj strani (21) za konačne vrednosti impedansi u njegovom brojitelju i imenitelju uvek manji od jedinice, to za svako konačno  $R_u$  mora biti

$$U_u^{(3)} < Z_{ez} r I_k. \quad (22)$$

Međutim, kako je  $\lim_{R_u \rightarrow \infty} U_u^{(3)} = Z_{ez} r I_k$ , proizvod  $Z_{ez} r I_k$  je upravo ona vrednost koja za bilo koje  $R_u$  uvek mora biti veća od napona na uzemljivaču u čvoru  $K$ , što još jednom potvrđuje egzistenciju graničnog potencijala uzemljivača  $V_{GR}$ .

### 3.3. Uzroci defekta formule (3)

Veoma su zanimljive posledice do kojih dovodi ignorisanje postojanja gornje granice napona uzemljivača. Navodimo jedan mogući primer.

Nakon izgradnje jedne tipske montažne betonske TS (MBTS) 20/0,4 kV/kV, 2x630 kVA, merenjem je utvrđeno da otpornost njenog združenog uzemljenja iznosi 3,5  $\Omega$ . Ova MBTS napaja se iz 20 kV kablovske mreže izvedene kablovima 3xXHE 49A, 150 mm<sup>2</sup>, 12/20 kV čiji je redukcionni faktor 0,544, a impedansa sistema od tri električne zaštite 0,376 + j 0,468  $\Omega$ /km. Mreža radi sa neutralom uzemljenom preko male otpornosti koja ograničava struju zemljospoja na 300 A. TS 20/0,4 kV/kV je četvrta po redu na kablovskom izvodu koji se štiti zemljospojnom zaštitom sa vremenskom podešenošću 0,5 s. Dužina napojnog kabla računata od izvorne TS 110/20 kV/kV iznosi 1 593 m.

Prema važećem Propisu [2] dozvoljeni napon dodira u ovoj TS 20/0,4 kV/kV iznosi 75/0,5=150 V, pa uz  $k_d = 2$  združeni utemljivač ove TS mora da ima otpornost koja zadovoljava uslov

$$R_{zdr} \leq \frac{2 \cdot 150}{0,544 \cdot 300} = 1,84 \Omega.$$

S obzirom da je merenjem dobijena veća vrednost u TS moraju da se izvedu dodatni radovi (pobi-

janje sonde, dodatno polaganje trake i sl.) kako bi se otpornost svela na propisanu vrednost.

Međutim, računom sprovedenim prema (19) sa modulom kompleksne impedanse električne zaštite i ostalim navedenim podacima dobija se da je

$$V_{GR} = 0,600 \cdot 1,593 \cdot 0,544 \cdot 300 = 156 \text{ V}$$

što znači da dozvoljeni napon uzemljivača za  $k_d = 2$  od 2x150 = 300 V na ovoj TS 20/0,4 kV/kV ne samo da ne može biti premašen, već ne može biti ni dostignut!

U cilju zaštite ljudi i imovine Propis [2], dakle, zahteva da se na uzemljivaču na kome se nikad ne može pojaviti potencijal veći od 156 V, izvedu dodatni radovi kojima će se obezbediti da napon na uzemljivaču  $U_u$  ne bude veći od 300 V!

Navedena ilustracija je potpuno izmišljena i autorima nije poznato da li se nešto slično zaista i dogodilo u praksi naših distributivnih organizacija, ali je nesporna činjenica da su sa trenutno važećim Propisom ovakvi apsurdni u našim mrežama mogući, a to je sasvim dovoljan razlog da se preduzmu mere koje bi tako nešto sprečile.

Kao što se vidi, osnovni uzrok zbog koga se sa formulom (3) može doći do rezultata koji dovode do besmislenih radnji, leži u tome što je Propis [2] prevideo činjenicu da u kablovskim SN mrežama najveći mogući potencijal uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV može biti ne samo veći, nego i manji od dozvoljenog napona uzemljivača.

Takva pojava je praktično nemoguća u nadzemnim SN mrežama na vodovima sa zaštitnim užadima, a u mrežama u kojima nadzemni vodovi nemaju zaštitno uže ona je i apsolutno nemoguća, pa zato i nema nikakvih teškoća sa primenom (3), što se potvrđuje brojnim numeričkim primerima, a što je i dokazano tokom višedecenijske distributivne prakse.

### 3.4 Granična udaljenost TS SN/0,4 kV/kV od izvorne TS VN/SN kV

Egzistencija graničnog potencijala uzemljivača nagoveštava da na radijalno napajanom SN kablovskomvodu može da postoji tačka koja deli vod na deo bliži izvornoj TS VN/SN kV/kV na kome je  $V_{GR}$  manje od datog dozvoljenog napona na uzemljivaču  $k_d U_{doz}$  i na deo dalji od izvorne TS VN/SN kV/kV kome je  $V_{GR} > k_d U_{doz}$ .

Dužina prvog od ova dva dela predstavlja graničnu udaljenost (u km) TS SN/0,4 kV/kV od izvorne TS VN/SN kV/kV. Na osnovu (19) i (21) granična udaljenost TS SN/0,4 kV/kV za datu dozvoljenu vrednost napona uzemljivača računa se prema

$$\ell_{GR} = \left| \frac{k_d U_{doz}}{r z_r I_k} \right| \quad (23)$$

gde je:

$U_{doz}$  (V) – dozvoljeni napon dodira;

$k_d$  – sačinilac jednak količniku napona uzemljivača TS i napona dodira;

$z_r = z_g$  (Ω/km) – podužna impedansa zaštitnog užeta ili sistema zaštitnih užadi, kada je vod nadzemni;

$z_r = z_{ez}$  (Ω/km) – podužna impedansa električne kablovske zaštite ili sistema električnih zaštita kada je vod kablovski i

$I_k$  (A) – ukupna struja zemljospoja.

U pogledu ostvarivanja potrebnih bezbednosnih uslova TS SN/0,4 kV/kV, čija je udaljenost od izvorne TS VN/SN kV/kV manja ili jednaka  $I_{GR}$ , mogu imati proizvoljno veliku otpornost uzemljivača. Otpornosti uzemljivača TS čija je udaljenost od napojne TS VN/SN kV/kV veća od  $I_{GR}$  dimenzionišu se prema kriterijumu  $U_u \leq k_d U_{doz}$ .

Kada je granična udaljenost  $I_{GR}$  za dato  $U_{doz}$  veća ili jednaka ukupnoj dužini kablovskog voda, tada otpornosti uzemljivača svih TS SN/0,4 kV/kV na izvodu, bez obzira na njihovu vrednost, zadovoljavaju uslove bezbednosti i ne treba ih proveravati.

#### 4. DIMENZIONISANJE UZEMLJIVAČA TS SN/0,4 kV/kV U UZEMLJENIM KABLOVSKIM SN MREŽAMA

##### 4.1. Formula za dimenzionisanje

Poređenje šema sa slike 1 i slike 3 dovodi do ključaka za koje se ispostavlja da imaju veoma korisne praktične posledice. Razmotrimo to detaljnije.

Prekid struje u delu lestvičaste mreže sa slike 1 desno od čvora  $K$  pri konstantnoj struji  $I_k$  i nepromenjenoj konfiguraciji mreže levo od  $K$  neminovno ima za posledicu povećanje struja  $I_u$  i  $I_{eK}$ . Dodatno uklanjanje otočnih admitansi  $Y_i$  levo od  $K$  koje usledi nakon ovog prekida uz i dalje nepromenjenu vrednost  $I_k$ , povećava impedansu mreže između  $K$  i  $P$ , time smanjuje struju  $I_{eK}$ , ali i dodatno povećava  $I_u$ .

Rezultat svega ovoga je da struja  $I_p$  sa slike 3 mora biti veća od struje  $I_u$  koja je postojala u izvornoj mreži sa slike 1 pre nego što su izvršene opisane promene. Kako je impedansa  $R_u$  tokom celog procesa ostala nepromenjena, sigurno je da mora biti

$$U_u^{(1)} < U_u^{(3)}. \quad (24)$$

Ova nejednakost odmah implicira zaključak:

Ako je za datu ukupnu struju zemljospoja  $I_k$  i dati dozvoljeni napon  $k_d U_{doz}$  ispunjen uslov

$$U_u^{(3)} \leq k_d U_{doz}. \quad (25)$$

tada sigurno mora biti ispunjeno i

$$U_u^{(1)} < U_u^{(3)} \leq k_d U_{doz}. \quad (26)$$

Izraz (21) može se prema (19) napisati i u obliku

$$U_u^{(3)} = \frac{R_u}{Z_{ez} + R_u + R_{uiz}} V_{GR}, \quad (27)$$

pa se posle smene (27) u (26) i rešavanja po  $R_u$  dobija kriterijum za dimenzionisanje uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV koje rade u uzemljenim kablovskim mrežama:

$$R_u \leq \left| \frac{k_d U_{doz}}{V_{GR} - k_d U_{doz}} (Z_{ez} + R_{uiz}) \right|. \quad (28)$$

Ovde je:

$R_u$  (Ω) – otpornost rasprostiranja uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV;

$U_{doz}$  (V) – dozvoljeni napon dodira;

$k_d$  – sačinilac jednak količniku napona uzemljivača TS i napona dodira;

$V_{GR} = r I_k Z_{ez}$  (V) – granični potencijal uzemljivača;

$r$  – redukcioni faktor napojnog voda;

$I_k$  (A) – ukupna struja zemljospoja;

$Z_{ez}$  (Ω) – impedansa električne zaštite trožilnog kabla, ili impedansa sistema od tri električne zaštite tri jednožilna kabla, računata od izvorne TS VN/SN kV/kV do TS SN/0,4 kV/kV i

$R_{uiz}$  (Ω) – impedansa rasprostiranja uzemljivača izvorne TS VN/SN kV/kV.

S obzirom da kod kablovskih mreža granični potencijal  $V_{GR}$  može da bude manji od dozvoljenog napona na uzemljivaču TS, formula (28) upotrebljava se na sledeći način:

- ako je  $|V_{GR}| \leq k_d U_{doz}$ ,  $R_u$  može da ima proizvoljnu otpornost u opsegu  $0 < R_u < \infty$
- ako je  $|V_{GR}| > k_d U_{doz}$ , najveća vrednost  $R_u$  određena je sa (28).

Treba napomenuti da se iz formule (10), koja je

izvedena iz (4), posle smene  $Z_{nv}^{(w)} = Z_{ez}$  i  $\sum_i \frac{1}{Z_i^{(u)}} = 0$

rešavanjem po  $R_u$  dobija izraz

$$R_u \leq \left| \frac{k_d U_{doz}}{r I_k Z_{ez} - k_d U_{doz}} Z_{ez} \right|$$

koji je potpuno istovetan sa (28) za slučaj kada je  $R_{uiz} \ll Z_{ez}$  i kada na napojnom vodu ne postoji nijedna otočna admitansa, a u TS SN/0,4 kV/kV osim napojnog ne postoje drugi sredjenaponski vodovi čija impedansa uzemljenja ima konačnu vrednost.

Činjenica da ovaj poslednji izraz predstavlja samo specijalan slučaj opšte formule (28) ujedno je i potvrda ispravnosti izloženog pristupa kojim je utvrđen kriteri-

jum za dimenzionisanje uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV koji se izražava preko pomenute formule.

#### 4.2. Procena rezerve koja se postiže sa (28)

Ono što pre svega treba imati u vidu jeste da formula (28) daje tačnu vrednost najveće dozvoljene otpornosti TS samo u slučaju kada kablovski vod napaja jednu TS na svom kraju. Čim broj TS na izvodu postane veći od jedne, formula daje otpornosti koje su manje od potrebnih za datu vrednost dozvoljenog napona na uzemljivaču, što znači da i ona obezbeđuje izvesnu rezervu. Kolika će ta rezerva biti zavisi od broja TS na izvodu, zatim od otpornosti uzemljivača ostalih TS, kao i od dužine njihovih međusobnih rastojanja i najzad od udaljenosti TS od izvorne TS VN/SN kV/kV.

U [6] su Monte Carlo metodom vršena ispitivanja mogućih napona na uzemljivačima na modelima kablovskih izvoda, koji su dobijeni simulacijom dužina kablovskih deonica i otpornosti uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV.

Rezultati ispitivanja potvrdili su da se bez rešavanja lestvičaste mreže koju čine električne zaštite napojnog kabla i uzemljivači TS SN/0,4 kV/kV koje on napaja, ne može predvideti ni tačan redni broj TS SN/0,4 kV/kV u kojoj se za vreme zemljospoja pojavljuje najveći napon uzemljivača na izvodu, niti tačna vrednost tog najvećeg napona.

Međutim, isti rezultati su pokazali i da je sa tačnošću od preko 99,5 % moguće i bez rešavanja kompletne mreže proceniti najveći napon na uzemljivaču TS na kablovskom izvodu sa više TS. Prema [6] ta procena se vrši preko maksimalne vrednosti faktora razlaganja  $r_D$  na izvodu koja se dobija pomoću aritmetičke sredine  $l$  (u km) dužina svih kablovskih deonica na izvodu i aritmetičke sredine  $R_u$  (u  $\Omega$ ) otpornosti uzemljivača svih TS. Ove veličine određuju bezdimenzionalni parametar  $\alpha$  ekvivalentne lestvičaste mreže

$$\alpha = \frac{z_{ez} \bar{\ell}}{R_u}, \quad (29)$$

pri čemu je kao i ranije

$z_{ez}$  ( $\Omega/\text{km}$ ) – podužna impedansa električne zaštite trožilnog kabla ili sistema od tri električne zaštite tri jednožilna kabla.

Ako je  $n$  ukupan broj TS SN/0,4 kV/kV na izvodu tada se najveći napon na uzemljivaču TS za vreme zemljospoja  $U_{u\max}$  (u V) prema [6] procenjuje pomoću izraza

$$U_{u\max} = \left| \frac{\lambda_1^n - \lambda_2^n}{\lambda_1^n + \lambda_2^{n+1}} (1 - \lambda_2) r R_{u\max} I_k \right| \quad (30)$$

u kome su  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  koreni karakteristične jednačine lestvičaste mreže sa slike 1.

$$\lambda^2 - (2 + \alpha)\lambda + 1 = 0, \quad (31)$$

koji se sračunavaju prema:

$$\lambda_1 = 0,5 \left( 2 + \alpha + \sqrt{4\alpha + \alpha^2} \right), \quad \lambda_2 = \frac{1}{\lambda_1} \quad (32)$$

i gde je osim toga:

$R_{u\max}$  ( $\Omega$ ) – najveća otpornost uzemljivača TS na izvodu i

$r$  – redukциони faktor kablovskog voda.

Ako se  $R_{u\max}$  ne razlikuje mnogo od srednje vrednosti otpornosti uzemljivača  $R_u$  svih  $n$  TS na izvodu, tada se odnos napona uzemljivača  $U_u^{(3)}$  dobijenog iz (27) prema najvećem naponu uzemljivača  $U_{u\max}$  dobijenog iz (30) može proceniti pomoću izraza

$$\frac{U_u^{(3)}}{U_{u\max}} = \left| \frac{\lambda_1^n + \lambda_2^{n+1}}{\lambda_1^n - \lambda_2^n} \cdot \frac{n\alpha}{(1 + n\alpha)(1 - \lambda_2)} \right| \quad (33)$$

S obzirom da je formula za dimenzionisanje uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV (28) izvedena iz (27) odnos  $U_u^{(3)}/U_{u\max}$  ujedno pokazuje koliku rezervu u vrednosti dozvoljene otpornosti ona obezbeđuje. U tabeli 2. prikazane su vrednosti ovog odnosa za različit broj TS na izvodu uz pretpostavku da sve TS imaju približno iste vrednosti  $R_u$  otpornosti uzemljivača. Vrednosti iz tabele 2. sračunate su za kablovski vod izveden kablovima 3xXHE 49A, 150 mm<sup>2</sup>, 12/20 kV/kV. Pretpostavljeno je da sve deonice na izvodu imaju istu dužinu jednaku 400 m.

Tabela 2.

Odnos  $U_u^{(3)}/U_{u\max}$  u funkciji broja TS SN/0,4 kV/kV na izvodu  $n$

| n  | $R_u$ ( $\Omega$ ) |      |      |      |
|----|--------------------|------|------|------|
|    | 0,5                | 1,0  | 4,0  | 5,0  |
| 1  | 1,00               | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2  | 1,11               | 1,07 | 1,02 | 1,02 |
| 3  | 1,27               | 1,21 | 1,07 | 1,05 |
| 4  | 1,41               | 1,37 | 1,14 | 1,11 |
| 5  | 1,51               | 1,52 | 1,23 | 1,19 |
| 6  | 1,58               | 1,65 | 1,35 | 1,29 |
| 7  | 1,63               | 1,75 | 1,47 | 1,40 |
| 8  | 1,67               | 1,83 | 1,60 | 1,52 |
| 9  | 1,70               | 1,90 | 1,73 | 1,64 |
| 10 | 1,72               | 1,95 | 1,86 | 1,77 |

Iz tabele 2. se vidi da (28) ostavlja utoliko veću rezervu, ukoliko je broj TS SN/0,4 kV/kV na izvodu veći i da se ta rezerva kreće u opsegu od nekoliko procenata, pa sve do celih 100 %.

Da bi se ove rezerve uporedile sa rezervama koje ostavlja formula (3) u tabelama 3. i 4. uporedno su prikazane najveće dozvoljene otpornosti združenog uzemljenja  $R_{zdr}$ . TS 20/0,4 kV/kV sračunate pomoću (28) i iste otpornosti sračunate pomoću važeće formule (3a).

Iz rezultata prikazanih u tabeli 4. vidi se da, što se tiče bezopasnosti, u našim gradskim čisto kablovskim SN mrežama nema nikakvih problema ni sa ograničenom strujom zemljospoja reda 1 000 A kada su vremena isključenja kvara reda 0,5 s i 0,2 s.

Rezultati takođe veoma uverljivo pokazuju koliko su velike rezerve koje se zahtevaju važećim propisima. Dok kod formule (28) one dosežu do 100 %, kod (3) one prelaze i par stotina procenata.

Pored ove dve otpornosti u tabelama sračunate su i vrednosti graničnog potencijala uzemljivača  $V_{GR}$ , kao i granične udaljenosti  $I_{GR}$  do izvorne TS 110/20 kV/kV za 10 TS 20/0,4 kV/kV na izvodu. Napojni vod je trofazni kabl 3xXHE 49A, 150 mm<sup>2</sup>, 12/20 kV/kV. Dužine pojedinih kablovskih deonica date su u drugoj koloni, a udaljenosti TS 20/0,4 kV/kV od napojne TS 110/20 kV/kV date su u trećoj koloni. Proračun je sproveden sa redukcionim faktorom trofaznog kablovskog voda  $r = 0,341 - j0,424$ , čiji je modul  $|r| = 0,544$ , podužnom impedansom jedne električne zaštite  $z_{se} + 2z_{mee} = 1,129 + j 1,405 \Omega/\text{km}$  i sa faktorom  $k_d = 2$ .

Tabela 3.

Vrednost otpornosti uzemljivača TS 20/0,4 kV/kV sračunate prema (28) i (3a) za ograničenu struju zemljospoja  $I_k = 300 \text{ A}$

| Redni broj TS | Deonica (m) | Udaljenost od napojne TS (km) | $U_{doz} = 150 \text{ V}, I_k = 300 \text{ A}$ |          |           |              | $U_{doz} = 300 \text{ V}, I_k = 300 \text{ A}$ |          |           |              |
|---------------|-------------|-------------------------------|--|----------|-----------|--------------|--|----------|-----------|--------------|
|               |             |                               | $V_{GR}$                                       | $I_{GR}$ | $R_{zdr}$ | $R_{zdr}^*)$ | $V_{GR}$                                       | $I_{GR}$ | $R_{zdr}$ | $R_{zdr}^*)$ |
| 1             | 731         | 0,731                         | 72   | 3,06     | < ∞       | 1,84         | 72   | 6,12     | < ∞       | 3,68         |
| 2             | 196         | 0,927                         | 91   |          | < ∞       |              | 91   |          | < ∞       |              |
| 3             | 186         | 1,113                         | 109  |          | < ∞       |              | 109  |          | < ∞       |              |
| 4             | 480         | 1,593                         | 156  |          | < ∞       |              | 156  |          | < ∞       |              |
| 5             | 103         | 1,696                         | 166  |          | < ∞       |              | 166  |          | < ∞       |              |
| 6             | 101         | 1,797                         | 176  |          | < ∞       |              | 176  |          | < ∞       |              |
| 7             | 250         | 2,047                         | 201  |          | < ∞       |              | 201  |          | < ∞       |              |
| 8             | 291         | 2,338                         | 229  |          | < ∞       |              | 229  |          | < ∞       |              |
| 9             | 144         | 2,482                         | 243  |          | < ∞       |              | 243  |          | < ∞       |              |
| 10            | 209         | 2,691                         | 264  |          | < ∞       |              | 264  |          | < ∞       |              |

\*) Vrednost prema formuli (3a).

Tabela 4.

Vrednost otpornosti uzemljivača TS 20/0,4 kV/kV sračunate prema (28) i (3a) za ograničenu struju zemljospoja  $I_k = 1 000 \text{ A}$

| Redni broj TS | Deonica (m) | Udaljenost od napojne TS (km) | $U_{doz} = 150 \text{ V}, I_k = 1 000 \text{ A}$ |          |           |              | $U_{doz} = 300 \text{ V}, I_k = 1 000 \text{ A}$ |          |           |              |
|---------------|-------------|-------------------------------|--|----------|-----------|--------------|--|----------|-----------|--------------|
|               |             |                               | $V_{GR}$   | $I_{GR}$ | $R_{zdr}$ | $R_{zdr}^*)$ | $V_{GR}$   | $I_{GR}$ | $R_{zdr}$ | $R_{zdr}^*)$ |
| 1             | 731         | 0,731                         | 227  | 0,97     | < ∞       | 0,55         | 227  | 1,93     | < ∞       | 1,10         |
| 2             | 196         | 0,927                         | 288  |          | 61,59     |              | 288  |          | < ∞       |              |
| 3             | 186         | 1,113                         | 346  |          | 3,46      |              | 346  |          | < ∞       |              |
| 4             | 480         | 1,593                         | 495  |          | 1,39      |              | 495  |          | < ∞       |              |
| 5             | 103         | 1,696                         | 527  |          | 1,28      |              | 527  |          | < ∞       |              |
| 6             | 101         | 1,797                         | 558  |          | 1,19      |              | 558  |          | < ∞       |              |
| 7             | 250         | 2,047                         | 636  |          | 1,05      |              | 636  |          | 11,23     |              |
| 8             | 291         | 2,338                         | 726  |          | 0,95      |              | 726  |          | 5,37      |              |
| 9             | 144         | 2,482                         | 771  |          | 0,91      |              | 771  |          | 4,42      |              |
| 10            | 209         | 2,691                         | 836  |          | 0,87      |              | 836  |          | 3,61      |              |

\*) Vrednost prema formuli (3a).

### 4.3. Još o primeni formule (28)

U vezi sa primenom formule (28) postavlja se pitanje dimenzionisanja uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV koje se za vreme havarijskih režima rada distributivne mreže mogu privremeno (više sati, pa i dana) napajati iz susednih izvornih TS VN/SN kV/kV.

Naime, one TS SN/0,4 kV/kV koje su u redovnom pogonu najbliže izvornoj TS VN/SN kV/kV prema (28) mogu bezbedno raditi i sa visokim vrednostima otpornosti uzemljivača, ali zato za vreme havarijskog napajanja one umesto rednog broja 1, 2 ili 3 mogu postati TS sa rednim brojevima 15, 16 ili 17, tj. mogu se naći blizu kraja privremeno formiranog izvoda. Najsigurnije je uzemljivače ovakvih TS dimenzionisati prema mogućem napajanju iz one izvorne TS VN/SN kV/kV koja je najviše udaljena.

Međutim, u ovom kontekstu pre svega ne treba zaboraviti da i kod TS SN/0,4 kV/kV koje prema (28) mogu imati proizvoljnu otpornost uzemljivača, ta otpornost za  $I_k = 300$  A ne može biti veća od  $4 \Omega$  kada su radno i zaštitno uzemljenje razdvojeni, odnosno  $5 \Omega$  kada su uzemljenja združena [2]. Prema tome ni prva TS na izvodu ne može imati otpornost uzemljenja iznad ovih vrednosti.

Ako se pretpostavi da TS koja je u redovnom napajanju prva na izvodu, postane, na primer, dvadeseta za vreme izuzetnog režima rada mreže i ako je pri tom prosečno međusobno rastojanje između TS SN/0,4 kV/kV 400 m, a napojni kablovi su XHE,  $150 \text{ mm}^2$ , 12/20 kV tada formula (28) za TS na dvadesetom mestu zahteva  $R_u \leq 3,01 \Omega$ . Ali istovremeno se pomoću (33) dobija da formula (28) za  $n = 20$  ostavlja rezervu od 86 %, što znači da je za dvadeseto mesto dovoljna otpornost od  $3,01 \times 1,86 = 5,6 \Omega > 5 \Omega$ .

TS SN/0,4 kV/kV može da promeni redni broj i kada dođe do gradnje nove izvorne TS VN/SN kV/kV, no tada je nemoguće da će trafostanica sa rednim brojem 1 postati TS sa rednim brojem 10 ili sl. Mogući razvoj događaja u ovom slučaju je da će trafostanice sa malim rednim brojevima zadržati svoju dotadašnju poziciju, a da će trafostanice sa većim rednim brojevima promeniti redosled zbog toga što su postale bliže izvoru napajanja. Za razliku od situacije za vreme havarijskih režima ovde su dodatne intervencije na uzemljivačima praktično isključene.

## 5. PREDLOG NOVE FORMULACIJE

### ČLANA 57. VAŽEĆEG PRAVILNIKA [2]

S obzirom da se iz dosadašnjeg izlaganja nedvosmisleno može zaključiti da su izmene i dopune važećih propisa neophodne, u narednim redovima daje se predlog nove formulacije teksta člana 57.

Pravilnika o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadajućih transformatorskih stanica [2]:

Ako je neutralna tačka visokonaponske mreže na koju je priključena transformatorska stanica uzemljena preko male otpornosti, u transformatorskoj stanici se, po pravilu, izvodi združeno uzemljenje.

Ukupna otpornost združenog uzemljenja ( $R_{zdr}$ ), uključujući i uticaj kablova kao uzemljivača, kao i uticaj uzemljivača susednih transformatorskih stanica i objekata (zgrada) koji su vezani za neutralni provodnik niskonaponske mreže, mora da iznosi

$$R_{zdr} \leq \frac{k_d U_{doz}}{r I_k}$$

kada je transformatorska stanica priključena na nadzemnu visokonaponsku mrežu direktno ili preko visokonaponskog kabla koji nije duži od 100 m, odnosno mora da iznosi

$$R_{zdr} \leq \frac{k_d U_{doz}}{Z_{ez} r I_k - k_d U_{doz}} Z_{ez}$$

kada je transformatorska stanica direktno priključena na kablovsku visokonaponsku mrežu, i kada je modul proizvoda  $Z_{ez} r I_k$  veći od  $k_d U_{doz}$ , odnosno, mora da bude u skladu sa ostalim odredbama ovog Pravilnika kada je modul proizvoda  $Z_{ez} r I_k$  manji ili jednak  $k_d U_{doz}$ .

U navedenim izrazima je:

$U_{doz}$  – dozvoljeni napon dodira, u V;

$r$  – redukcioni faktor visokonaponskog voda koji napaja transformatorsku stanicu;

$I_k$  – ukupna struja zemljospoja, u A;

$k_d$  – sačinilac koji određuje odnos napona uzemljenja transformatorske stanice i napona dodira na mestu dodira, i ima vrednost:  $k_d = 2$  i

$Z_{ez}$  – impedansa električne zaštite, ili sistema električnih zaštita visokonaponskog kabla računata od njegovog početka u izvornoj transformatorskoj stanici do transformatorske stanice u kojoj se dimenzioniše združeno uzemljenje, u  $\Omega$ .

Ako postoji više alternativnih pravaca napajanja transformatorske stanice impedansa  $Z_{ez}$  računa se do one izvorne transformatorske stanice koja je najviše udaljena od transformatorske stanice u kojoj se dimenzioniše združeno uzemljenje.

Impedansa  $R_{uiz}$  iz (28), koja je po pravilu znatno manja od  $Z_{ez}$ , izostavljena je u formuli iz gornjeg predloga radi sigurnosti i zbog toga što njena vrednost nije uvek dostupna u trenutku sračunavanja  $R_{zdr}$ . Formula u predlogu je, prema tome, istovetna sa formulom izvedenom iz izraza (4) datog u [5].

Za dimenzionisanje uzemljivača kablovskih TS SN/0,4 kV/kV prema formuli datoj u predloženoj formulaciji potrebno je poznavanje impedansi i re-



dukcionih faktora napojnih kablova. Radi orijentacije u tabelama 5. i 6. date su vrednosti ovih veličina za trofazne kablovske vodove koji se danas primenjuju u našim gradskim distributivnim mrežama.









Tabela 5.

Impedanse plašta i redukcionni faktori trožilnog NPO kabla za  $\rho = 100 \Omega\text{m}$

| Tip kabla   | l (km) | Impedansa plašta ( $\Omega$ ) | r<br>$I_k = 300 \text{ A}$<br>(1 000 A) |
|---|--------|-------------------------------|---|
| NPO 13-A<br>3x150 mm <sup>2</sup><br>3x240 mm <sup>2</sup><br>6/10 kV | 0,2    | 0,42 $e^{j33,3^\circ}$        | 0,16 - 0,20<br>i<br>(0,27 - 0,50)       |
|   | 0,4    | 0,66 $e^{j47,6^\circ}$        |   |
|   | 0,6    | 0,75 $e^{j40,^\circ}$         |   |
|   | 0,8    | 0,77 $e^{j36,7^\circ}$        |   |
|   | 1,0    | 0,77 $e^{j3,4^\circ}$         |   |

Tabela 6.

Impedanse električnih zaštita i redukcionni faktori trofaznih vodova izvedenih kablovima XHE za  $\rho = 100 \Omega\text{m}$

| $U_n$ (kV) | $S_n$ (mm <sup>2</sup> ) | Dispozicija žila u rovu   | Impedansa električne zaštite ( $\Omega/\text{km}$ ) | r                      |
|------------|--------------------------|---|---|------------------------|
| 6/10       | 150 Al                   |  | 0,71 $e^{j65,9^\circ}$                              | 0,34 $e^{j65,9^\circ}$ |
|            |                          |  | 0,72 $e^{j66,2^\circ}$                              | 0,34 $e^{j66,2^\circ}$ |
|            | 240 Al                   |  | 0,71 $e^{j65,6^\circ}$                              | 0,34 $e^{j65,6^\circ}$ |
|            |                          |  | 0,72 $e^{j66,0^\circ}$                              | 0,34 $e^{j66,0^\circ}$ |
| 12/20      | 120 Al                   |  | 0,78 $e^{j56,4^\circ}$                              | 0,49 $e^{j56,4^\circ}$ |
|            |                          |  | 0,78 $e^{j56,8^\circ}$                              | 0,49 $e^{j56,8^\circ}$ |
|            | 150 Al                   |  | 0,71 $e^{j65,6^\circ}$                              | 0,34 $e^{j65,6^\circ}$ |
|            |                          |  | 0,71 $e^{j65,9^\circ}$                              | 0,34 $e^{j65,9^\circ}$ |

Vrednosti date u tabeli 5. sračunate su za specifičnu otpornost tla  $\rho = 100 \Omega\text{m}$  prema [5] i [8] uz korišćenje podataka iz [9]. S obzirom da kablovi NPO i slični ovom tipu imaju provodni spoljnji omotač, impedanse njihovih plašteva nisu linearne funkcije dužine, pa su njihove vrednosti date u  $\Omega$  za pet karakterističnih dužina. Kako njihov spoljnji omotač sadrži i čeličnu komponentu, redukcionni faktor dat je preko dva opsega, od kojih prvi odgovara strujama zemljospoja reda 300 A, a drugi (u zagradi) strujama zemljospoja reda 1 000 A [5].

Podaci iz [9] takođe su korišćeni i pri izradi tabele 6. Impedanse date u ovoj poslednjoj tabeli dobijene su matricnom metodom pomoću postupka

primenjenog u [11] koji se zasniva na Carsonovim jednačinama sa modifikacijama koje su izvršili Clarke i Calabrese [10]. Impedanse su računane sa specifičnom otpornošću tla jednakom  $\rho = 100 \Omega\text{m}$

Kablovi XHE i slični ovom tipu imaju izolovani spoljnji omotač i konstruisani su bez feromagnet-skih materijala, pa se impedanse njihovih električnih zaštita linearno menjaju sa dužinom, a redukcionni faktor im ne zavisi od magnitude struje zemljospoja. Zbog toga su u tabeli 6. impedanse date u  $\Omega/\text{km}$ .

## 6. ZAKLJUČAK

– Izračunavanje dela struje zemljospoja kroz uzemljivač TS SN/0,4 kV/kV koje rade u uzemljenim kablovskim mrežama pomoću redukcionnog faktora napojnog kabla bez uzimanja u obzir otpornosti preko kojih su uzemljeni krajevi njegove električne zaštite, dovodi do rezervi na strani sigurnosti pri dimenzionsanju uzemljivača.

– Ignorisanje činjenice da kod TS SN/0,4 kV/kV koje rade u uzemljenim kablovskim mrežama napon na uzemljivaču za vreme zemljospoja ima gornju granicu koja može biti manja od propisima dozvoljenog napona, dodatno povećava rezerve na strani sigurnosti pri dimenzionsanju uzemljivača.

– Zbog mogućih velikih rezervi na strani sigurnosti koje se uopšte ne mogu pravdati bezbednosnim razlozima, neophodno je modifikovati odredbe Propisa [2] koje se odnose na dimenzionisanje uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV koje rade u uzemljenim kablovskim mrežama. Pošto broj ovih objekata koji se u Republici Srbiji svake godine izgradi i priključi na distributivnu SN mrežu iznosi nekoliko stotina time bi se bez svake sumnje uštedela značajna sredstva.

– Predlog formule za dimenzionisanje uzemljivača TS SN/0,4 kV/kV u uzemljenoj kablovskoj SN mreži koja je data u ovom radu, značajno smanjuje troškove izgradnje TS SN/0,4 kV/kV u odnosu na formulu iz važećih propisa [2]. Međutim, i sa ovom formulom dobijaju se velike rezerve, jer ona ne uvažava povoljne efekte koje pri dimenzionisanju uzemljivača imaju uzemljenja ostalih TS SN/0,4 kV/kV kada ih na izvodu ima više od jedne. Treba svakako očekivati da će naredna istraživanja koja će tek uslediti još više unaprediti zakonsku regulativu u ovoj oblasti.

## 7. LITERATURA

- [1] STATISTIČKI PODACI O ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI ELEKTRODISTRIBUCIJE SRBIJE, Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd, 2000-2005.

- [2] PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATIVIMA ZA ZAŠTITU NISKONAPONSKIH MREŽA I PRIPADAJUĆIH TRANSFORMATORSKIH STANICA, Sl. list SFRJ br. 13/1978, sa izmenama i dopunama u Sl. listu SRJ br. 37/1995.
- [3] ZBIRKA TEHNIČKIH PREPORUKA ED SRBIJE, Tehnički savet EPS-a – Direkcija za distribuciju, Beograd, septembar 2001.
- [4] Heinhold, L: POWER CABLES AND THEIR APPLICATION, SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT, Berlin, Muenchen, 1970.
- [5] Nahman, J: UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA, Naučna knjiga, Beograd, 1980. g.
- [6] Balkovoj, V: PRILOG ANALIZI STRUJA MERO-DAVNIH ZA DIMENZIONISANJE UZEMLJENJA TS 20/0,4 kV/kV U KABLOVSKIM MREŽAMA IZVEDENIM PE KABLOVIMA, Elektropri- vreda, br. 2, 1999.
- [7] PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATIVIMA ZA UZEMLJENJA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA NAZIVNOG NAPONA IZNAD 1 000 V, Sl. list SRJ br. 61/199.
- [8] Nahman, J, Mijailović, V: RAZVODNA POSTROJENJA, AKADEMSKA MISAO, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2005. g.
- [9] Lalević, B: KABLOVI ELEKTROENERGETSKI (priručnik), izdanje autora, Beograd, 1977. g.
- [10] Transmission Line Reference Book, (Second Edition), Electric Power Research Institute, Palo Alto, Ca., 1982. (pp. 133-134).
- [11] Balkovoj, V: STRUJE U ELEKTRIČNIM ZAŠTITAMA ZA VREME REDOVNOG POGONA TROFAZNIH 20 KV KABLOVSKIH VODOVA IZVEDENIH JEDNOŽILNIM KABLOVIMA SA PE IZOLACIJOM – PRORAČUN I MERENJA, Elektrodistribucija, god. 32 (2004), br. 1.

Rad je primljen u uredništvo 14. 09. 2007. godine



**Miladin R. Tanasković** je rođen 1956. godine u Beogradu. Diplomirao je 1981. godine, magistrirao 1993. godine i doktorirao 2003. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1988. godine je zaposlen u „Elektrodistribuciji Beograd”, gde je radio na projektovanju visokonaponskih transformatorskih stanica, u Sektoru za tehnički razvoj i istraživanje, kao tehnički direktor i trenutno kao Savetnik za odnose sa naučno-istraživačkim ustanovama. Posebne oblasti njegovog stručnog interesovanja su rešavanje problema teorije polja metodom konačnih elemenata, planiranje elektrodistributivnih mreža i nesimetrični kratki spojevi u elektrodistributivnoj mreži.



**Vladimir I. Balkovoj** je rođen 1934. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1960. godine. Od 1962. godine pa do kraja aktivne službe bio je zaposlen u Projektnom birou Elektrovojvodine u Novom Sadu, gde je radio na projektovanju srednjena- ponskih vodova i transformatorskih stanica. Uporedo sa operativnim projektantskim poslo- vima bavio se širom problematikom uzemljenja u distributivnim mrežama. Posebnu oblast njegovog stručnog interesovanja predstavljaju pojave vezane za tokove i raspodelu nultih struja pri zemljospoju u visokonaponskim mrežama i analitičke metode za procenu opasnosti i štetnih uticaja koji zbog ovih struja mogu nastati na elementima mreže i objektima u okruženju.

# Računarski algoritam za određivanje ekvipotencijalnih linija fizičkih polja u dvodimenzionalnom prostoru

Stručni rad  
UDK: 621.317.35

---

*Rezime:*

U ovom radu je predstavljen algoritam za izračunavanje koordinata tačaka istog potencijala. Ovaj algoritam se može jednostavno integrisati u bilo koji računarski program baziran na metodi konačnih elemenata. Povezivanjem tačaka jednakog potencijala dobijaju se ekvipotencijalne linije, tj. izoterme za temperaturna polja, linije jednakih potencijala u elektrostatici i linije jednakih magnetnih potencijala u magnetostatici. Razvijeni algoritam je primenjen na dvodimenzionalni problem razmene toplote na toplotno kritičnom mestu 110 kV-nog kablovskog voda instaliranog na području Beograda.

**Ključne reči:** energetski kablovi, izoterme, metoda konačnih elemenata, nelinearna tranzijentna analiza, razmena toplote, toplotno kritično mesto.

---

*Abstract:*

COMPUTER ALGORITHM FOR DETERMINING THE EQUIPOTENTIAL LINES OF PHYSICAL FIELDS IN TWODIMENSIONAL SPACES

An algorithm that calculates the coordinates of points with equal potential has been presented in this paper. This algorithm can be simply integrated into any computer program based on finite element method. By matching points of equal potentials we form field lines, that is, isotherms for temperature fields, equipotential lines in electrostatics and magnetic equipotential lines in magnetostatics. The developed algorithm is applied to a twodimensional problem of heat transfer around a hot spot of a 110 kV cable line installed in Belgrade.

**Key words:** finite element method, heat transfer, hot spot, isotherms, nonlinear transient analysis, power cables.

---

## 1. UVOD

Rezultate proračuna u numeričkom obliku vrlo je teško analizirati i primeniti. Često treba pregledati niz vrlo sličnih brojeva, a to je vrlo zamorno i odvrća korisnike od upotrebe pojedinih računarskih programa. Iz tog razloga je neophodno obezbediti programsko rešenje koje će omogućiti grafičku pre-

zentaciju rezultata proračuna. Ovaj problem se najčešće javlja kod dvodimenzionalnih fizičkih polja tretiranih nekom od numeričkih metoda kao što je metoda konačnih elemenata. U svim diskusijama topologije fizičkih polja linije konstantnog potencijala predstavljaju osnovni element [1–9].

Algoritam koji je predstavljen u ovom radu može se bez obzira na vrstu rešavanja problema jedno-

stavno isprogramirati i integrisati u sve programe bazirane na metodi konačnih elemenata. Osim za rešavanje dvodimenzionalnih problema temperaturnog polja, ovaj algoritam se može koristiti u elektrostatici, magnetostatici, tranzijentnoj elektromagnetici, itd. Algoritam se koristi za grafičko prikazivanje rezultata proračuna dobijenih samo za mreže konačnih elemenata koje su sastavljene od linearnih trougaonih i/ili četvorougaoonih elemenata.

Mreža konačnih elemenata za potrebe analize procesa razmene toplote na razmatranom toplotno kritičnom mestu generisana je pomoću izoparametarskih linearnih trougaonih elemenata [2,3]. Na svakom trougaonom elementu, rešenja su predstavljena polinomima sa nepoznatim koeficijentima koji predstavljaju temperature čvorova. Vrednosti nepoznatih u čvorovima „usklađene” su tako da daju „najbolju” moguću aproksimaciju stvarne raspodele temperature [10]. Ovo usklađivanje je postignuto Galerkin-ovom metodom koja je direktno primenjena na parcijalne diferencijalne jednačine [2]. Ovakva aproksimacija rezultirala je matričnom jednačinom čiji vektor rešenja sadrži koeficijente aproksimacionih polinoma. Izračunavanjem vrednosti ovih koeficijenata dobija se rešenje problema u svim čvorovima rešavanog domena [10].

Matrice i vektori toplotnih opterećenja elemenata izračunavaju se Gauss-Legendre-ovom numeričkom integracijom u ravni odgovarajućeg referentnog elementa. Pojednostosti o dobijanju jednačina elemenata nalaze se u referencama [1] i [2].

U ovom radu, predstavljeni algoritam je realizovan kao potprogram univerzalnog računarskog programa *UTAFE* koji rešava linearne i nelinearne dvodimenzionalne probleme razmene toplote kod čvrstih tela, kako stacionarne tako i tranzijentne. Pomoću ovog programa mogu se rešavati i osnosimetrični problemi koji spadaju u grupu trodimenzionalnih problema. Program *UTAFE* predstavlja sastavni deo doktorske disertacije autora Dardana Klimente. Takođe, planira se i izrada komercijalne *MATLAB* verzije ovog programa koja bi se za nekoliko godina mogla naći na tržištu softvera.

Linearni problemi, tj. sistemi linearnih algebarskih jednačina rešavaju se metodom Gauss-ove eliminacije, dok se nelinearni problemi, tj. sistemi nelinearnih algebarskih jednačina rešavaju osnovnom Njutn-Rafsonove metodom. U primeni osnovne Njutn-Rafsonove iterativne metode, Jacobian-ovu matricu sistema i vektor neuravnoteženosti toplotnih opterećenja u čvorovima sistema treba preračunavati u svakoj iteraciji. Rešenje će konvergirati kada se zadovolji zadati kriterijum konvergencije. Početna raspodela temperature izračunava se pomoću linearnog stacionarnog algoritma za srednje vrednosti ka-

rakteristika materijala. Ovako dobijena početna raspodela temperature obezbeđuje bržu konvergenciju osnovnog Njutn-Rafsonovog algoritma.

Snimanje geometrije posmatranog toplotno kritičnog mesta, devedesetih godina prošlog veka, obavio je stručni tim Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla” iz Beograda [11].

## 2. PRORAČUN IZOTERMIČKIH LINIJA

Proces razmene toplote u nekom dvodimenzionalnom sistemu podzemnih energetskih kablova može se opisati pomoću parcijalne diferencijalne jednačine provođenja toplote oblika

$$k(\theta) \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + Q(\theta, t) = \rho c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

gde je  $k(\theta)$  toplotna provodnost u funkciji od temperature u  $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ ,  $\theta$  temperatura u  $K$ ,  $t$  vreme u  $s$ ,  $Q(\theta, t)$  zapreminska snaga toplotnih izvora u funkciji od temperature i vremena u  $W \cdot m^{-3}$ ,  $\rho$  gustina materijala u  $kg \cdot m^{-3}$ , a  $c(\theta)$  specifična toplota u funkciji od temperature u  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Prema [22] za nelinearnu tranzijentnu analizu iz jednačine (1) se dobija

$$[C(\theta)]\{\dot{\theta}(t)\} + \left[ [K_c(\theta)] + [K_h(\theta, t)] + [K_r(\theta, t)] \right] \{\theta(t)\} = \{R_Q(\theta, t)\} + \{R_q(\theta, t)\} + \{R_h(\theta, t)\} + \{R_r(\theta, t)\} \quad (2)$$

gde su:  $[C]$  kapacitivna matrica elementa;  $[K_c]$ ,  $[K_h]$  i  $[K_r]$  matrice provodnosti elementa usled provođenja, konvekcije i zračenja, respektivno;  $\{R_Q\}$ ,  $\{R_q\}$ ,  $\{R_h\}$  i  $\{R_r\}$  vektori toplotnih opterećenja elementa usled unutrašnjeg generisanja toplote, količine toplotnog fluksa po jedinici površine, konvekcije i zračenja, respektivno;  $\{\theta\}$  i  $\{\dot{\theta}\}$  vektori nepoznatih čvornih promenljivih elementa i njihovih izvoda, respektivno [22].

Za dobijeno rešenje sistema nelinearnih algebarskih jednačina, koji je po obliku ekvivalentan jednačini jednog elementa (2), sada treba izračunati koordinate tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama.

Jednačine konačnih trougaonih elemenata pomoću kojih je izvršena aproksimacija parcijalne diferencijalne jednačine (1) preuzete su iz reference [2]. Postupak svodenja sistema nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednačina na sistem nelinearnih algebarskih jednačina detaljno je objašnjen u [22], dok se više informacija o karakteristikama materijala u razmatranom test primeru nalazi u [23].

Aproksimacija funkcije temperature  $\theta$  (ili potencijala polja uopšte) na referentnom elementu  $r$  je

$$\theta^r(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^{n_d} N_i(\xi, \eta) \cdot \theta_i^r(\xi_i, \eta_i) \quad (3)$$

gde je  $n_d$  ukupan broj čvorova referentnog elementa,  $N_i(\xi, \eta)$  interpolacione funkcije koje su jednake geometrijskim transformacionim funkcijama za izoparametarske elemente,  $\theta_i(\xi_i, \eta_i)$  nepoznate vrednosti funkcije temperature (potencijala polja) u čvorovima  $(\xi_i, \eta_i)$  referentnog elementa  $r$ , a  $\xi_i$  i  $\eta_i$  koordinate čvorova u bezdimenzionalnom  $\xi - \eta$  koordinatnom sistemu.

Ako se za linearne četvorougaoone/trougaoone elemente izabere da su interpolacioni čvorovi identični sa geometrijskim čvorovima onda je

$$\theta_i^r(\xi_i, \eta_i) = \theta_i^e(x_i, y_i) \quad (4)$$

gde su  $\theta_i^e(x_i, y_i)$  nepoznate vrednosti funkcije temperature u čvorovima  $(x_i, y_i)$  stvarnog elementa  $e$ .

Tako aproksimacija (3) dobija sledeći oblik

$$\theta^r(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^{n_d} N_i(\xi, \eta) \cdot \theta_i^e(x_i, y_i) \quad (5)$$

gde je sada  $n_d$  ukupan broj čvorova jednog (stvarnog ili referentnog) elementa.

Da bi se odredila raspodela nepoznate funkcije  $\theta$  po referentnom elementu potrebno je poznavati analitičke oblike interpolacionih funkcija  $N_i(\xi, \eta)$ . Interpolacione funkcije za slučaj preslikavanja referentnog četvorougaoanog elementa u stvarne četvorougaoone elemente su

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= N_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta) \\ N_2(\xi, \eta) &= N_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta) \\ N_3(\xi, \eta) &= N_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta) \\ N_4(\xi, \eta) &= N_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta) \end{aligned} \quad (6)$$

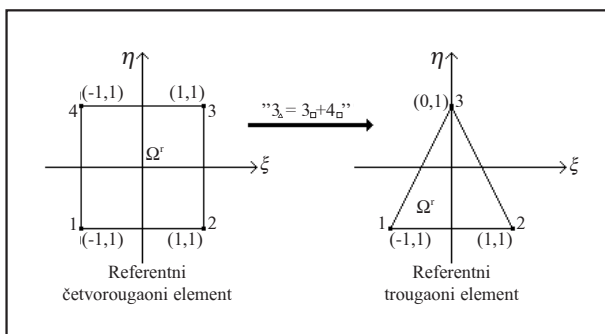
Da bi se dobila raspodela funkcije temperature  $\theta$  po svim čvorovima mreže konačnih elemenata, geometriju rešavanog domena treba izdeliti na (stvarne) linearne trougaone elemente, tako da njima odgovarajući referentni element u bezdimenzionalnom  $\xi - \eta$  koordinatnom sistemu može biti samo neki pravilni linearni trougao. Iz tog razloga se referentni linearni četvorougaoani element sa slike 1 treba transformisati u linearni trougaoni element. To se najjednostavnije postiže spajanjem geometrijskih čvorova  $(1,1)$  i  $(-1,1)$  u jedan geometrijski čvor  $(0,1)$  kao na slici 1.

Prema tome, interpolacione funkcije za slučaj preslikavanja referentnog trougaonog elementa u stvarne trougaone elemente postaju

$$N'_1(\xi, \eta) = N_1$$

$$N'_2(\xi, \eta) = N_2$$

$$N'_3(\xi, \eta) = N_3 + N_4 \quad (7)$$



Slika 1. Formiranje referentnog trougaonog iz referentnog četvorougaoanog elementa

Izotermička linija temperature  $\theta_0 = const$  zadaje se sa  $\theta = \theta_0$ , što na referentnom elementu predstavlja pravac

$$\theta^r(\xi, \eta) - \theta_0 = 0 \quad (8)$$

Za referentni četvorougaoani element jednačina (8) je

$$N_1 \cdot \theta_i^e + N_2 \cdot \theta_j^e + N_3 \cdot \theta_k^e + N_4 \cdot \theta_l^e - \theta_0 = 0 \quad (9)$$

dok je jednačina (8) za referentni trougaoni element oblika

$$N_1 \cdot \theta_i^e + N_2 \cdot \theta_j^e + (N_3 + N_4) \cdot \theta_k^e - \theta_0 = 0 \quad (10)$$

gde se donji indeksi  $i, j, k, l$  odnose na redne brojeve čvorova nekog stvarnog elementa.

Referentni četvorougaoani element definiše se pravama

$$\eta = -1, \quad \xi = 1, \quad \eta = 1, \quad \xi = -1; \quad (11)$$

a njegove granice su

$$\begin{aligned} (1-2) &\rightarrow \eta = -1, \quad -1 \leq \xi \leq 1 \\ (2-3) &\rightarrow \xi = 1, \quad -1 \leq \eta \leq 1 \\ (3-4) &\rightarrow \eta = 1, \quad 1 \leq \xi \leq 1 \\ (4-1) &\rightarrow \xi = -1, \quad 1 \geq \eta \geq 1 \end{aligned} \quad (12)$$

Referentni trougaoni element sa slike 1 formiran je isključivo za potrebe određivanja raspodele funkcije temperature  $\theta$  po čvorovima mreže sastavljene od linearnih trougaonih elemenata. Definiciji

ja referentnog trougaonog elementa, koja bi bila ekvivalentna definiciji (11) i (12), nije potrebna za određivanje izotermičkih linija samim tim što je referentni trougaoni element dobijen iz referentnog četvorougaonog elementa spajanjem geometrijskih čvorova (1,1) i (-1,1) prema slici 1. Ovo znači da se za mrežu sastavljenu od linearnih trougaonih elemenata ima ista vrednost funkcije temperature u geometrijskim čvorovima referentnog četvorougaonog elementa (1,1) i (-1,1). Prema tome, za neki stvarni trougaoni element određen čvorovima  $i, j$  i  $k$ , izotermička linija temperature  $\theta_0 = const$  (koja je na referentnom četvorougaonom elementu zadata pravcem  $\theta^e(\xi, \eta) - \theta_0$ ) može presecati samo sledeće tri granice

$$\begin{aligned} (1-2) &\rightarrow \eta = -1, -1 \leq \xi \leq 1; \\ (2-3) &\rightarrow \xi = 1, -1 \leq \eta \leq 1; \\ (4-1) &\rightarrow \xi = -1, 1 \geq \eta \geq -1; \end{aligned} \quad (13)$$

referentnog četvorougaonog elementa. Na osnovu toga može se smatrati da se granice stvarnog trougaonog elementa ( $i-j$ ), ( $j-k$ ) i ( $k-i$ ) respektivno preslikavaju u granice referentnog četvorougaonog elementa (1-2), (2-3) i (4-1), dok se čvor  $k$  stvarnog trougaonog elementa preko čvora 3 referentnog trougaonog elementa preslikava u granicu (3-4) referentnog četvorougaonog elementa. Ovakvo preslikavanje važi samo za izračunavanje izotermičkih linija!

Iz definicije referentnog četvorougaonog elementa (11), (12) i jednačine izotermičke linije na  $e$ -tom stvarnom četvorougaonom/trougaonom elementu (9)/(10) proizilaze uslovi za proračun izotermičkih linija:

**1.** Izotermička linija temperature  $\theta_0$  prolaziće kroz  $e$ -ti četvorougaoni element ako važi

$$\min \{ \theta_i^e, \theta_j^e, \theta_k^e, \theta_l^e \} \leq \theta_0 \leq \max \{ \theta_i^e, \theta_j^e, \theta_k^e, \theta_l^e \} \quad (14)$$

dok će ista prolaziti kroz  $e$ -ti trougaoni element ako važi

$$\min \{ \theta_i^e, \theta_j^e, \theta_k^e \} \leq \theta_0 \leq \max \{ \theta_i^e, \theta_j^e, \theta_k^e \} \quad (15)$$

**2.** Izotermička linija temperature presecaće granicu ( $i-j$ ) četvorougaonog ili trougaonog elementa u tački

$$\begin{bmatrix} x_{ij}^e & y_{ij}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\theta_0 - \theta_j^e}{\theta_i^e - \theta_j^e} & \frac{\theta_i^e - \theta_0}{\theta_i^e - \theta_j^e} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \\ x_l^e & y_l^e \end{bmatrix} \quad (16)$$

ili

$$\begin{bmatrix} x_{ij}^e & y_{ij}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\theta_0 - \theta_j^e}{\theta_i^e - \theta_j^e} & \frac{\theta_i^e - \theta_0}{\theta_i^e - \theta_j^e} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \end{bmatrix} \quad (17)$$

respektivno, ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova

$$\begin{aligned} (\theta_j^e > \theta_i^e \text{ i } \theta_i^e \leq \theta_0 \leq \theta_j^e) \\ (\theta_j^e < \theta_i^e \text{ i } \theta_i^e \geq \theta_0 \geq \theta_j^e) \end{aligned} \quad (18)$$

**3.** Granica ( $i-j$ ) je izotermička linija temperature  $\theta_0$  ako je  $\theta_i^e = \theta_j^e = \theta_0$ .

**4.** Izotermička linija temperature  $\theta_0$  presecaće granicu ( $j-k$ ) četvorougaonog ili trougaonog elementa u tački

$$\begin{bmatrix} x_{jk}^e & y_{jk}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\theta_0 - \theta_k^e}{\theta_j^e - \theta_k^e} & \frac{\theta_j^e - \theta_0}{\theta_j^e - \theta_k^e} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \\ x_l^e & y_l^e \end{bmatrix} \quad (19)$$

ili

$$\begin{bmatrix} x_{jk}^e & y_{jk}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\theta_0 - \theta_k^e}{\theta_j^e - \theta_k^e} & \frac{\theta_j^e - \theta_0}{\theta_j^e - \theta_k^e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \end{bmatrix} \quad (20)$$

respektivno, ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova

$$\begin{aligned} (\theta_k^e > \theta_j^e \text{ i } \theta_j^e \leq \theta_0 \leq \theta_k^e) \\ (\theta_k^e < \theta_j^e \text{ i } \theta_j^e \geq \theta_0 \geq \theta_k^e) \end{aligned} \quad (21)$$

**5.** Granica ( $j-k$ ) je izotermička linija temperature  $\theta_0$  ako je  $\theta_j^e = \theta_k^e = \theta_0$ .

**6.** Izotermička linija temperature  $\theta_0$  presecaće granicu ( $k-i$ ) trougaonog elementa u tački

$$\begin{bmatrix} x_{ki}^e & y_{ki}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\theta_0 - \theta_k^e}{\theta_i^e - \theta_k^e} & 0 & \frac{\theta_i^e - \theta_0}{\theta_i^e - \theta_k^e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \end{bmatrix} \quad (22)$$

respektivno, ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova

$$\begin{aligned} (\theta_i^e > \theta_k^e \text{ i } \theta_k^e \leq \theta_0 \leq \theta_i^e) \\ (\theta_i^e < \theta_k^e \text{ i } \theta_k^e \geq \theta_0 \geq \theta_i^e) \end{aligned} \quad (23)$$

**7.** Granica ( $k-i$ ) je izotermička linija temperature  $\theta_0$  ako je  $\theta_k^e = \theta_i^e = \theta_0$ .

**8.** Izotermička linija temperature  $\theta_0$  presecaće granicu ( $k-l$ ) četvorougaonog elementa u tački

$$\begin{bmatrix} x_{kl}^e & y_{kl}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\theta_0 - \theta_l^e}{\theta_k^e - \theta_l^e} & \frac{\theta_k^e - \theta_0}{\theta_k^e - \theta_l^e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \\ x_l^e & y_l^e \end{bmatrix} \quad (24)$$

respektivno, ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova

$$\begin{aligned} (\theta_l^e > \theta_k^e \text{ i } \theta_k^e \leq \theta_0 \leq \theta_l^e) \\ (\theta_l^e < \theta_k^e \text{ i } \theta_k^e \geq \theta_0 \geq \theta_l^e) \end{aligned} \quad (25)$$

9. Granica ( $k-l$ ) je izotermička linija temperature  $\theta_0$  ako je  $\theta_k^e = \theta_l^e = \theta_0$ .

10. Izotermička linija temperature  $\theta_0$  presecaće granicu ( $l-i$ ) četvorougaoonog elementa u tački

$$\begin{bmatrix} x_{li}^e & y_{li}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\theta_0 - \theta_l^e}{\theta_i^e - \theta_l^e} & 0 & 0 & \frac{\theta_i^e - \theta_0}{\theta_i^e - \theta_l^e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i^e & y_i^e \\ x_j^e & y_j^e \\ x_k^e & y_k^e \\ x_l^e & y_l^e \end{bmatrix} \quad (26)$$

respektivno, ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova

$$\begin{aligned} (\theta_l^e > \theta_i^e \text{ i } \theta_i^e \leq \theta_0 \leq \theta_l^e) \\ (\theta_l^e < \theta_i^e \text{ i } \theta_i^e \geq \theta_0 \geq \theta_l^e) \end{aligned} \quad (27)$$

11. Granica ( $l-i$ ) je izotermička linija temperature  $\theta_0$  ako je  $\theta_l^e = \theta_i^e = \theta_0$ .

### 3. DIJAGRAM TOKA ALGORITMA

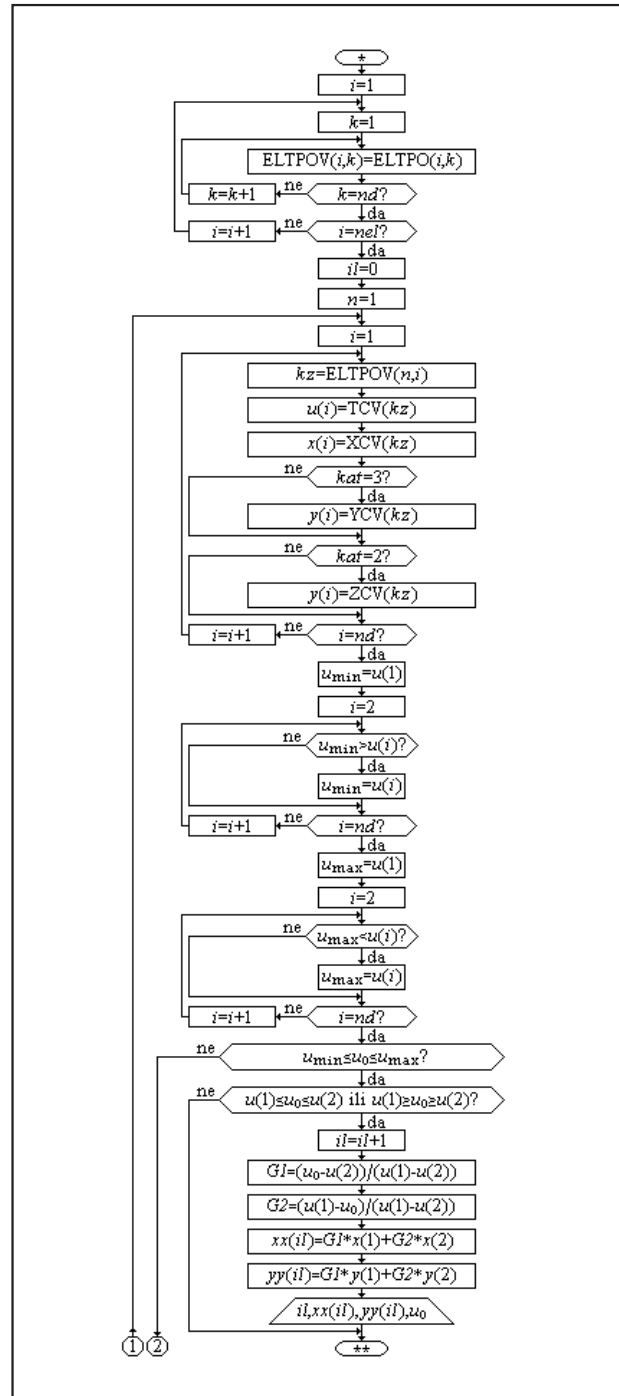
Dijagram toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama  $\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{03}, \dots$  prikazan je na slikama 2, 3, 4, 5 i 6, dok je njegova programska realizacija data u dodatku.

Sve programske promenljive koje se pojavljuju u predstavljenom algoritmu definisane su u zaglavlju potprograma *IZOTERMA* u dodatku ovog rada.

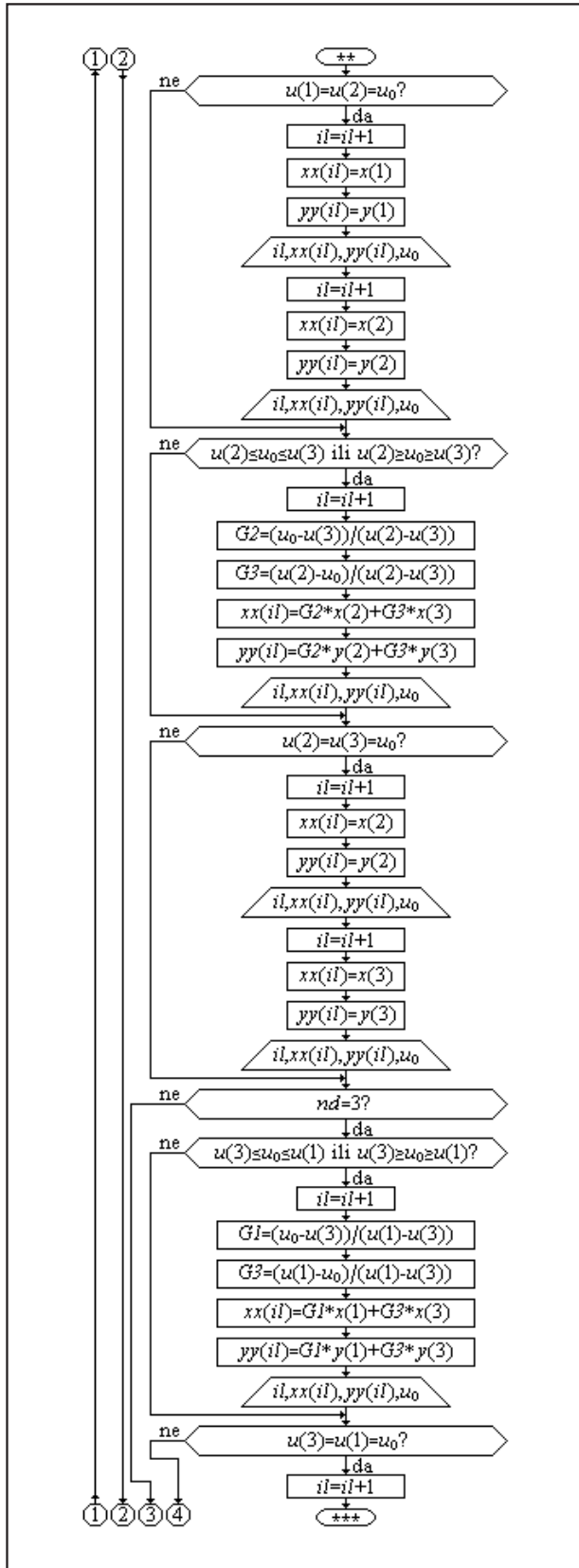
Kako je dijagram toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka koje pripadaju izotermi temperature  $\theta_0$ , realizovan u vidu potprograma, potrebno je definisati i način njegovog pozivanja od strane glavnog programa ili drugih potprograma. Potprogram *IZOTERMA* može se pozvati i upotrebiti za izračunavanje koordinata tačaka: (i) samo jedne karakteristične izoterme sa zadatom konstantnom temperaturom  $\theta_0$ , (ii) nekoliko karakterističnih izotermi

Slika 2. Prvi deo dijagrama toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama.

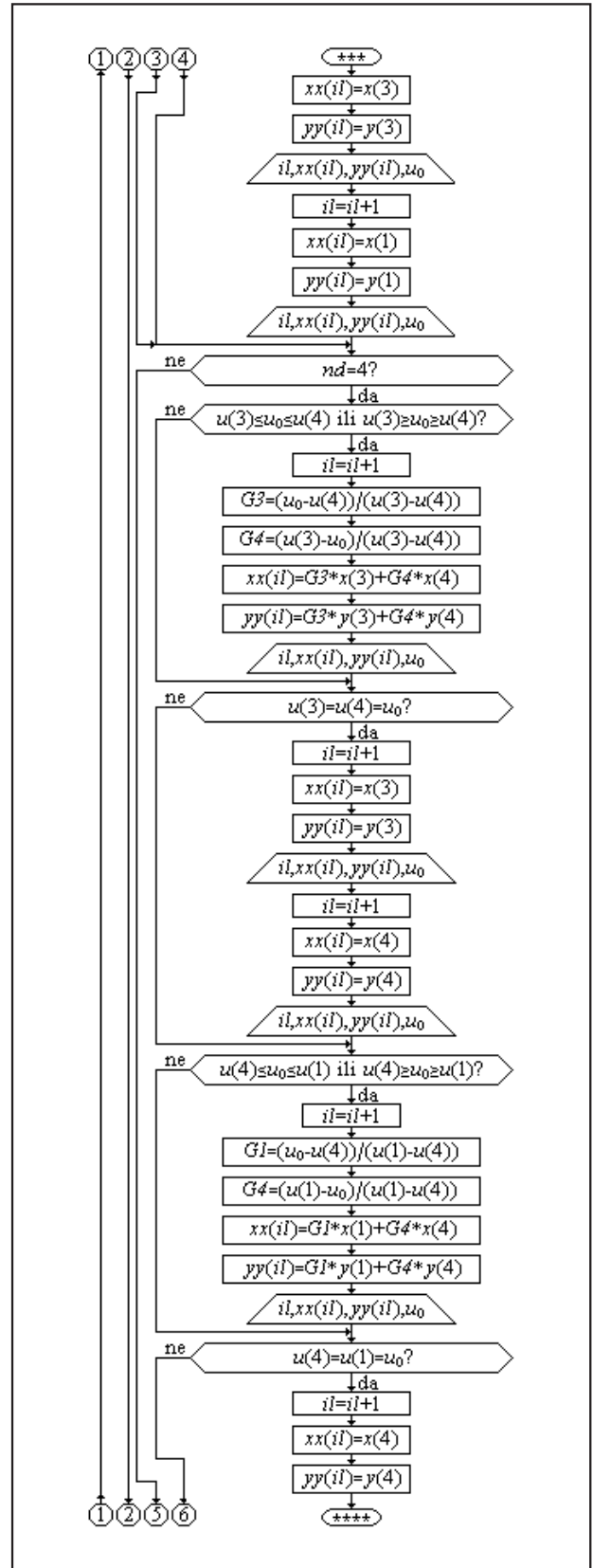
sa zadatim konstantnim temperaturama  $\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{03}, \dots$  ili (iii) većeg broja izotermi sa konstantnim temperaturama iz opsega od minimalne do maksimalne temperature ( $\theta_{\min} \div \theta_{\max}$ ) za neku već poznatu raspodelu temperature po čvorovima mreže (rezultat proračuna) koja se želi grafički prikazati.



Slika 3. Drugi deo dijagrama toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama.



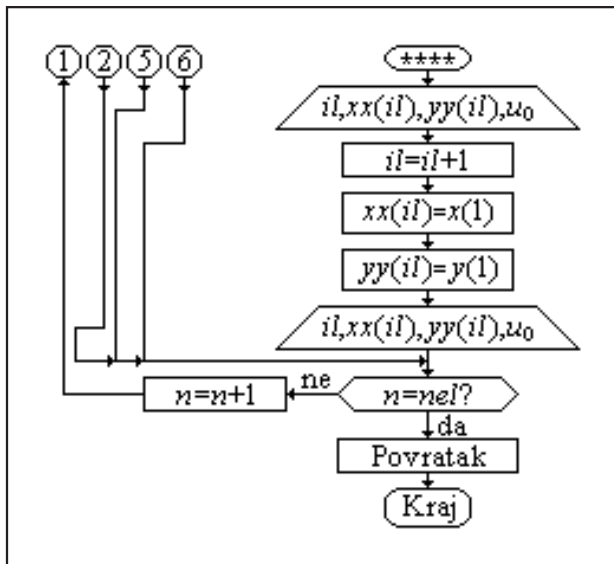
Slika 4. Treći deo dijagrama toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama.



Slika 5. Četvrti deo dijagrama toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama.



Za inženjersku praksu najznačajniji je treći način grafičke prezentacije rezultata proračuna iz razloga što se na taj način najlakše mogu predstaviti zonalne promene temperature po geometriji rešavanog domena. Da bi se dobila jedna takva slika temperaturnog polja po rešavanom domenu, najpre je potrebno odrediti minimalnu i maksimalnu temperatu-



Slika 6. Peti deo dijagrama toka algoritma za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama.

ru iz vektora u kojem su smeštene izračunate vrednosti temperatura svih čvorova mreže konačnih elemenata. Takođe, treba zadati i ukupan broj izotermičkih linija koje se kao grafičko rešenje žele pridružiti geometriji rešavanog domena.

Jedan od načina za pozivanje predstavljenog algoritma (potprograma) u glavnom programu metode konačnih elemenata dat je u dodatku ovog rada.

#### 4. PRIMER PRORAČUNA

Ovom prilikom će se analizirati realan problem raspodele temperature na toplotno kritičnom mestu 110 kV-nog kablovskog voda koji je trasiran između transformatorskih stanica TS „Beograd 17” i TS „Beograd 28”. Na ovom toplotno kritičnom mestu, na 110 kV-ni kablovski vod toplotno utiču toplovod (ukrštanje pod pravim uglom sa 110 kV-nim kablovskim vodom) i grupa od četiri trožilna 35 kV-na kabla tipa IPZO 13-A 3×150 mm<sup>2</sup> (paralelno vođenje sa 110 kV-nim kablovskim vodom). Visoko-naponski 110 kV-ni kablovski vod čine tri jednožilna kabla tipa XHE 48-A 1×1 000 mm<sup>2</sup>. Ovi kablovi su celom dužinom trase vođeni u trougaonoj formaciji, dok su jedino na posmatranom toplotno kritičnom

mestu položeni u horizontalnoj ravni. Tipično toplotno kritično mesto prikazano je na slici 7, dok je na slici 8 prikazana geometrija rešavanog domena A-A’. Nelinearna tranzijentna analiza procesa razmene toplote izvodi se metodom konačnih elemenata, pri promenljivim strujnim opterećenjima svih kablova i temperaturno-zavisnim karakteristikama većine materijala u modelu.

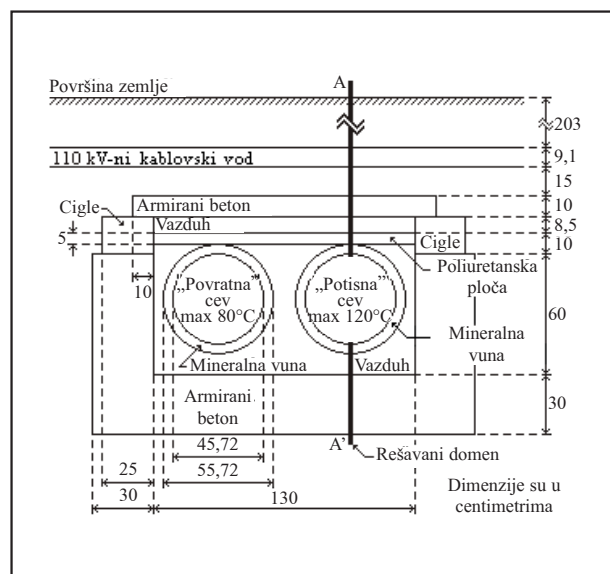
U modelu rešavanog domena sa slike 8 postoje granične površine (granice) na kojima je definisana vrednost količine toplotnog fluksa ( $q_s = 0$  homogeni granični uslov [9]), razmena toplote konvekcijom i razmena toplote zračenjem. Većina graničnih uslova u modelu je nelinearna, tj. zavisna od temperature. Nelinearnosti graničnih uslova obuhvaćene su preko temperaturno-zavisnih koeficijenata razmene toplote konvekcijom (slika 9) i zračenjem.

Dnevni uticaj vetra na površinu zemlje obuhvaćen je preko sledećeg koeficijenta razmene toplote konvekcijom

$$(28)$$

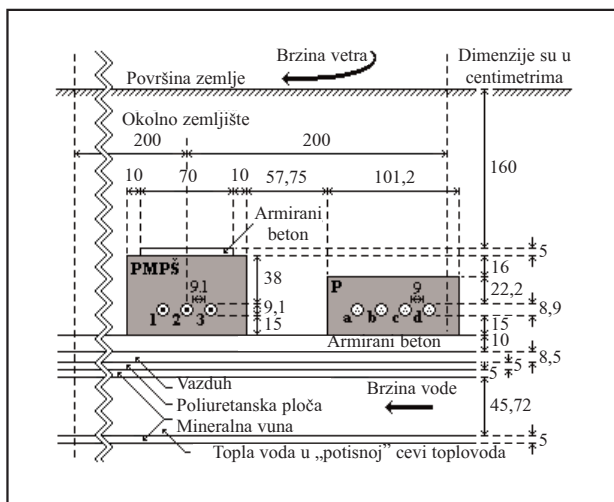
gde je  $V_{wi} = 0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  srednja dnevna brzina vetra [12].

Razmena toplote zračenjem između površina predstavljena je preko graničnog uslova ekvivalentne konvekcije gde je nelinearnost sa temperaturom uključena preko ekvivalentnog temperaturno-zavisnog koeficijenta razmene toplote [2]. Koeficijent površinske apsorpcije solarnog zračenja za pesak i šljunak jednak je 0,65.



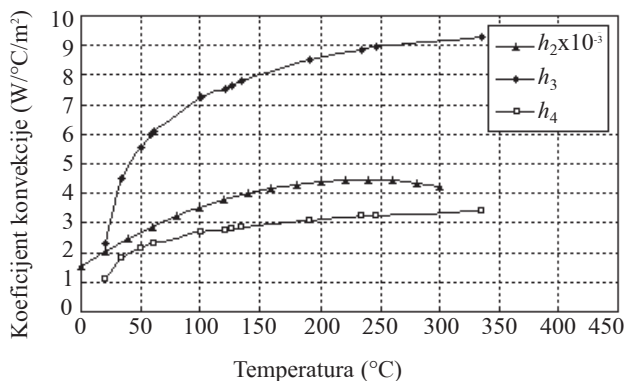
Slika 7. Tipično toplotno kritično mesto podzemnog ukrštanja kanala toplo voda i 110 kV-nog kablovskog voda. A-A’ - rešavani domen.

Temperaturno-zavisne karakteristike materijala date su u tabeli 1. Deo ovih karakteristika definisan je izrazima (29), (30) i (31). Takođe, nelinearnom modelu konačnih elemenata pridružena je i temperaturna zavisnost faktora dielektričnih gubitaka u izolaciji od umreženog polietilena.



Slika 8. Prikaz geometrije rešavanog domena A-A'. P - kablovska posteljica od peska sa veličinom granula od 0-4 mm [13]. PMPŠ - kablovska posteljica od posebne mešavine peska i šljunka, bez cementa, sa veličinom granula 0-16 mm [15]. 1, 2, 3 - 110 kV-ni kablovi tipa XHE 48A 1x1 000 mm<sup>2</sup>. a, b, c, d - 35 kV-ni kablovi tipa IPZO 13A 3x150 mm<sup>2</sup>.

$$h_1 = 7,382 + 1,925(V_{wi})^{0,75}$$



Slika 9. Koeficijenti razmene toplote konvekcijom u funkciji od temperature,  $h_2$  - na unutrašnjoj površini „potisne” cevi toplovoda,  $h_3$  - na gornjoj površini poliuretanske ploče, i  $h_4$  - na donjoj površini gornje betonske ploče kanala toplovoda. Zavisnost koeficijenta  $h_2$  data je za brzinu tople vode u „potisnoj” cevi toplovoda od  $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , dok su zavisnosti koeficijenata  $h_3$  i  $h_4$  date za temperaturu vazduha od  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tabela 1. Temperaturno-zavisne karakteristike materijala koje su preuzete iz [13–23].

| Materijal                                  | $k$<br>W·°C <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> | $c$<br>J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> | $\rho$<br>kg·m <sup>-3</sup> | $R$<br>Ω·m |
|--|--|---|------------------------------|------------|
| Aluminijum                                 | NL***                                      | (30)  | 2 700                        | (31)       |
| Bakar                                      | (29)**                                     | (30)  | 8 940                        | (31)       |
| Olovo                                      | (29)                                       | (30)  | 11 340                       | -          |
| Čelik                                      | 48   | (30)  | 7 840                        | -          |
| Umreženi polietilen                        | NL   | NL  | 930                          | -          |
| Okolno zemljište                           | NL-A*                                      | 1 054                                       | 1 490                        | -          |
| Pesak - posteljica oko 35 kV-nih kablova   | NL-A*                                      | 837   | 1 720                        | -          |
| Sadašnja posteljica 110 kV-nih kablova     | NL-A*                                      | 1 026                                       | 1 950                        | -          |
| Vazduh                                     | NL   | NL  | NL                           | -          |
| Impregnisani papir – pojasna izolacija     | 0,200                                      | 1 370                                       | 1 250                        | -          |
| Impregnisani papir – spoljašnja zaštita    | 0,167                                      | 1 370                                       | 1 250                        | -          |
| Mineralna vuna                             | 0,040                                      | 837   | 200                          | -          |
| Armirani beton                             | 1,160                                      | 880   | 2 000                        | -          |
| Poliuretan                                 | 0,035                                      | 1 380                                       | 35                           | -          |
| Novoizmešana posteljica****                | NL-A*                                      | 950   | 2 000                        | -          |
| Kvarcni pesak -    sa osom kristala kvarca | NL   | 740   | 2 650                        | -          |
| Kvarcni pesak - ⊥ na osu kristala kvarca   | NL   | 740   | 2 650                        | -          |

\* Ove krive predstavljaju aproksimacije realnih temperaturnih zavisnosti za toplotne provodnosti datih materijala. Aproksimacija svake od ove četiri krive izvršena je na osnovu samo dve određene vrednosti za toplotnu provodnost, i to na  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aproksimacija je izvršena pod pretpostavkom da su dati materijali na temperaturi od  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  sa maksimalnim sadržajem vlage, dok su na temperaturi od  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  potpuno isušeni. Ove krive su date na slici 10.

\*\* Brojevi u zagradama prate izraze date u ovom poglavlju.  
 \*\*\* Nelinearna karakteristika koja je preuzeta iz neke od referenci.  
 \*\*\*\* Novoizmešana kablovska posteljica sastoji se od šljunka, peska „Moravca” i dodatka od 2 % cementa. Veličina granula ove kablovske posteljice je 0-16 mm.

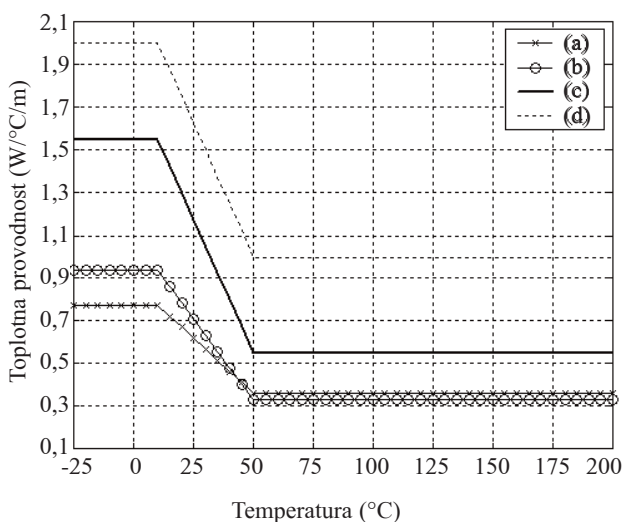
Karakteristike materijala koje su u tabeli 1 označene sa (29), (30) i (31) menjaju se sa temperaturom  $\theta$  prema sledećim izrazima

$$k(\theta) = k_0(1 + \kappa\theta + \sigma\theta^2) \quad (29)$$

$$c(\theta) = c_0(1 + \beta\theta + \eta\theta^2) \quad (30)$$

$$R(\theta) = R_0(1 + \alpha\theta + \zeta\theta^2) \quad (31)$$

gde su  $k(\theta)$ ,  $c(\theta)$  i  $R(\theta)$  toplotna provodnost, specifična toplota i specifična električna otpornost materijala, respektivno. Vrednosti ovih parametara na temperaturi od 0 °C su  $k_0$ ,  $c_0$ ,  $R_0$ , a  $\kappa$ ,  $\sigma$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$  i  $\zeta$  su temperaturni koeficijenti koji su dati u [20].



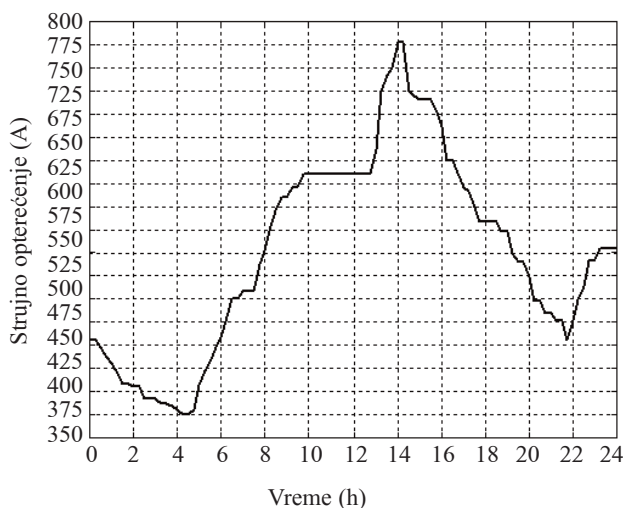
Slika 10. Toplotna provodnost u funkciji od temperature za: (a) okolno zemljište, (b) posteljicu od peska oko 35 kV-nih kablova, (c) postojeću posteljicu oko 110 kV-nih kablova i (d) novoizmešanu kablovska posteljicu.

Vremensko-zavisni ulazni podaci su: struje 110 kV-nih kablova, struje 35 kV-nih kablova, i temperatura vazduha koji struji po površini zemlje. Na slikama 11 i 12 prikazana su strujna opterećenja 110 kV-nog kablovskog voda i grupe od četiri trožilna 35 kV-na kabla za 1. februar 1999. godine, respektivno. Pretpostavlja se da su sistemi trofaznih struja simetrični u svim kablovskim vodovima.

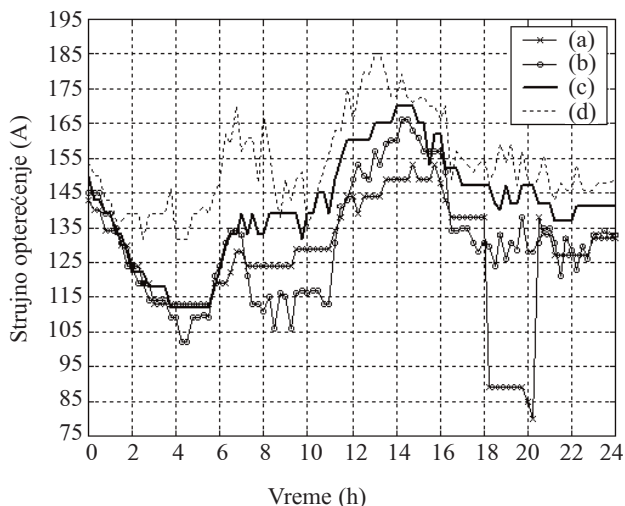
Usvojeno je da se temperatura vazduha 1. februara 1999. godine menjala sinusoidalno sa vremenom, tj.

$$\theta_e(t) = \theta_{em} + \frac{\theta_{emax} - \theta_{emin}}{2} \sin\left(-\frac{2\pi t}{24}\right) - 273,16 \quad (32)$$

gde je  $\theta_e(t)$  temperatura vazduha koji struji po površini zemlje u °C,  $\theta_{em} = 267,16$  K srednja vrednost temperature vazduha,  $\theta_{emax} = 268,56$  K izmerena maksimalna vrednost temperature vazduha,  $\theta_{emin} = 265,76$  K izmerena minimalna vrednost temperature vazduha, a vreme  $t$  u h.



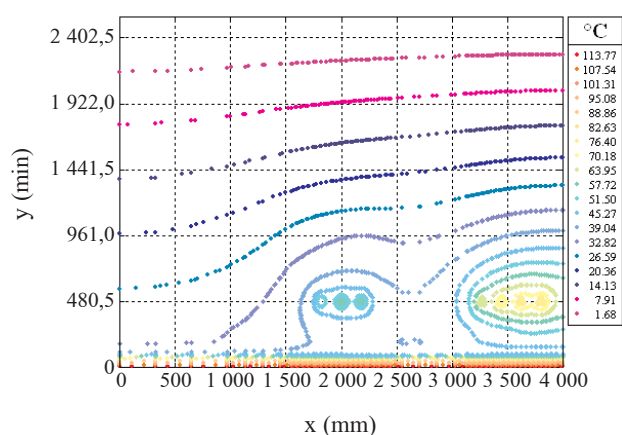
Slika 11. Dnevni dijagram opterećenja snimljen 1. februara 1999. za 110 kV-ni kablovski vod.



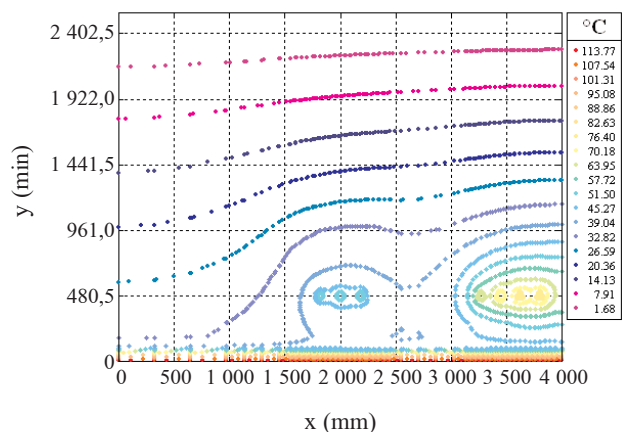
Slika 12. Dnevni dijagrami opterećenja snimljeni 1. februara 1999. za: (a) prvi, (b) drugi, (c) treći i (d) četvrti 35 kV-ni kabl, gledano u smeru od 110 kV-nog kablovskog voda.

Mogućnosti predloženog algoritma najbolje se mogu demonstrirati na primeru zamene posteljice oko 110 kV-nih kablova. Zamena posteljice utiče na tranzijentni odziv a istovremeno i na prostornu raspodelu temperaturnog polja po rešavanom domenu

A-A', zbog čega se dobijaju četiri različite slike temperaturnog polja. Na slikama 13, 14, 15 i 16 prikazane su izoterme temperaturnog polja koje se generiše u trenutku  $t = 16$  h za slučaj kada su 110 kV-ni kablovi položeni u postojeću posteljicu, novoizmešanu posteljicu, kvarcni pesak – normalno na osu kristala kvarca i kvarcni pesak – paralelno sa osom kristala kvarca, respektivno.



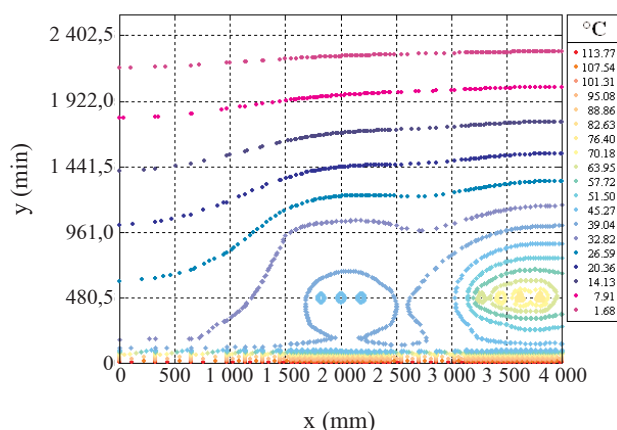
Slika 13. Prikaz izotermičkih linija po rešavanom domenu A-A' za 110 kV-ne kablove položene u postojećoj posteljici, temperaturu tople vode u „potisnoj” cevi toplovođa od 120 °C i temperaturu vazduha u kanalu toplovođa od 35 °C.



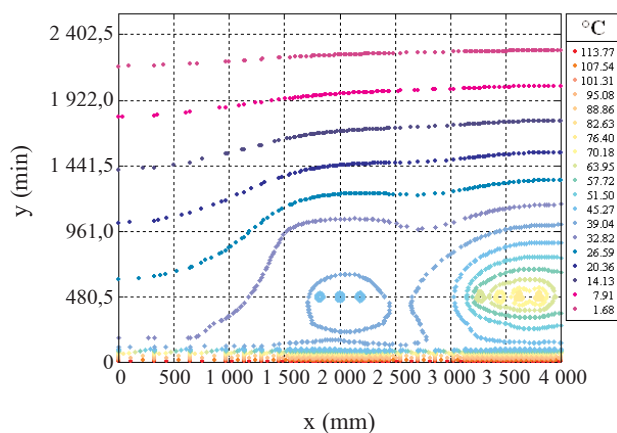
Slika 14. Prikaz izotermičkih linija po rešavanom domenu A-A' za 110 kV-ne kablove položene u novoizmešanoj posteljici, temperaturu tople vode u „potisnoj” cevi toplovođa od 120 °C i temperaturu vazduha u kanalu toplovođa od 35 °C.

## 5. ZAKLJUČAK

Realizacija predloženog algoritma u vidu potprograma dala je vrlo dobre rezultate pri izračunavanju raspodele temperaturnog polja u razmatra-



Slika 15. Prikaz izotermičkih linija po rešavanom domenu A-A' za 110 kV-ne kablove položene u kvarcnom pesku - normalno na osu kristala kvarca, temperaturu tople vode u „potisnoj” cevi toplovođa od 120 °C i temperaturu vazduha u kanalu toplovođa od 35 °C.



Slika 16. Prikaz izotermičkih linija po rešavanom domenu A-A' za 110 kV-ne kablove položene u kvarcnom pesku - paralelno sa osom kristala kvarca, temperaturu tople vode u „potisnoj” cevi toplovođa od 120 °C i temperaturu vazduha u kanalu toplovođa od 35 °C.

nom domenu. Promena oblika pojedinih izotermičkih linija prema grafički prikazanim rezultatima proračuna manifestuje efekat zamene kablovske posteljice oko 110 kV-nog kablovskog voda čime se istovremeno potvrđuje i osetljivost predloženog algoritma. Ovakav potprogram može se lako uključiti u bilo koju strukturu glavnog programa metode konačnih elemenata gde ne postoji mogućnost da se rezultati proračuna prikažu linijama jednakih potencijala. Posebno je značajna činjenica da se ovako predstavljen algoritam za izračunavanje koordinata tačaka istog potencijala polja bez problema može prevesti na bilo koji programski jezik.

## 6. LITERATURA

- [1] K. H. Huebner, E. A. Thornton, THE FINITE ELEMENT METHOD FOR ENGINEERS, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1982.
- [2] K. H. Huebner, D. L. Dewhurst, D. E. Smith, T. G. Byrom, THE FINITE ELEMENT METHOD FOR ENGINEERS, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [3] Z. Haznadar, Ž. Štih, ELEKTROMAGNETIZAM, ELEKTROMAGNETSKI VALOVI I NUMERIČKE METODE, Svezak II, Sarajevo, 1998. godine, str. 591, 649, 689, 691 i 705, 714.
- [4] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, THE FINITE ELEMENT METHOD, BASIC FORMULATION AND LINEAR PROBLEMS, Volume 1, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
- [5] T. J. R. Hughes, THE FINITE ELEMENT METHOD, LINEAR STATIC AND DYNAMIC FINITE ELEMENT ANALYSIS, Prentice-Hall International Inc., New Jersey, 1987.
- [6] S. S. Rao, THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING, Second Edition, Pergamon Press, Oxford, 1989.
- [7] IEC Technical Report, ELECTRIC CABLES - CALCULATIONS FOR CURRENT RATINGS - FINITE ELEMENT METHOD, IEC TR 62095, First Edition, 2003-06.
- [8] Y. W. Kwon, H. C. Bang, THE FINITE ELEMENT METHOD USING MATLAB, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2000.
- [9] QUICKFIELD™, FINITE ELEMENT ANALYSIS SYSTEM, Version 5.0, User's Guide, Tera Analysis Ltd., 2002.
- [10] G. J. Anders and H. S. Radhakrishna, POWER CABLE THERMAL ANALYSIS WITH CONSIDERATION OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN THE SOIL, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, No. 4, pp. 1280-1288, Oct. 1988.
- [11] Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, TOPLOTNO KRITIČNA MESTA KABLOVSKIH VODOVA 110 kV, NA PODRUČJU BEOGRADA, Izveštaj broj 359703, Beograd, 1997.
- [12] J. K. Mitchell and O. N. Abdel-Hadi, TEMPERATURE DISTRIBUTIONS AROUND BURIED CABLES, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, No. 4, pp. 1158-1166, July/Aug. 1979.
- [13] B. M. Lalević, PRIRUČNIK KABLOVI ELEKTROENERGETSKI, CEKOS-ING, Beograd, 1997. godine.
- [14] J. P. Holman, HEAT TRANSFER, Eighth Edition, McGraw-Hill Inc., Singapore, 1999.
- [15] Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, RAZVOJ I PRIMENA POSEBNIH MEŠAVINA ZA KABLOVSKU POSTELJICU NA TERITORIJI SRBIJE, Studija 359215, Beograd, 1993.
- [16] L. Heinhold, POWER CABLES AND THEIR APPLICATION, Part 1, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, 1990, pp. 322, 348.
- [17] S. Y. King, N. A. Halfter, UNDERGROUND POWER CABLES, Longman, London and New York, 1982, pp. 132, 224.
- [18] Ç. T. Larina, SILOVBE KABELI I VYSOKOVOLÝTNBE KABELÝNBE LINII, 2-e izdanje, pererabotannoe i dopolnennoe, Çnergoatomizdat, Moskva, 1996., stp. 255, 259.
- [19] D. B. Milinčić, ZADACI IZ TERMODINAMIKE, Građevinska knjiga, Beograd, 1987. godine, str. 347, 360.
- [20] V. T. Morgan, THERMAL BEHAVIOUR OF ELECTRICAL CONDUCTORS, Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England, 1991, pp. 597, 602.
- [21] J. Bartels et al., LANDOLT-BÖRNSTEIN - ZAHLENWERTE UND FUNKTIONEN AUS PHYSIK, CHEMIE, ASTRONOMIE, GEOPHYSIK UND TECHNIK, IV. Band: Technik, Teil 4: Wärmetechnik, Bandteil b: Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen, Verbrennung, Wärmeübertragung, Springer Verlag, Berlin, p. 491, 1972.
- [22] D. Klimenta, S. Nikolajević, M. Sredojević, REGULACIJA TOPLOTNIH KARAKTERISTIKA AMBIJENTA NA TOPLOTNO KRITIČNIM MESTIMA PODZEMNIH ENERGETSKIH KABLOVA - DEO I: MATEMATIČKI MODELI I ALGORITMI, JUKO CIGRE, XIX Simpozijum o kablovima, Tara, septembar 2006.
- [23] D. Klimenta, S. Nikolajević, M. Sredojević, REGULACIJA TOPLOTNIH KARAKTERISTIKA AMBIJENTA NA TOPLOTNO KRITIČNIM MESTIMA PODZEMNIH ENERGETSKIH KABLOVA - DEO II: GENERISANJE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA I PRAKTIČNA RAZMATRANJA, JUKO CIGRE, XIX Simpozijum o kablovima, Tara, septembar 2006.

## 7. DODATAK

Algoritam za izračunavanje koordinata tačaka izotermičkih linija sa jednakim temperaturama  $\theta_{01}$ ,  $\theta_{02}$ ,  $\theta_{03}$ ,... programski je realizovan kao potprogram na sledeći način

POTPROGRAM IZOTERMA( $ni$ ,  $\theta_{0i}$ , XCV, YCV, ZCV, &TCV, ELTP)

%

%  $ni$  – redni broj izotermičke linije.

%  $\theta_{0i}$  – temperatura izotermičke linije.

% XCV, YCV – vektori koordinata čvorova za ravanske

% probleme.

```

% XCV, ZCV – vektori koordinata čvorova za
% osnosimetrične probleme.
% TCV – vektor sa temperaturama svih čvorova mreže.
% ELTP – vektor sa podacima o vezi elemenata i čvorova.
% nel – ukupan broj elemenata u mreži konačnih
% elemenata.
% nd – ukupan broj čvorova jednog elementa.
% etime – trenutak za koji će se prezentovati koordinate
% tačaka izotermičkih linija zajedno sa
% izračunatim temperaturama.
%
ZAJEDNICKO POLJE BROJEVA /PODACI/ nel,nd,
&etime
u0=θ0i
kat=3
AKO JE (osnosimetrični problem) kat=2
AKO JE ((ni=1) i (tranzijentni problem)) STAMPAJ
& (*,8) etime
STAMPAJ (*,9) ni
AKO JE (kat=3) STAMPAJ (*,10)
AKO JE (kat=2) STAMPAJ (*,11)
%
PONOVI 1 i=1,nel
PONOVI 2 k=(i-1)*4+1,i*4
ELTPO(i,k-4*(i-1))=ELTP(k)
2 NASTAVI
1 NASTAVI
%
PONOVI 3 i=1,nel
PONOVI 3 k=1,nd
ELTPOV(i,k)=ELTPO(i,k)
3 NASTAVI
%
il=0
PONOVI 4 n=1,nel
%
PONOVI 5 i=1,nd
kz=ELTPOV(n,i)
u(i)=TCV(kz)
x(i)=XCV(kz)
AKO JE (kat=3) y(i)=YCV(kz)
AKO JE (kat=2) y(i)=ZCV(kz)
5 NASTAVI
%
umin=u(1)
PONOVI 6 i=2,nd
AKO JE (umin > u(i)) ONDA
umin=u(i)
KRAJ AKO
6 NASTAVI
%
umax=u(1)
PONOVI 7 i=2,nd
AKO JE (umax < u(i)) ONDA

```

```

umax=u(i)
KRAJ AKO
7 NASTAVI
%
AKO JE (umin ≤ u0 ≤ umax) ONDA
%
AKO JE ((u(1) ≤ u0 ≤ u(2)) ili (u(1) ≥ u0 ≥ u(2))) ONDA
il=il+1
G1=(u0-u(2))/(u(1)-u(2))
G2=(u(1)-u0)/(u(1)-u(2))
xx(il)=G1*x(1)+G2*x(2)
yy(il)=G1*y(1)+G2*y(2)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE (u(1) = u(2) = u0) ONDA
il=il+1
xx(il)=x(1)
yy(il)=y(1)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
il=il+1
xx(il)=x(2)
yy(il)=y(2)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE ((u(2) ≤ u0 ≤ u(3)) ili (u(2) ≥ u0 ≥ u(3))) ONDA
il=il+1
G2=(u0-u(3))/(u(2)-u(3))
G3=(u(2)-u0)/(u(2)-u(3))
xx(il)=G2*x(2)+G3*x(3)
yy(il)=G2*y(2)+G3*y(3)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE (u(2) = u(3) = u0) ONDA
il=il+1
xx(il)=x(2)
yy(il)=y(2)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
il=il+1
xx(il)=x(3)
yy(il)=y(3)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE (nd=3) ONDA
%
AKO JE ((u(3) ≤ u0 ≤ u(1)) ili (u(3) ≥ u0 ≥ u(1))) ONDA
il=il+1
G1=(u0-u(3))/(u(1)-u(3))
G3=(u(1)-u0)/(u(1)-u(3))
xx(il)=G1*x(1)+G3*x(3)
yy(il)=G1*y(1)+G3*y(3)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0

```

```

KRAJ AKO
%
AKO JE (u(3) = u(1)= u0) ONDA
il=il+1
xx(il)=x(3)
yy(il)=y(3)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
il=il+1
xx(il)=x(1)
yy(il)=y(1)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
KRAJ AKO
%
AKO JE (nd=4) ONDA
%
AKO JE ((u(3) ≤ u0 ≤ u(4)) ili (u(3) ≥ u0 ≥ u(4))) ONDA
il=il+1
G3=(u0-u(4))/(u(3)-u(4))
G4=(u(3)-u0)/(u(3)-u(4))
xx(il)=G3*x(3)+G4*x(4)
yy(il)=G3*y(3)+G4*y(4)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE (u(3) = u(4)= u0) ONDA
il=il+1
xx(il)=x(3)
yy(il)=y(3)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
il=il+1
xx(il)=x(4)
yy(il)=y(4)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE ((u(4) ≤ u0 ≤ u(1)) ili (u(4) ≥ u0 ≥ u(1))) ONDA
il=il+1
G1=(u0-u(4))/(u(1)-u(4))
G4=(u(1)-u0)/(u(1)-u(4))
xx(il)=G1*x(1)+G4*x(4)
yy(il)=G1*y(1)+G4*y(4)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
AKO JE (u(4) = u(1)= u0) ONDA
il=il+1
xx(il)=x(4)
yy(il)=y(4)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
il=il+1
xx(il)=x(1)

```

```

yy(il)=y(1)
STAMPAJ (*,12) il,xx(il),yy(il),u0
KRAJ AKO
%
KRAJ AKO
%
KRAJ AKO
%
4 NASTAVI
%
8 FORMAT ('Koordinate tačaka izotermičkih linija
& izračunate su za trenutak:','etime','s')
9 FORMAT ('Koordinate tačaka izotermičke linije
& broj:','ni')
10 FORMAT ('Čvor x y Temperatura')
11 FORMAT ('Čvor x z Temperatura')
12 FORMAT ('','il','','xx(il)','','yy(il)',' ','u0,')
%
POVRATAK
%
KRAJ

```

Jedan od načina za pozivanje potprograma IZOTERMA u glavnom programu metode konačnih elemenata je:

```

% niu-1 – ukupan broj izotermi gde se niu zadaje kao
% ulazni podatak.
% ncv – ukupan broj čvorova u mreži konačnih elemenata.
%
niu=20
%
θmin=TCV(1)
PONOVI 1 i=2,ncv
AKO JE (θmin>TCV(i)) ONDA
θmin=TCV(i)
KRAJ AKO
1 NASTAVI
%
θmax=TCV(1)
PONOVI 2 i=2,ncv
AKO JE (θmax<TCV(i)) ONDA
θmax=TCV(i)
KRAJ AKO
2 NASTAVI
%
AKO JE ((θmax=θmin) ili ((θmax-θmin)≤0,01)) IDI NA 4
θni=(θmax-θmin)/niu
PONOVI 3 ni=1,niu-1
POZIV IZOTERMA(ni,θ0i=ni*θ0i+θmin,XCV,YCV,ZCV,
&TCV,ELTP)
3 NASTAVI
4 NASTAVI

```

Rad je primljen u uredništvo 31. 08. 2006. godine



**Dardan Klimenta**, rođen je 1975. godine u Peći na Kosovu, Srbija. Diplomirao je 1998. na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini i magistrirao 2001. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Danas je asistent na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, na Elektrotehničkom odseku. Objavio je nekoliko naučnih radova iz oblasti procesa razmene toplote kod podzemnih energetske kablova. Procesi razmene toplote kod podzemnih visokonaponskih kablova ostaju oblast koju istražuje i tokom izrade doktorske disertacije.



**Jordan Radosavljević** (1973) je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini 1998. godine i magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 2003. godine. Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici kao asistent. Oblast njegovog interesovanja je analiza prenosnih i distributivnih mreža i distribuirana proizvodnja električne energije.



---

Žarko Markov

# Izbor modela kanala sa smetnjama u telekomunikacionoj mreži EPS-a

Stručni rad

UDK: 621.395; 621.395.743; 621.395.669; 654.153.2

---

Rezime:

U radu se pokušava izabrati model telekomunikacionog kanala sa greškama u prenosu koji odgovara kanalima u mreži EPS-a. Pokazuje se da Džilbertov model dobro opisuje telekomunikacioni kanal koji trpi uticaj energetskog sistema. To je model sa grupnim greškama. Veličine svojstvene ovom modelu se mogu izračunati ako se poznaje priroda smetnji u kanalu. Model se može koristiti za proračun kvaliteta informacija prenetih EPS-ovom računarskom mrežom.

**Ključne reči:** telekomunikacioni kanal sa greškama, Džilbertov model, grupne greške

---

Abstract:

DETERMINATION OF A LOSS CHANNEL MODEL  
IN THE TELECOMMUNICATION NETWORK OF SERBIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY

Determination of a loss channel model convenient for presentation of telecommunication channels in Serbian Electric Power Industry (SEPI) is made in this short paper. It is pointed out that so-called Gilbert model is a good choice. It models loss in channels working in energetic environment. This is the model where bursty errors are dominant. Knowing the nature of transients in energetic system it is possible to calculate main parameters of the model. The Gilbert model may be used for calculation of the information quality transmitted in SEPI.

**Key words:** telecommunication channel with errors, Gilbert model, bursty errors

---

## 1. UVOD

Realni telekomunikacioni kanali uvek rade pod uticajem činilaca koji izazivaju smetnje u radu. Smetnje kod analognih kanala se najčešće predstavljaju šumovima (preslušavanja, nesimetrije, napajanja, itd.). U digitalnoj tehnici se uticaj smetnji izražava kao deo pogrešno prenetih bitova od ukupnog broja prenetih (*BER*, *Bit Error Rate*, *Ratio*). Na osnovu intervala vremena u kojima se pojavljuje *BER* veće vrednosti definišu se intervali (ne)raspo-

loživosti, (*un*)availability, [1]. Paketska telekomunikaciona tehnika se zasniva na digitalnom prenosu. Neispravno preneti bitovi se na prijemu otkrivaju kao neispravne celine (paketi, frejmovi, ćelije) i vrlo često odbacuju. Tako se neispravnosti u prenosu, u paketskoj tehnici, prikazuju kao deo izgubljenih paketa. U paketskom prenosu zasnovanom na potvrđama i retransmisiji smetnje izazivaju kašnjenja. Ukoliko ne postoji retransmisija, prijemni signal je, zbog smetnji (tj. izgubljenih paketa), nižeg kvaliteta.

---

Prof. dr Žarko Markov, dipl. ing. el. – Iritel, 11 080 Zemun, Batajnički put 23

Da bi se odredila raspoloživost digitalnog kanala, kašnjenje paketa zbog smetnji ili pad kvaliteta prenosa u paketskoj tehnici potrebno je proračunati uticaj smetnji u ovim tehnikama. Proračun zahteva usvajanje nekog modela koji je matematička predstava prenosa bliska realnosti. Ova predstava mora uzeti u obzir sva posebna svojstva značajna za kanal tj. mrežu na koju se odnosi.

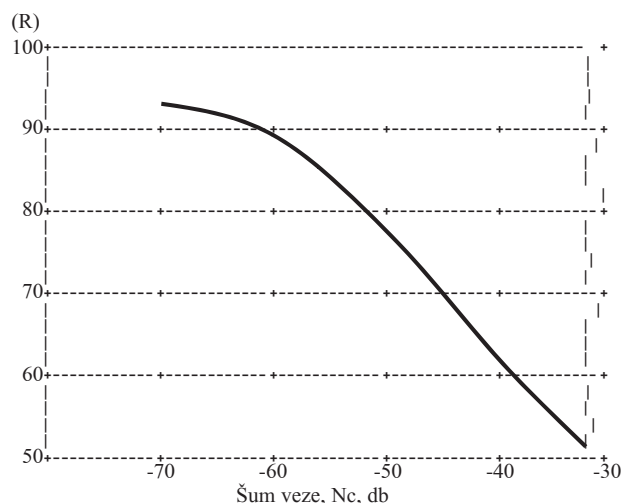
Elektroprivredna (EPS-ova) telekomunikaciona mreža (TM) se po nekim svojstvima razlikuje od javnih TM. Jedno od tih svojstava je priroda smetnji izazvana radom TM u energetskom okruženju. Cilj ovog skromnog rada je da se dođe do modela telekomunikacionog kanala koji će, na najbolji način, uzeti u obzir svojstva smetnji u EPS-ovoj TM.

## 2. O KANALIMA I PROTOKOLIMA SA SMETNJAMA

Usvojicemo dve pretpostavke.

**Prva** je da se pod kanalom podrazumevaju i realni kanali (kao što je TDM, *Time Division Multiplex*, kanal sa protokom 64 kb/s) i virtuelni kanali kao što su oni u paketskoj tehnici (RTP, *Real time Transport Protocol*, tok između dva korisnika u paketskoj mreži).

**Druga** pretpostavka je da su u ovom razmatranju analogni kanali od drugorazrednog značaja, koliko zbog sve manje primene, toliko i zbog potpuno poznate prirode, slika 1 iz [2].



Slika 1. Zavisnost kvaliteta veze R od nivoa šuma koji unosi uređaj i medijum za prenos

Pogledajmo kako se postupa sa smetnjama u digitalnim i paketskim kanalima.

U **digitalnim kanalima**, protoka manjih od 2 Mb/s, se rad kanala deli na intervale raspoloživosti i neraspoloživosti. Saglasno odredbama iz [1], inter-

val neraspoloživosti počinje početkom prve od deset uzastopnih sekundi u kojima je deo neispravnih bita jednak ili veći od jednog promila, (SES, *Severely Errored Second*). Saglasno istoj preporuci, interval raspoloživosti počinje početkom prve od deset uzastopnih sekundi u kojima je deo neispravnih bita manji od promila. Intervali vremena u kojima je deo pogrešnih bita manji od promila, koji se sastoji od sekundnih intervala sa greškama, ES (*Errored Seconds*) se smatraju intervalima raspoloživosti, a greške u prenosu se na neki način ispravljaju ili tolerišu.

Osnovna zamisao o raspoloživom digitalnom kanalu je u načelu primenjena i na **signalni kanal CCS7** (*Common Channel Signaling 7*). Tu postoje dva algoritma praćenja signalnih poruka sa greškama. Algoritam SUERM (*Signal Unit Error Rate Monitor*) određuje učestalost pogrešnih poruka, [3]. Kada učestalost dostigne prag, signalni kanal se proglašava neraspoloživim a signalni saobraćaj se prebacuje na druge signalne kanale (*changeover*). Algoritam AERM (*Alignment Error Rate Monitor*) prati učestalost grešaka na signalnom kanalu van rada i vraća ga u normalan rad kada učestalost pogrešnih signalnih jedinica padne ispod određenog praga. Ukoliko se pojave pogrešne signalne jedinice u normalnom radu, one se ispravljaju postupcima (negativne) potvrde i retransmisije.

U **X.25 tehnici** i u signalnom korisničkom **D kanalu ISDN tehnike** na drugom sloju se vrši ispitivanje ispravnosti primljenih paketa tj. poruka poljem FCS (*Frame Check Sequence*) pa se S (*Supervisory*) porukom REJ(N) (*Reject*) traži retransmisija paketa od rednog broja N pa nadalje.

U **FR (Frame Relay)** tehnici se otkrivaju neispravni ramovi i odbacuju se a višim slojevima se ostavlja mogućnost retransmisije.

U **ATM** tehnici je učinjen kompromis. Poljem HEC (*Header Error Control*) se vrši samo nadgledanje ispravnosti zaglavlja ATM ćelije. Ukoliko je pogrešan jedan bit, on se ispravlja, u suprotnom ćelija se odbacuje.

U **Internetu** se mogu srestu protokoli koji vrše prenos bez grešaka i oni koji se koriste bez ispravki pogrešnih paketa. Naime, u nekim primenama je potrebno da informacija bude istovetna na izvoru i uredištu. Takvi su protokoli koji prenose signalizaciju IP telefonije. Jasno je da se, zbog nadgledanja i ispravljanja grešaka u prenosu, povećava kašnjenje prenetog paketa. Jedan od veoma korišćenih transportnih protokola u Internetu, TCP (*Transmission Control Protocol*), nije mogao zadovoljiti uslove brzog (i ispravnog) prenosa signalnih paketa sa signalnim porukama signalizacije CCS7 (SIGTRAN), pa je morao biti razvijen SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*).

Protokoli u kojima se dozvoljava neispravnost u prenosu koriste se u Internetu tamo gde je brzina prenosa važnija od ispravnosti. Takav je protokol RTP koji se koristi za prenos paketizovanog telefonskog signala ili slike u realnom vremenu. Greške u prenosu se otklanjaju tako što se paketi sa neispravnim podacima odbacuju, što smanjuje kvalitet primljenog signala. Delimična popravka ovog kvaliteta se vrši kolima za nadoknadu izgubljenih paketa PLC (*Packet Loss Concealment*) ali to, opet, povećava kašnjenje.

### 3. POSTOJEĆI MODELI

U prethodnom odeljku je u najkraćim crtama opisano šta se dešava na kanalima i u protokolima kada se pojavi greška u prenosu. Ono što je još važno sa inženjerskog stanovišta je u kojoj meri se to dešava i kako to utiče na korisničku uslugu. Drugim rečima, postavlja se pitanje brojanog predstavljanja grešaka u prenosu i njihovih posledica.

Postoji nekoliko matematičkih modela prijema bita ili paketa ali su najpoznatiji Bernulijev, Džilbertov i model sa četiri stanja.

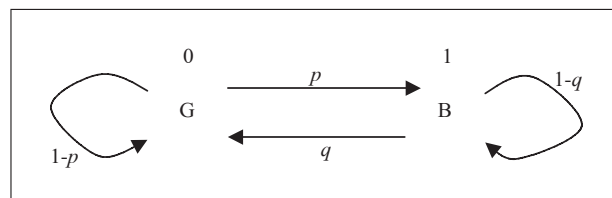
#### 3.1. Bernulijev model

Ovaj model, [4], podrazumeva da se pogrešan paket (ili bit) pojavljuje slučajno i nezavisno od ispravnosti prethodnih paketa. Verovatnoća pojave pogrešnog (izgubljenog) paketa je  $P_e$ . Prema definiciji nezavisnih događaja, verovatnoća da će sledeći paket biti neispravan je  $P_e$ , bez obzira da li se model nalazi u stanju primanja ispravnog ili neispravnog paketa. Verovatnoća prijema  $n$  uzastopnih ispravnih paketa je, očigledno  $(1 - P_e)^n$ . Ukoliko je primljen veliki broj paketa  $N$ , prosečan broj neispravnih paketa je  $NP_e$ . Ovaj model se koristi da se opiše kanal sa usamljenim neispravnim bitovima/paketima što se vidi i iz činjenice da verovatnoća pojave grupe od  $n$  uzastopnih neispravnih bitova/paketa opada po zakonu  $(P_e)^n$ .

#### 3.2. Džilbertov model

Predstava Džilbertovog modela, [4], je data slikom 2. Model se sastoji od dva stanja: stanja 0 ili G (*good*) i stanja 1 ili B (*Bad*). Stanje 0 je stanje prijema ispravnog bita ili paketa. Stanje 1 je stanje prijema neispravnog bita ili paketa (tj. gubitka paketa). Iz stanja 0 se može preći u stanje 1 sa verovatnoćom  $p$  ili ostati u stanju 0 sa verovatnoćom  $1-p$ . Iz stanja 1 se može preći u stanje 0 sa verovatnoćom  $q$  ili ostati u stanju 1 sa verovatnoćom  $1-q$ .

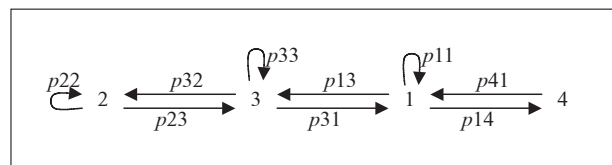
Osnovno svojstvo Džilbertovog modela je sledeće: verovatnoća da će sledeći bit/paket biti neispravan je veća ako se model već nalazi u stanju prijema pogrešnog bita/paketa nego ako se nalazi u stanju prijema ispravnog, tj.:  $1-q > p$  ili  $p+q < 1$ . Ovo svojstvo označava sklonost ka grupnim (*bursty*) greškama ili grupnim gubicima paketa. Naravno, ukoliko je  $p+q=1$ , Džilbertov model postaje model sa nezavisnim greškama tj. Bernulijev model.



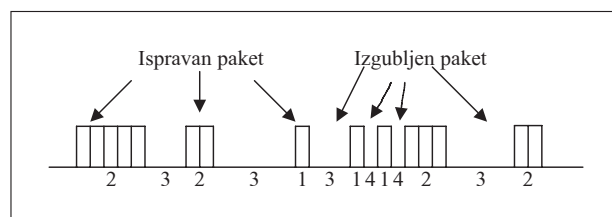
Slika 2. Džilbertov model

#### 3.3. Model sa četiri stanja

Ovaj složeniji model, slika 3, je pokušaj da se predstavi prenos i pojedinačnih paketa s greškom i grupa paketa s greškom. Stanja 2 i 3 predstavljaju prijem ispravnih i neispravnih paketa u grupi a stanja 1 i 4 predstavljaju prijem usamljenih ispravnih i neispravnih paketa.



Slika 3. Model sa četiri stanja



Slika 4. Stanja i prijem paketa

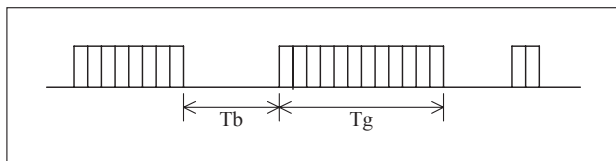
Stanja i prijem paketa su prikazani na slici 4. Stanje 1 označava ispravno primljen usamljeni paket. Stanje 2 predstavlja prijem ispravnih paketa u grupi. Stanje 3 predstavlja prijem neispravnih paketa u grupi tj. gubitak grupe paketa. Stanje 4 predstavlja usamljeni izgubljeni paket.

Potrebno je, dakle, odrediti koji od ovih modela najviše odgovara telekomunikacionom kanalu u mreži EPS-a tj. u TM elektroprivredne organizacije.

#### 4. MERENJA UTICAJA ENERGETSKE MREŽE NA TELEKOMUNIKACIONU MREŽU

Osnovno svojstvo TM elektroprivredne organizacije je rad u energetsom okruženju tj. veliki uticaj energetske mreže na TM. Dominantnu ulogu u uticaju na TM imaju sklopni aparati energetske mreže. Postoje brojna merenja koja pokazuju uticaj visokonaponskih kola na niskonaponska. Jedan primer rezultata svežijih merenja je dat u [5]. Skup rezultata mnogobrojnih merenja se, međutim, može naći u [6]. Merenja čiji su rezultati prikazani u [6] imaju dva vrlo važna svojstva. Prvo je da su vršena u većem broju zemalja, a drugo je da su merene različite veličine. Osnovni zaključci koji se mogu izvesti iz rezultata ovih merenja su sledeći:

- najveći uticaj energetske mreže na telekomunikacionu se vrši preko rada sklopnih aparata energetske mreže;
- smetnje izazvane radom sklopnih uređaja su trajanja većeg broja bita ili paketa bez obzira na bitski protok u telekomunikacionom kanalu;
- broj smetnji tj. raspoloživost telekomunikacionih medijskih i signalnih kanala zavisi od broja operacija sklopnih aparata, [7];
- merenjem dužine vremena trajanja smetnje  $T_b$  i dužine vremenskog intervala između smetnji  $T_g$  mogu se odrediti srednja dužina vremena trajanja smetnje  $t_b$  i srednja dužina trajanja vremena između smetnji  $t_g$ , slika 5.



Slika 5. Smetnje izazvane energetsom mrežom

Saglasno merenjima i ovim zaključcima, proizilazi da Džilbertov model najbolje opisuje elektroprivredni telekomunikacioni kanal sa greškama.

#### 5. JOŠ O DŽILBERTOVOM MODELU

Pošto Džilbertov model najbolje prikazuje telekomunikacioni kanal u elektroprivrednoj TM, možemo upoznati još nekoliko svojstava ovog modela.

Verovatnoća da se kanal nalazi u stanju prijema ispravnog paketa je

$$P_0 = P_g = q / (p + q) \quad (1)$$

Verovatnoća da se kanal nalazi u stanju prijema neispravnog paketa je

$$P_1 = P_b = p / (p + q) \quad (2)$$

Verovatnoća pojave  $k$  uzastopnih neispravnih bita/paketa je

$$p_k = q(1 - q)^{k-1} \quad (3)$$

Verovatnoća  $1 - q$  se često naziva uslovnom verovatnoćom gubitka paketa. To je, dakle, verovatnoća da se sledeći paket izgubi ako se model nalazi u stanju gubitka paketa.

Izračunavanje vrednosti  $p$  i  $q$  iz posmatranja niza paketa je složenije nego u slučaju Bernulijevog modela. U nizu paketa koji se pojavljuju u Džilbertovom modelu uočavaju se nizovi neispravnih tj. izgubljenih paketa. Za niz uzastopnih i izgubljenih paketa se kaže da ima dužinu  $i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ . Sa  $n-1$  je označen broj izgubljenih paketa u najdužem nizu uzastopno izgubljenih paketa. Sa  $m_i$  se označava broj nizova uzastopno izgubljenih paketa dužine  $i$ . Ukupni broj posmatranih paketa je  $m_0$ .

Prema [8], vrednosti  $p$  i  $q$  se izračunavaju na sledeći način:

$$p = \left( \sum_{i=1}^{n-1} m_i \right) / m_0 \quad (4)$$

$$q = 1 - \left( \sum_{i=2}^{n-1} (i-1) m_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{n-1} i m_i \right) \quad (5)$$

Izračunavanja pokazuju da je u ovom modelu uslovna verovatnoća gubitka paketa  $1 - q$  uvek veća od verovatnoće da se model nalazi u stanju gubitka paketa, tj.:

$$1 - q > P_1 \quad (6)$$

Ova nejednačina objašnjava suštinu Džilbertovog modela koja se može izreći na sledeći način: verovatnoća ostajanja u stanju gubitka paketa je uvek veća od verovatnoće da se model nađe u stanju gubitka paketa.

#### 6. ZAKLJUČAK

Sa gledišta prenosa neispravnih bitova i neispravnih tj. izgubljenih paketa telekomunikacioni kanal u elektroprivrednoj mreži se može predstaviti Džilbertovim modelom. Osnovno svojstvo ovog modela je da se greške pojavljuju u grupama. Uzrok ovakvoj prirodi grešaka su električne smetnje izazvane radom energetske sistema.

Osnovne veličine Džilbertovog modela su verovatnoće prelazaka iz stanja ispravnog prenosa u stanje gubitka i verovatnoća obrnutog prelaska i one

se mogu izračunati iz posmatranja niza prenetih jedinica.

Poznavanje srednje dužine vremena trajanja smetnje, srednje dužine trajanja vremena između uzastopnih smetnji i bitskog tj. paketskog protoka takođe omogućava proračun osnovnih veličina Džilbertovog modela.

Poznavanje osnovnih veličina ovog modela u EPS-u dozvoljava proračun kvaliteta prenošenih informacija računarskom mrežom EPS-a.

## 7. LITERATURA

- [1] ITU-Recommendation G.821
- [2] Markov, Ž.: O SABIRANJU UTICAJA NA KVALITET TELEFONSKOG SIGNALA U IP TELEFONIJI, Telekomunikacije, 1/06.
- [3] ITU-T Recommendation Q.704
- [4] ITU-T: COM12-D97-E, Packet Loss Distribution and Packet Loss Models, 2003.
- [5] Naumov, R., Vukelja, P., Mrvić, J., Hrvić, D., Jablan, N., Čizmović, D., Perišić, M.: TRANZIJENTNI NAPONI U NISKONAPONSKIM KOLIMAH „PERUĆICA” PRI OPERACIJAMA SKLOPNIH APARATA 220 kV I 110 kV, Savetovanje JUKOCIGRE, 2001.
- [6] Drašković, V.: ANALIZA USLOVA PRENOSA SIGNALA PODATAKA VF VEZAMA PO VODOVIMA VISOKOG NAPONA U PRELAZNIM I STACIONARNIM STANJIMA ELEKTROENERGETSKE MREŽE, Doktorska disertacija, ETF Beograd, 1990.
- [7] Mitić, D.: ODREĐIVANJE SVOJSTAVA DIGITALNIH INFORMACIONIH I SIGNALNIH KANALA KOJI SU POD UTICAJEM GRUPNIH GREŠAKA, Doktorska disertacija, FTN Novi Sad, 2002.
- [8] Jiang, W., Schulzrine, H.: MODELING OF PACKET LOSS AND DELAY AND THEIR EFFECT ON REAL-TIME MULTIMEDIA SERVICE QUALITY, Proc. of NOSSDAV, 2000.

Napomena: Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja na projektu TR6136 koje pomaže Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije.

Rad je primljen u uredništvo 25. 11. 2006. godine



**Žarko Markov** rođen 1946. godine. Diplomirao 1969, magistrirao 1975. godine i doktorirao 1976. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Radi u Iritelu na razvoju i proizvodnji telefonskih centrala za elektroprivrednu telefonsku mrežu (videti: [www.iritel.com/english/products/products.html](http://www.iritel.com/english/products/products.html)). Autor nekoliko desetina radova objavljenih u zemlji i inostranstvu, od kojih se petnaestak odnosi na elektroprivrednu telefoniju. Učestvovao u izradi Tehničkih uslova za elektroprivredne telefonske centrale i u projektima digitalne telefonske mreže EPS-a. Objavio nekoliko knjiga i udžbenika. Ima naučno zvanje naučnog savetnika i nastavno zvanje vanrednog profesora. Dobitnik nagrade za elektroniku iz fonda „Prof. Branko Raković” za 1997. godinu.

---

*Predrag M. Vuletić i Nebojša Mihailović*

# Stacionarne olovne baterije SN tipa

Stručni rad  
UDK: 621.355.2; 681.11.031.12

---

*Rezime:*

*U radu su definisane neophodne tehničke karakteristike (uključujući i električne) koje moraju zadovoljiti akumulatori i baterije SN sistema, zatim pravila mera bezbednosti, pa montaža baterija i priprema elektrolita i dovođenje baterije u radno stanje.*

*U radu su data istraživanja zastupljenosti akumulatora i baterija SN sistema u Elektroprivredi Srbije.*

**Ključne reči:** *stacionarne baterije, olovne industrijske*

---

*Abstract:*

**STATIONARY LEAD-ACID BATTERIES TYPE SN**

*This study defines necessary technical characteristics (and electrical) characteristics that electric batteries and SN system batteries have to satisfy. Also, security rules, batteries installation, electrolyte preparation and batteries activation have been defined.*

*We have also investigated the presence and use of the subject batteries in the Electric Power Industry of Serbia.*

**Key words:** *stationary batteries, lead industry*

---

## 1. UVOD

Godine 1879. kada je Francuz Plant (Gaston Plante) zaronio dve olovne ploče u rastvor sumporne kiseline, spojio ih sa izvorom električne struje, posle nekog vremena razdvojio od izvora, i, iznenađen, konstatovao da su one postale izvor struje, nije bio svestan da je prvi u istoriji napravio ponovo punjivi olovni akumulator.

Kod napunjenog olovnog akumulatora, aktivni materijal negativne elektrode je sunderasto olovo, pozitivna elektroda je olovo-oksidi, a elektrolit vodeni rastvor sumporne kiseline.

Olovni akumulatori se najčešće klasifikuju prema nameni i prema stanju napunjenosti elektrode.

Tako imamo starterske, tracione, stacionarne i prenosne po nameni, a suvo napunjene i nenapunjene prema stanju napunjenosti elektrode.

Kod stacionarnih olovnih industrijskih baterija SN sistema, pri kratkotrajnim strujama pražnjenja, zadržava se ujednačen napon, pa su one pogodne za rezervni izvor napajanja potrošača koji su osetljivi na variranje napona.

Specijalna konstrukcija pozitivnih i negativnih elektroda bazirana je na konstrukciji rešetke koju či-

---

*Mr Predrag M. Vuletić, dipl. ing. maš. – 14 000 Valjevo, Vuka Kadžića 22, e-mail: abv@ptt.yu  
Nebojša Mihailović, dipl. ing. tehn. – Krušik akumulatori, 14 000 Valjevo*

ne cik-cak niti što omogućava izvanredno deponovanje tj. utiskivanje paste za obe vrste elektroda.

Ovi akumulatori, kao izvori jednosmerne struje, nalaze primenu u železnici, elektro-centralama, trafo-stanicama, telefonskim centralama, kompjuterima i drugim potrošačima koji zahtevaju sigurno snabdevanje jednosmernom električnom strujom.

SN sistem znači skraćenicu od ruskog izraza „samo namazni” što se ustvari odnosi na aktivni materijal u obliku paste koji se nanosi na rešetke.

Inače, prva fabrika olovnih baterija na prostorima bivše Jugoslavije osnovana je 1920. u Zagrebu i zvala se **Munja**. Ona je pre II svetskog rata bila kontrolisana od nemačke firme VARTA AG iz Hanove-  
ra.

Većina fabrika je svoju proizvodnju zasnivala na licencnom znanju; tako npr. Mežice iz Mežica ima licencu Tudor, Trepča iz Mitrovice ima licencu Varta i Globe Union, Zletovo-Sasa iz Probištipa ima licencu Varta a Unis-Tesla iz Brčkog licencu Hoppecke.

Postojale su i fabrike Svetlost - Novi Pazar i Energoinvest - Srebrenica koja je imala proizvodnju upravo stacionarnih olovnih industrijskih baterija SN sistema, ali je u NATO bombardovanju potpuno razorena i više ne postoji.

Namera je da se u zemlji do kraja ovlada SN tehnologijom koju bismo kasnije mogli nuditi i drugim zemljama.

Saradnja na implementaciji ove tehnologije ostvarivala bi se i sa inostranim proizvođačima pre svega onih komponenata koje zbog svog ekološkog aspekta zahtevaju posebne i velike investicije.

## 2. PRIMENA

### STACIONARNIH OLOVNIH INDUSTRIJSKIH BATERIJA SN SISTEMA

Akumulatori i baterije 3SN – 36 predviđeni su za kompletiranje baterija koje se koriste kao izvori jednosmerne struje na elektranama i podstanicama, telefonskim i telegrafskim vezama, u sistemima za distribuciju i prenos električne energije, na železnici za automatske pružne blokove itd.

Baterije se eksploatišu u režimu stalnog dopunjavanja baterija a u havarijskom periodu one obezbeđuju svu potrošnju u mreži jednosmerne struje. Posebna pogodnost je znatno niža cena od nikel-kadmijum akumulatora za iste namene.

Uopšte rečeno, osnovne oblasti primene stacionarnih olovnih industrijskih baterija SN sistema, kao izvora za snabdevanje električnom energijom su sledeće:

- Telefonske centrale -Napajanje telefonskih centrala;
- Instalacije sigurnosnog osvetljenja – Nužnog svetla ili napajanje APA uređaja;
- Električna kola zaštite i upravljanja – Na trafo-stanicama prenosa električne energije od 35/10 kVA pa naviše;
- Radarski sistemi – Napajanje protivgradnih radarskih stanica;
- Radio i TV predajnici – Napajanje radio i TV predajnika;
- Železnica;
  - Napajanje uređaja za upravljanje skretnicama;
  - Napajanje uređaja APP;

Tabela 1.

Dimenzije i težine akumulatora

| Tip     | Dimenzije u mm |            |            | Težina bez elektrolita (kg) | Količina elektrolita (litara) |
|---------|----------------|------------|------------|-----------------------------|-------------------------------|
|         | L (dužina)     | B (širina) | A (visina) |                             |                               |
| 3SN-36  | 241,0          | 155,3      | 94         | 13,2                        | 5,7                           |
| SN-72   | 82,0           | 241,0      | 34         | 7,5                         | 2,9                           |
| SN-108  |                |            |            | 9,5                         | 2,7                           |
| SN-144  | 123,5          | 241,0      | 60         | 12,4                        | 4,7                           |
| SN-180  |                |            |            | 14,5                        | 4,5                           |
| SN-216  | 1 106,0        | 245,0      | 39         | 18,9                        | 7,6                           |
| SN-288  |                |            |            | 23,3                        | 7,2                           |
| SN-360  | 127,0          | 245,0      | 57         | 28,8                        | 9,0                           |
| SN-432  | 168,0          |            |            | 74                          | 34,5                          |
| SN-504  |                | 37,8       | 12,6       |                             |                               |
| SN-576  | 209,5          | 209,5      | 115        | 45,4                        | 16,6                          |
| SN-648  |                |            |            | 48,6                        | 16,2                          |
| SN-720  | 245,0          | 230,0      | 135        | 54,4                        | 18,0                          |
| SN-864  |                | 271,5      | 177        | 64,5                        | 21,6                          |
| SN-1008 | 245,0          | 313,0      | 218        | 74,2                        | 25,2                          |
| SN-1152 |                | 354,5      | 260        | 84,0                        | 28,8                          |

- Napajanje uređaja APB;
- Luke i aerodromi – Signalizacija i osvetljenje;
- Naftne platforme – Signalizacija i osvetljenje;
- Pomorski i rečni saobraćaj – Osvetljenje prostora;
- Vojna primena;
- Napajanje radarskih sistema i
- Napajanje računarskih sistema itd.

Stacionarne olovne industrijske baterije SN sistema stižu sve širu primenu, naročito u toku poslednje decenije.

U pogledu oblasti primene i mogućnosti plasmana, može se reći da ovi akumulatori imaju mesto u onim primenama gde uspešno mogu odgovoriti zahtevima u pogledu specifične energije po težini i zapremini, u pogledu radnog veka, pouzdanosti u radu i jednostavnosti održavanja i eksploatacije.

## 2.1. Tehnički podaci

- Kapacitet koji je naveden u tabeli 2, izračunat je za prve cikluse pri 10, 5, 3, i 1- no satnim režimom pražnjenja uz pridržavanje sledećih uslova:
  - srednja temperatura elektrolita u procesu pražnjenja 20 °C;
  - gustina elektrolita na početku pražnjenja 1,24 ±0,005 gr/cm<sup>3</sup> na temperaturi od 20 °C;
  - nivo elektrolita na 35 - 40 mm više od sigurnosnog štita, odnosno u intervalu max i min na kutiji i
  - konačan napon na 10, 5 i 3 - satnog pražnjenja 1,80 V za akumulator i 5,4 V za bateriju

- 3SN – 36, pri 1,05 i 0,25 - satnom pražnjenju 1,75 V za akumulator i 5, 25 V za bateriju 3SN-36.
- Dozvoljena struja punjenja akumulatora i baterija iznosi:

- do intenzivnog izdvajanja gasova 0, 25 C<sub>10</sub> i
- kod intenzivnog izdvajanja gasova 0, 05 C<sub>10</sub>

*Primedba:*

C<sub>10</sub> - nominalni kapacitet kod 10 - satnog režima pražnjenja do konačnog napona 1, 80 V i srednjoj temperaturi elektrolita u procesu pražnjenja 20 °C

- Nominalni napon akumulatora 2 V, baterije 3SN36 - 6 V;
  - Napon je u toku prvih dana posle završenog punjenja potpuno napunjenih akumulatora 2,06 V, baterije 3SN 36 - 6,18 V;
  - Akumulatori imaju hermetičko zatvaranje na mestu spoja poklopca sa kutijom, čepom i polnim izvodima i održavaju nadpritisak ili podpritisak u odnosu na atmosferski od 20 kPa (150 mm živinog stuba);
  - Akumulatori iz fabrike izlaze u vidu montiranih 2 V ćelija sa formiranim elektrodama bez elektrolita;
  - Akumulatori u suvom stanju bez elektrolita nemaju električnu provodljivost.
- Akumulatori se izrađuju u kutijama a baterije 3SN - 36 u mono-blokovima sa tri ćelije, od providne plastične mase.

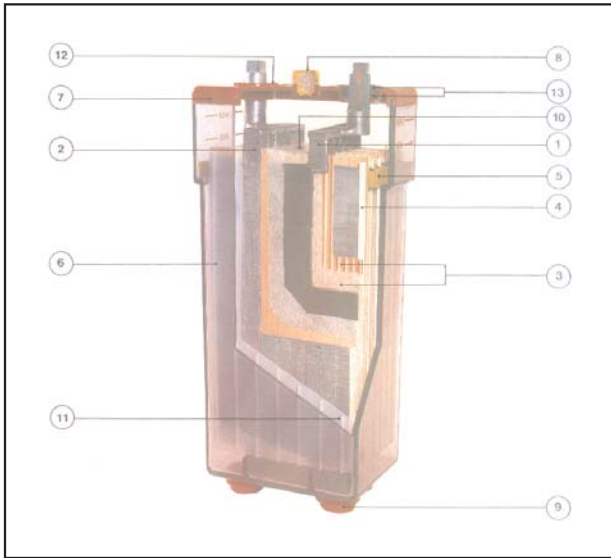
Akumulatori se sastoje od sloja elektroda, koji je smešten u kutiju sa zatvorenim poklopcem. Kao

Tabela 2

Električne karakteristike akumulatora

| Oznaka   | 10-satni   |                | 5-satni    |                | 3-satni    |                | 1-satni    |                | 0,5-satni  |                | 0,25-satni |                | 1-min      |
|----------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
|          | struja (A) | kapacitet (Ah) | struja (A) | kapacitet (Ah) | struja (A) | kapacitet (Ah) | struja (A) | kapacitet (Ah) | struja (A) | kapacitet (Ah) | struja (A) | kapacitet (Ah) | struja (A) |
| 3SN-36   | 4,6        | 46             | 8          | 40             | 11,5       | 34,5           | 24         | 24             | 35         | 17,5           | 42         | 10,5           | 65         |
| SN-72    | 9,3        | 93             | 16         | 80             | 23,0       | 69,0           | 48         | 48             | 70         | 35,0           | 84         | 21,0           | 130        |
| SN-108   | 13,9       | 139            | 24         | 120            | 34,4       | 103,5          | 72         | 72             | 105        | 52,5           | 126        | 81,5           | 195        |
| SN-144   | 18,6       | 186            | 32         | 160            | 46,0       | 138,0          | 96         | 96             | 140        | 70,0           | 168        | 42,0           | 260        |
| SN-180   | 23,2       | 232            | 40         | 200            | 57,5       | 172,5          | 120        | 120            | 175        | 87,5           | 210        | 52,5           | 325        |
| SN-216   | 27,8       | 278            | 48         | 240            | 69,0       | 207,0          | 144        | 144            | 210        | 105,0          | 252        | 63,0           | 390        |
| SN-288   | 35,5       | 355            | 59         | 295            | 88,5       | 265,5          | 182        | 182            | 246        | 123,0          | 314        | 78,5           | 489        |
| SN-360   | 44,5       | 445            | 74         | 370            | 111,0      | 333,0          | 228        | 228            | 308        | 154,0          | 394        | 98,5           | 614        |
| SN-432   | 53,5       | 535            | 89         | 445            | 133,7      | 401,1          | 274        | 274            | 371        | 185,0          | 474        | 118,5          | 738        |
| SN-504   | 62,5       | 625            | 104        | 520            | 156,2      | 448,6          | 320        | 320            | 433        | 216,5          | 554        | 138,5          | 862        |
| SN-576   | 71,5       | 715            | 119        | 595            | 178,7      | 536,1          | 361        | 361            | 496        | 248,0          | 634        | 158,5          | 986        |
| SN-648   | 80,5       | 805            | 134        | 670            | 201,2      | 603,6          | 412        | 412            | 558        | 279,0          | 714        | 178,5          | 1 110      |
| SN-720   | 89,0       | 890            | 148        | 740            | 222,5      | 667,5          | 456        | 456            | 617        | 308,5          | 790        | 197,5          | 1 228      |
| SN-864   | 107,0      | 1 070          | 178        | 890            | 267,5      | 802,5          | 548        | 548            | 742        | 371,0          | 950        | 237,5          | 1 476      |
| SN-1 008 | 125,0      | 1 250          | 208        | 1 040          | 312,5      | 937,5          | 641        | 641            | 867        | 433,5          | 1 110      | 277,5          | 1 725      |
| SN-1 152 | 143,0      | 1 430          | 238        | 1 190          | 375,5      | 1 072,5        | 733        | 733            | 992        | 496,0          | 1 268      | 317,0          | 1 973      |





Slika 1. Sastavni delovi SN akumulatora

1. Set pozitivne elektrode sačinjen od jedne ili više namaznih elektrodnih ploča međusobno povezanih polnim mostom na koji je zavaren polni izvod
2. Set negativne elektrode, analogne konstrukcije. Ima dodatne krajnje elektrodne ploče koje obezbeđuju homogenost električnog polja i iskorišćenje pune površine elektrode
3. Separator za odvajanje pozitivnih od negativnih elektrodnih ploča dvoslojne konstrukcije: - osnovni separator od rebrastog mikroporoznog PVC-a izvanrednih izolacionih svojstava, dodatna folija od staklenih vlakana kao pouzdana zaštita pozitivne ploče od elektrohemijske erozije i mogućeg kratkog spoja
4. Bočni izolator obezbeđuje dodatnu zaštitu krajeva elektrodnih ploča od mogućeg bočnog kratkog spoja
5. Izolacioni češalj (PVC) ukružuje set pozitivne elektrode i efikasno amortizuje mehaničke udare i vibracije
6. Kutija od providnog stiren akrilonitrila (SAN) veoma otporna na delovanje sumporne kiseline, ekstremnih temperatura, vibracija i mehaničkih udara; omogućava jednostavnu vizuelnu kontrolu stanja ćelije; dno kutije služi kao taložnik
7. Poklopac od obojenog SAN - a s ležištima za hermetizaciju polnih izvoda i otvorom za filter čep
8. Granulasti ili keramički filter čep propustljiv za gasove, ali ne i kapljice kiseline iz ćelije.
9. Ćelijski izolator sprečava da puzajuće struje koje bi se pojavile na zaprljanoj ili nakvašenoj površini kutije izazovu dozemni kratki spoj.
10. Zaštitna perforirana folija čuva separatore od povreda pri merenju; služi za zaštitu ćelija od kratkog spoja u slučaju upada stranog provodnog tela.
11. Slepa ploča centrira set elektroda u ćelijama koje u istom gabaritu imaju različite nominalne kapacitete
12. Prsten za označavanje polariteta; plavi-negativni pol; crveni - pozitivni pol; takođe maskira akumulatorsku masu
13. Akumulatorska masa zajedno sa gumenim prstenom hermetizuje ćeliju i onemogućava puzanje elektrolita u zonu kontakata spojnica-ćelija

elektrolit služi rastvor sumporne kiseline gustine  $1,240 \pm 0,005 \text{ gr/cm}^3$  sveden na temperaturu  $20^\circ \text{C}$ .

Slog elektroda se sastoji od pozitivnih i negativnih elektroda koje su spojene preko strujno provodnog češlja i polnog mosta sa pozitivnim i negativnim polnim izvodima i međusobno su odvojene vinil-hlorid separatorima i staklenim vlaknastim listovima.

Krajnje u bloku su negativne elektrode, čija je debljina za 1,3 mm manja od ostalih negativnih elektroda.

Elektrode u akumulatoru su namaznog tipa (pastirane).

Pozitivne elektrode na bočnim ivicama imaju bočna izbočenja koja služe za njihovo vešanje unutar kutije.

Na bočne ivice negativnih elektroda stavljani su izolatori.

Negativne elektrode se oslanjaju nožicama na donje delove prizme kutije.

Separatori su listovi koji gabaritno odgovaraju elektrodama. Separatori su po visini 15 mm viši od elektroda.

Poklopac kod akumulatora od SN-72 do SN - 504 ima 2 otvora za polne izvode, kod akumulatora od SN-576 do SN-1152 ima 4 otvora za polne izvode a slog elektroda svakog polariteta ima po dve stezaljke. U centru poklopca postoji otvor koji služi za nalivanje elektrolita, dolivanje destilovane vode, merenje temperature, nivoa i gustine elektrolita, potencijala elektroda a takođe za izlazak gasova iz akumulatora. Ovaj se otvor zatvara filterom - čepom.

Kod akumulatora od SN - 72 do SN - 1152 i kod baterija 3SN - 36 mesto spajanja kutije i poklopca se lepi.

Serijsko vezivanje akumulatora i baterija 3SN-36 u bateriju vrši se pomoću spojnica.

## 2.2. Označavanje i pakovanje

Na poklopcu ili zidovima svakog akumulatora i baterije 3SN - 36 obavezno su nanete oznake pri injektiranju ili bojom:

- a) znak preduzeća - proizvođača;
- b) oznaka akumulatora ili baterije 3SN - 36;
- v) znaci polariteta (+) i (-);
- g) datum proizvodnje (mesec i godina) i
- đ) minimalni i maksimalni nivo elektrolita.

## 2.3. Pravila mera bezbednosti

Kod montaže baterija i njenog dovodenja u radno stanje potrebno je pridržavati se utvrđenih pravila za bezbednost i zaštitu.

Radove koji su vezani za održavanje baterije vrše radnici koji su bili na obuci za tehniku bezbednosti i zaštitu.

Za pripremanje elektrolita (vodenog rastvora sumporne kiseline) priprema se posuda koja je otporna na delovanje sumporne kiseline (keramičke, ebonitne, drvene posude, posude obložene olovom) i u koju se prvo sipa voda a zatim, uz neprekidno mešanje, male količine sumporne kiseline.

Za pripremanje elektrolita radnici moraju imati suknenu, specijalnu odeću, zaštitne naočare, gume-kece, rukavice i čizme.

Kod preliivanja kiseline iz boce u drugu posudu, koristi se specijalni uređaj za pričvršćivanje i nagib boce.

Prenošenje boce sa kiselinom vrše dva radnika u drvenim sanducima ili u mreži sa ručkama. Zabranjuje se prenošenje boce sa kiselinom na leđima ili njihovo dizanje nad glavom.

Boce sa kiselinom se čuvaju u posebnim prostorijama u mrežama. Boce moraju biti dobro zatvorene i moraju imati natpis „Kiselina”.

Prolivenu kiselinu na pod treba spirati vodom ili odmah posuti peskom ili piljevinom, mešati i odmah ukloniti.

Ukoliko slučajno zapljusnu ili se prospu kapi kiseline na kožu ili odeću, one se spiraju mlazom vode; preostali tragovi se ispiraju 10 % rastvorom sode ili 3 % rastvorom amonijaka i ponovo se ispira vodom.

U prostorijama gde su postavljeni akumulatori i baterije i gde se vrši njihovo testiranje, zabranjuje se upotreba otvorenog plamena ili upotreba instrumenata koji varniče.

Za vreme dovođenja akumulatora i baterija u radno stanje i kod njihovog punjenja, prostorija mora biti provetrena ili mora biti uključena ventilacija.

U radu sa akumulatorima i baterijama primenjuju se mere bezbednosti od slučajnog dodirivanja nedozvoljenih delova koji se nalaze pod naponom.

### 3. PRIPREME ZA RAD I DOVOĐENJE AKUMULATORA I BATERIJA 3SN – 36 U RADNO STANJE

#### 3.1. Montaža baterija

Akumulatori i baterije 3SN-36 se otpakuju, obrišu od prašine i podvrgavaju spoljnom pregledu.

Akumulatori i baterije 3SN-36 sa defektnim posudama ili poklopcima ne koriste se za kompletiranje baterija.

Pregledani akumulatori i baterije 3SN-36 spajaju se u bateriju spojnicama pomoću navrtki ili lemljenjem u skladu sa montažnom šemom.

#### 3.2. Pripremanje elektrolita

Elektrolit se priprema od akumulatorske sumporne kiseline i destilovane vode.

*Primedba:*

Dozvoljava se korišćenje čiste kišnice ili vode posle topljenja snega.

Tabela 3

Dozvoljeni dodaci

| Naziv primese                                     | mg / l |
|---|--------|
| Čvrsti ostatak                                    | 30,0   |
| Ostatak od kaljenja                               | 20,0   |
| Željezo   | 0,2    |
| Bakar   | 0,2    |
| Hlor  | 3,0    |
| Kalcijumov i magnezijumov oksid                   | 10,0   |
| Manganov oksid                                    | 0,1    |
| Potrošnja 0,01 N Kmn O <sub>2</sub> za oksidaciju |        |
| Organskih materija ml                             | 10,0   |

Za nalivanje akumulatora priprema se elektrolit gustine  $1,210 \pm 0,005$  gr/cm<sup>3</sup> svedeno na temperaturu 20 °C.

Pripremljen elektrolit dobro se meša čistim drvenim veslom ili mlazom komprimovanog vazduha.

Posle hlađenja elektrolita do 20 °C i ponovnog mešanja, meri se njegova gustina.

U slučaju potrebe vrši se korekcija gustine davanjem jake kiseline ili vode.

Za korekciju gustine elektrolita, koja je izmerena na temperaturi koja se razlikuje od 20 °C, koristi se tabela 4, gde su navedene gustine elektrolita u zavisnosti od temperature (početna temperatura se smatra 20 °C)

Treba biti siguran da je pripremljenog elektrolita dovoljno za nalivanje svih akumulatorskih baterija

Nalivanje akumulatora elektrolitom.

Pre početka nalivanja sa svih akumulatora skidaju se ventilacioni filteri - čepovi.

#### 4. ZAKLJUČAK:

*Navedeni rad prikazuje osnovne eksploatacione osobine olovnih akumulatora tipa SN i njihovu zastupljenost u EPS-u, kao jednom od važnih sistema (pored Železnice Srbije), a imajući u vidu da na ovim prostorima ne postoji fabrika akumulatora ovog tipa, postoji potreba istraživanja tehničko-ekonomske opravdanosti izgradnje fabrike, radi efikasnog funkcionisanja vitalnih sistema Srbije.*

**Napomena:**

*Navedeni rad je deo podprojekta „Mogućnosti reaktiviranja fabrike stacionarnih olovnih industrij-*

## Gustine elektrolita u zavisnosti od temperature

| Gustina, gr / cm <sup>3</sup><br>Temperatura, °C |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10   | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| 1, 160   | 1, 157 | 1, 154 | 1, 150 | 1, 147 | 1, 143 | 1, 140 | 1, 136 | 1, 133 |
| 1, 190   | 1, 187 | 1, 184 | 1, 180 | 1, 177 | 1, 173 | 1, 170 | 1, 166 | 1, 163 |
| 1, 200   | 1, 197 | 1, 194 | 1, 190 | 1, 187 | 1, 183 | 1, 180 | 1, 176 | 1, 173 |
| 1, 210   | 1, 207 | 1, 204 | 1, 200 | 1, 197 | 1, 193 | 1, 190 | 1, 186 | 1, 183 |
| 1, 225   | 1, 222 | 1, 219 | 1, 215 | 1, 212 | 1, 208 | 1, 205 | 1, 201 | 1, 198 |
| 1, 235   | 1, 232 | 1, 229 | 1, 225 | 1, 222 | 1, 218 | 1, 215 | 1, 211 | 1, 208 |
| 1, 245   | 1, 242 | 1, 239 | 1, 235 | 1, 232 | 1, 228 | 1, 225 | 1, 221 | 1, 218 |
| 1, 250   | 1, 247 | 1, 244 | 1, 240 | 1, 237 | 1, 233 | 1, 230 | 1, 226 | 1, 223 |
| 1, 255   | 1, 252 | 1, 249 | 1, 245 | 1, 242 | 1, 238 | 1, 235 | 1, 231 | 1, 228 |
| 1, 260   | 1, 257 | 1, 254 | 1, 250 | 1, 247 | 1, 243 | 1, 240 | 1, 236 | 1, 233 |
| 1, 265   | 1, 262 | 1, 259 | 1, 255 | 1, 252 | 1, 248 | 1, 245 | 1, 241 | 1, 238 |
| 1, 270   | 1, 267 | 1, 264 | 1, 260 | 1, 257 | 1, 253 | 1, 250 | 1, 246 | 1, 243 |
| 1, 275   | 1, 272 | 1, 269 | 1, 265 | 1, 262 | 1, 258 | 1, 255 | 1, 251 | 1, 248 |

skih baterija SN sistema", u okviru projekta „Studija izvodljivosti restrukturiranja odabranih kapaciteta vojne industrije" koju finansira Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Srbije u sklopu programa istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2005-2007.

## 5. PRILOG

### PREGLED STACIONARNIH SN BATERIJA U ELEKTROPRIVREDI SRBIJE

U Elektroprivredi Srbije olovnih stacionarnih baterija SN tipa ima ukupno 250 ili izraženo preko Ah ima ih 2 889 462 Ah.

#### 5.1. Elektroistok

Beograd 1 - 220 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1985, (2 x 110 V).  
 Beograd 1 - 220 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1986, (2 x 110 V).  
 Beograd 2 - 220 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).  
 Beograd 2 - 220 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1987, (1 x 110 V).  
 Kraljevo 1 - 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1990, (1 x 110 V).  
 Sevojno - 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1988, (1 x 110 V).  
 Bor 1 - 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1983, (1 x 110 V).  
 Niš 1 - 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1986, (1 x 110 V).  
 Arandelovac - 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1991, (2 x 55 V).

Beograd 3 - 220 V, 445 Ah (SN-360), Srebrenica 1990, (3 x 110 V).  
 Kruševac 1 - 220 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1990, (2 x 110 V).  
 Kruševac 1 - 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1985, (1 x 110 V).  
 Beograd 4 - 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Pančevo 1 - 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Pančevo 1 - 110 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1992, (2 x 55 V).  
 Pančevo 1 - 55 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1993, (1 x 55 V).  
 Srbobran - 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).  
 Leskovac 1 - 55 V, 232Ah (SN-180), Srebrenica 1986, (1 x 55 V).  
 Smederevo 1 - 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Valjevo 1 - 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1986, (1 x 55 V).  
 Čačak 1 - 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1986, (2 x 55 V).  
 Đakovica 1 - 55 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Vranje 1 - 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Zaječar 1 - 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1985, (2 x 55 V).  
 Novi Pazar 1 - 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Beograd 6 - 55 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1986, (3 x 55 V).

Madenovac- 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1989, (1 x 55 V).  
 Smederevska Palanka - 55 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1989, (1 x 55 V).  
 Raška - 55 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1989, (1 x 55 V).  
 Beograd 8 - 220 V, 445 Ah (SN-360), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).  
 Bor 1 - 220 V, 650 Ah (SN-504), Srebrenica 1991, (3 x 110 V).  
 Majdanpek 2 - 55 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1985, (1 x 55 V).  
 Prokuplje - 55 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1986, (1 x 55 V).  
 Bor 3 - 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Požega - 220 V, 371 Ah (SN-288), Srebrenica 1991, (2 x 110 V).  
 Požega - 220 V, 371 Ah (SN-288), Srebrenica 1990, (1 x 110 V).  
 Novi Sad 3 - 220 V, 371 Ah (SN-288), Srebrenica 1990, (3 x 110 V).  
 Pančevo 2 - 220 V, 504 Ah (SN-400), Srebrenica 1991, (2 x 110 V).  
 Trstenik - 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1986, (1 x 55 V).  
 Niš 3 - 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).  
 Niš 2 - 48 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1990, (3 x 24 V).  
 Niš 2 - 220 V, 462 Ah (SN-360), Srebrenica 1991, (2x 110 V).  
 MRC Niš - 110 V, 462 Ah (SN-360), Srebrenica 1988, (3 x 110 V).  
 Gornji Milanovac - 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1986, (2 x 55 V).  
 Sremska Mitrovica - 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).  
 Kragujevac 2 - 220 V, 445 Ah (SN-360), Srebrenica 1991, (2 x 110 V).  
 Kragujevac 2 - 220 V, 371 Ah (SN-288), Srebrenica 1994, (2 x 110 V).  
 Beograd 17 - 220 V, 292 Ah (SN-180), Srebrenica 1991, (2 x 110 V).  
 Osečina - 110 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1991, (2 x 55 V).  
 Nova Varoš - 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1984, (2 x 55 V).  
 Bosilegrad - 110 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1985, (2 x 55 V).  
 Veliko Gradište - 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1987, (3 x 55 V).  
 Valjevo 3 - 220 V, 560 Ah (SN-504), Srebrenica 1987, (3 x 110 V).

Pirot 2 - 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1991, (2 x 55 V).  
 Pirot 2 - 110 V, 371 Ah (SN-288), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Velika Plana - 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 MRC Obilić - 220 V, 836 Ah (SN-648), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).

Σ 1 572 553 Ah

## 5.2. Panonske elektrane

TE-TO Novi Sad 260 V, 720 Ah (SN-720), Srebrenica 1982, (2 x 106+24 V).  
 TE-TO Zrenjanin 220 V, 1 020 Ah (SN-1020), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).  
 TE-TO Zrenjanin 24 V, 365 Ah (SN-355), Srebrenica 1988, (2 x 12 V).  
 TE-TO Zrenjanin 24 V, 1 250 Ah (SN-1152), Srebrenica 1988, (2 x 12 V).  
 TE-TO Zrenjanin 48 V, 1 430 Ah (SN-1440), Srebrenica 1988, (2 x 24 V).  
 TE-TO Zrenjanin 48 V, 139 Ah (SN-139), Srebrenica 1988, (2 x 24 V).  
 TE-TO Zrenjanin 24 V, 139 Ah (SN-139), Srebrenica 1988, (2 x 12 V).

Σ 264 504 Ah

## 5.3. Drinske elektrane

Reverzibilna elektrana Bajina Bašta 24 V, 93 Ah (SN-93), Srebrenica 1987, (2 x 12 V).

Σ 1 116 Ah

## 5.4. Limske hidroelektrane

Kokin Brod 220 V, 139 Ah (SN-139) SN-108 F, Srebrenica 1989, (2 x 110 V).  
 Kokin Brod 24 V, 139 Ah (SN-139) SN-108 F, Srebrenica 1990, (1 x 12 V).  
 Potpeć 220 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1992, (1 x 110 V).  
 Potpeć 220 V, 186 Ah (SN-144), Srebrenica 1992, (2 x 110 V).  
 Potpeć 48 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1992, (2 x 24 V).

Σ 83 342 Ah

## 5.5. Termoelektrana Kostolac

24 V, 1 488 Ah (SN-1152), Srebrenica 1994, (2 x 12 V).  
 24 V, 1 116 Ah (SN-854), Srebrenica 1994, (2 x 12 V).

Σ 31 248 Ah

## 5.6. TE Kolubara

Veliki Crljeni 24 V, 576 Ah (SN-504), Srebrenica 1989, (2 x 12 V).

Σ 6 912 Ah

## 5.7. TE Obrenovac - B

TE Obrenovac - B, 24 V, 1340 Ah (SN-1050), Srebrenica 1989, (2 x 12 V).

Σ 16 080 Ah

## 5.8. Termoelektrana Morava

Svilajnac 220 V, 36 Ah (SN-36), Srebrenica 1994, (2 x 110 V).

Σ 3 960 Ah

## 5.9. Rudarski basen Kolubara

Vreoci - Mokra separacija 220 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (2 x 110 V).

Vreoci - Nova Sušara 220 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (1 x 110 V).

Vreoci - Otpadne vode 110 V, 46 Ah (SN-46), Srebrenica 1988, (1 x 55 V).

Σ 53 570 Ah

## 5.10. Đerdap 1 i 2

HE Đerdap 2, 220 V, 460 Ah (SN-360), Srebrenica 1988, (2 x 110+10 V).

HE Đerdap 2, 220 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1984, (2 x 110+10 V).

PAP Lisina, 220 V, 558 Ah (SN-432), Srebrenica 1986, (2 x 110 V).

PAP Lisina, 48 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1986, (2 x 24 V).

HE Pirot 48 V, 240 Ah (SN-216), Srebrenica 1989, (2 x 24 V).

Σ 127 492 Ah

## 5.11. Elektrodistribucija Beograd

Železnik, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1994, (1 x 55 V).

Grčića Milenka, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1993, (1 x 55 V).

Galovica, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).

Zemun, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).

Vrbas, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1990, (1 x 55 V).

Resnik, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).

Tehnički fakultet, 110 V, 378 Ah (SN-288), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).

Neimar, 110 V, 378 Ah (SN-288), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).

Pionir, 110 V, 378 Ah (SN-288), Srebrenica 1992, (1 x 55 V).

Blok 20, 110 V, 378 Ah (SN-288), Srebrenica 1991, (1 x 55 V).

Blok 20, 110 V, 378 Ah (SN-288), Srebrenica 1991, (2 x 55 V).

Σ 108 120 Ah

## 5.12. Elektrosrbija Kraljevo

TS Šabac 5, 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1983, (2 x 55 V).

TS Bogatić, 110 V, 378 Ah (SN-288), Srebrenica 1985, (1 x 55 V).

TS HE Raška, 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1985, (2 x 55+5 V).

TS Paraćin 1, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).

TS Paraćin 2, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).

TS Ljubovija, 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1986, (1 x 55+5 V).

TS Kruševac-Lučina, 110 V, 80 Ah (SN-80), Srebrenica 1986, (2 x 55+5 V).

TS Kruševac 3, 110 V, 80 Ah (SN-80), Srebrenica 1990, (1 x 55+5 V).

Σ 88 220 Ah

## 5.13. Elektrodistribucija Užice

Nova Varoš 2, 110 V, 80 Ah (SN-108), Srebrenica 1992, (2 x 55 V).

Σ 4 400 Ah

## 5.14. Elektrodistribucija Niš

Niš 110 V, 180 Ah (SN-180), Srebrenica 1989, (1 x 55+5 V).

Niš 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1985, (2 x 55+5 V).

Σ 125 190 Ah

## 5.15. Elektro voj vodina No vi Sad

DC Novi Sad, 110 V, 1020 Ah (SN-1020), Srebrenica 1997, (2 x 55 V).

Novi Sad 6, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).

Novi Sad 7, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).

Novi Sad - Industrija, 110 V, 232 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).

Subotica 1, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Subotica 1a, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Subotica 2, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Subotica 4, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Subotica -Kanjiža, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Bačka Topola 1, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Bačka Topola 2, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Subotica-Centar, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Pančevo-Bela Crkva, 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Vršac 2, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Ruma 1, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Ruma 2, 110 V, 186 Ah (SN-180), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Ruma-Pećinci, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Ruma-Indija, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Ruma-Stara Pazova, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Sremska Mitovica 1, 110 V, 355 Ah (SN-288), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Sremska Mitrovica-Šid, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Kikinda-Centar, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Sombor 1, 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Sombor-Apatin, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Sombor-Crvenka, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Sombor-Odžaci, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1988, (2 x 55 V).  
 Senta 1a, 110 V, 278 Ah (SN-216), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).

Senta 2, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Senta -Ada, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Vrbas, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Vrbas 2, 110 V, 139 Ah (SN-216), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Vrbas-Kula, 110 V, 139 Ah (SN-108), Srebrenica 1990, (2 x 55 V).  
 Zrenjanin 4, 110 V, 365 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Zrenjanin-Nova Crnja, 110 V, 365 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).  
 Zrenjanin - Novi Bečej, 110 V, 365 Ah (SN-288), Srebrenica 1989, (2 x 55 V).

Σ 502 755 Ah

## 6. LITERATURA

- [1] H. A. Kiehne und 11 Mitautoren: BATTERIEN - GRUNDLAGEN UND THEORIE, AKTUELLER TECHNISCHER STAND UND ENTWICKLUNGSTENDENZEN, Expert-Verlag, 2000, Deutschland
- [2] VERÖFFENTLICHUNGEN AUS DER VARTA AKTIENGESELLSCHAFT, Hannover, 1972, Deutschland
- [3] Dr Tomislav Grozdić, HEMIJSKI IZVORI STRUJE U SAVREMENOJ ELEKTRONICI, Čigoja štampa Beograd, 2000.
- [4] Mr Predrag M. Vuletić, AKUMULATORSKE BATERIJE U SISTEMU ELEKTROPRIVREDE SRBIJE, Časopis Elektrodistribucija br. 3 Beograd, 1999.
- [5] Mr Predrag M. Vuletić, PRILOG ISTRAŽIVANJU PRIMENE HEMIJSKIH IZVORA STRUJE U TRAFOSTANICAMA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE, Naučno-stručno sa većovanje Energetika Jugosla vije ENYU 99, Zlatibor, 1999.
- [6] Nebojša Mihailović, dipl. ing. tehn., PONAŠANJE POZITIVNE ELEKTRODE OLOVNOG AKUMULATORA, diplomski rad citiran u časopisu „Izvori električne energije” br 4/94 Beograd, 1994.

Rad je primljen u uredništvo 14. 09. 2007. godine



**Predrag M. Vuletić** je rođen 1951. godine. Zaposlio se u Krušik-Akumulatorima 1974. godine kao mašinski tehničar - dispečer proizvodnje u operativnoj pripremi pri Sektoru proizvodnje.

1984. godine završio Tehnički fakultet i radio kao šef konstrukcije alata pri Tehničkom sektoru i kao koordinator razvoja novih programa pri Razvojnem sektoru.

1996. godine odbranio magistarski rad na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu i od 1998. godine radi kao rukovodilac službe marketinga pri Komercijalnom sektoru Krušik-

Akumulatora

Istraživačko-stručno veće Mašinskog fakulteta u Beogradu donelo odluku br.123/3 od 2. 12. 2004. godine o izboru u zvanje istraživač-saradnik.

Bio recenzent više naučno-istraživačkih projekata Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine u okviru „Takmičenja za najbolju tehnološku inovaciju 2005. godine” kao i za 2006.

Izabran za rukovodioca podprojekta „Industrijske olovne stacionarne baterije SN tipa”, koji se radi u okviru projekta TD 7041 „Studija izvodljivosti restrukturiranja odabranih kapaciteta vojne industrije” 2005-2007. godine.



**Mihailović Nebojša** je rođen 1965. godine. Završio Tehnološko-metalurški fakultet, smer

elektro hemija. Radi u Krušik-Akumulatorima od 1990. godine kao projektant elektro-hemij-

skih ispitivanja akumulatora.

---

Branislav A. Bošković

# Ostvarenje elektroenergetskog bilansa elektroprivreda Srbije i Crne Gore u 2006. godini

Stručni rad  
UDK: 621.3.05

---

*Rezime:*

Rad prezentira realizaciju elektroenergetskog bilansa za 2006. godinu elektroprivreda Srbije i Crne Gore kroz prikaz sledećeg: proizvodnje i potrošnje električne energije, međusobne razmene električne energije, nabavke i isporuke električne energije drugim elektroenergetskim sistemima, stanja akumulacija hidroelektrana, otkrivke uglja, deponija uglja za termoelektrane, i upoređuje ove veličine sa ostvarenjem u 2005. godini.

**Ključne riječi:** elektroenergetski bilans elektroprivrede Srbije i elektroenergetski bilans elektroprivrede Crne Gore

---

*Abstract:*

REALIZATION OF THE POWER BALANCE OF SERBIA AND MONTENEGRO IN 2006

The paper deals with the realization of the electric power balance for 2006 in Serbia and Montenegro, by presenting the following: electric power production and consumption, republican electric power interchange, electric power supply from and delivery to other electric power systems, hydro plant reservoirs, coal overburden layers removal, coal deposits for thermal power plants, with a review of the realization in 2005.

**Key words:** electric power balance of Serbia and Montenegro

---

## 1. UVOD

Elektroprivrednu delatnost u Srbiji obavljaju: Javno preduzeće za proizvodnju električne energije, distribuciju električne energije i upravljanje distributivnim sistemom i trgovinu električnom energijom, koje posluje pod firmom Javno Preduzeće „Elektroprivreda Srbije” sa potpunom odgovornošću i sedištem u Beogradu, čiji je skraćeni naziv JP „EPS” sa p.o. (u daljem tekstu: EPS) i Javno preduzeće „Elektromreža Srbije” sa potpunom odgovornošću i sedištem u Beogradu, čiji je skraćeni naziv JP „EMS” sa p.o. (u daljem tekstu: EMS). Javna preduzeća su osnovana zakonom o elektroprivredi

(„Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 94/2004) sa izmenama i dopunama.

Elektroprivrednu delatnost u Crnoj Gori obavlja:

Javno elektroprivredno preduzeće za proizvodnju, prenos, nabavku i distribuciju električne energije, koje posluje pod firmom „Elektroprivreda Crne Gore” sa sedištem u Nikšiću (u daljem tekstu: EPCG) osnovano Zakonom o energetici („Službeni list SRCG” br. 16/90) sa izmenama i dopunama. Odlukom Upravnog odbora ovog preduzeća, 18. marta 1998. godine ovo preduzeće je transformisano u Elektroprivredu Crne Gore A.D.

---

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el. – Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, 11 000 Beograd, Balkanska 13



Saradnja između ove dve elektroprivrede regulisana je Ugovorom o dugoročnoj poslovnotehničkoj saradnji, koji je zaključen marta 1991. godine, sa izmenama i dopunama iz 2006. godine.

## 2. ELEKTROPRIVREDA SRBIJE

### 2.1. Proizvodnja električne energije

U 2006. godini, energetske bilansima elektroprivrede Srbije predviđena je:

- proizvodnja iz sopstvenih izvora 35 705 GWh (HE 10 584 GWh, TE 25 121 GWh) i
- nabavka električne energije 2 453 GWh (i od EPCG).

Ukupna proizvodnja električne energije u Republici Srbiji je iznosila **38 561,6 GWh (28,4 % iz HE a 71,6 % iz TE)**, dok su nabavke električne energije od drugih EES-a (uključujući i od EPCG) iznosile **2 370,1 GWh**.

Plan proizvodnje iz sopstvenih izvora je veći za **8,0 %**. HE su svoj plan ostvarile sa **103,6 %** a TE su ostvarile sa **109,9 %** plana.

Nabavka električne energije (uključujući i od EPCG) je manja za **3,4 %** od plana.

Ukupno raspoloživa električna energija je bila za **7,3 %** veća od plana za 2006. godinu.

Kada se prave poređenja raspoložive električne energije u 2006. godini u odnosu na 2005. godinu, onda su odnosi sledeći:

- sopstvena proizvodnja je manja za **0,1 %**, pri čemu je proizvodnja HE manja za **9,0 %** a TE veća za **3,9 %**;
- nabavka električne energije (uključujući i od EPCG) je veća za **15,2 %**;
- raspoloživa električna energija je veća za **0,7 %**.

Svi gore navedeni podaci dati su u tabeli 1. i na slici 1.

#### **Karakteristične proizvodnje** na pragu elektrana:

- najveća mesečna proizvodnja je bila **3 896,0 GWh** i to u **januaru** 2006. godine, tog meseca HE su proizvele **1 152,1 GWh**, a TE **2 743,9 GWh** (najveća mesečna proizvodnja u 2005. godini je bila 3 880,5 GWh);
- najveća mesečna proizvodnja HE je bila u **martu** 2006. godine i iznosila je **1 340,2 GWh** (najveća mesečna proizvodnja HE u 2005. godini je bila 1 260,5 GWh);
- najveća mesečna proizvodnja TE je bila u **decembru** 2006. godine i iznosila je **3 015,9 GWh** (najveća mesečna proizvodnja TE u 2005. godini je bila 2 804,8 GWh);

- najveća dnevna proizvodnja je bila **09. marta** 2006. godine i iznosila je **141,0 GWh**; tog dana HE su proizvele 50,4 GWh, a TE 90,5 GWh (najveća dnevna proizvodnja u 2005. godini je bila 144,9 GWh);

- najveća dnevna proizvodnja HE je bila **9. marta** 2006. godine i iznosila je **50,4 GWh** (najveća dnevna proizvodnja HE u 2005. godini je bila 51,5 GWh);

- najveća dnevna proizvodnja TE je bila **6. februara** 2006. godine i iznosila je **103,7 GWh** (najveća dnevna proizvodnja TE u 2005. godini 103,6 GWh);

- prosečna dnevna proizvodnja na godišnjem nivou u 2006. godini je iznosila **105,7 GWh** (planirana 97,8 GWh), (dok je u 2005. godini ostvarena prosečna dnevna proizvodnja iznosila 105,8 GWh).

### 2.2. Potrošnja električne energije

Ukupne potrebe potrošača električne energije su iznosile **38 639,9 GWh**, dok su isporuke drugim EES (uključujući i EPCG) iznosile **2 291,9 GWh**.

Plan potrošnje domaćih potrošača električne energije je ostvaren sa **104,4 %**. Isporučka električne energije drugim EES (uključujući i EPCG) je ostvarena sa **196,9 %**, plana (u odnosu na 2005. godinu to je 88 %). Ukupan plasman je iznosio **107,3 %** plana. U tabeli 2. i na slici 4. imamo prikazano kakvo je učešće potrošača električne energije. Vidi se da nam direktni potrošači nisu ispunili plan za **1,6 %** (potrošili su električne energije više nego 2005. godine za **11,1 %**). Distributivna potrošnja je **102,9 %** od plana, i ista ima rast od **2,0 %** u odnosu na 2005. godinu. Gubici električne energije u prenosu su veći od planiranih za **30,0 %** ali su u odnosu na 2005. godinu manji za **9,0 %**. Na slici 2. prikazana je prosečna potrošnja električne energije bruto konzuma (bez pumpanja), dok su na slici 3. prikazani uporedno mesečna proizvodnja i bruto konzum iz čega se vidi da je EES EPS-a imao veći konzum od proizvodnje tokom januara i decembra 2006. godine.

#### **Karakteristične potrošnje** električne energije:

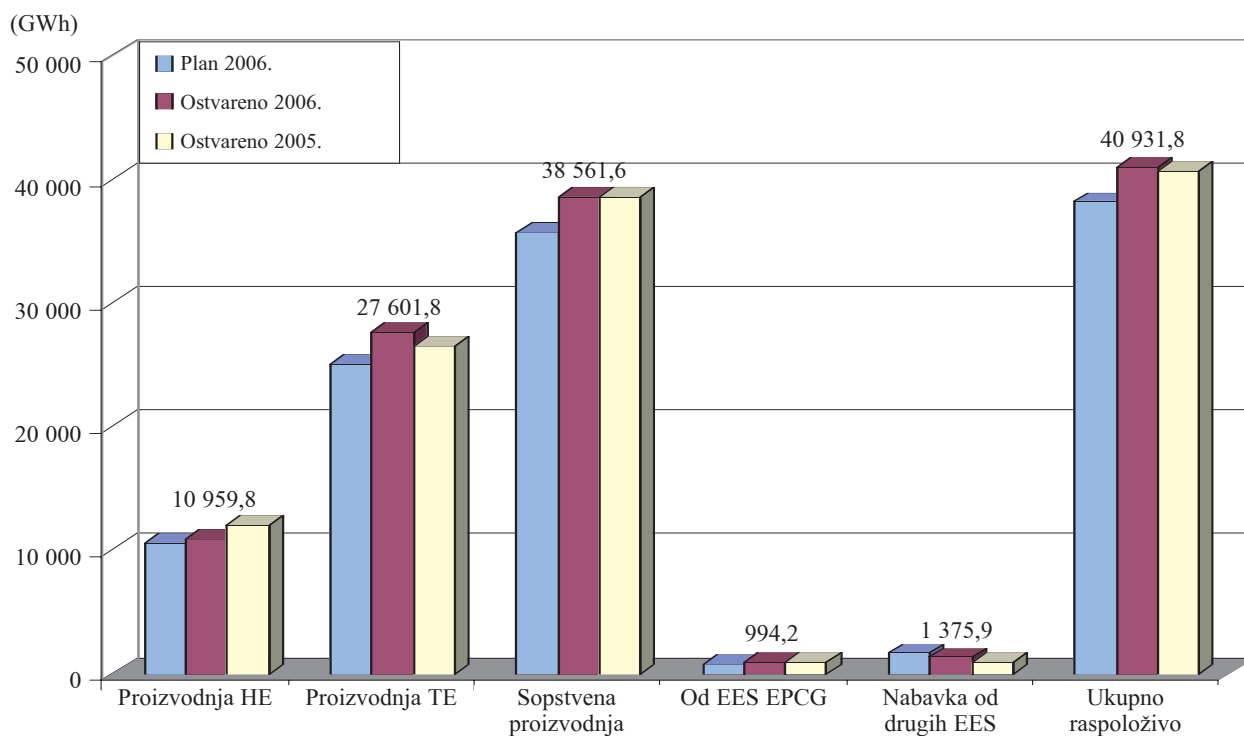
- najveća mesečna potrošnja je bila u **januaru** 2006. godine i iznosila je **4 070,9 GWh**, bez pumpanja (najveća u 2005. godini je bila 3 992,8 GWh);

- najveća dnevna potrošnja je bila **26. januara** 2006. godine i iznosila je **150,6 GWh**, pri minimalnoj dnevnoj temperaturi tog dana u Beogradu od minus **11,8** stepena Celzijusa (najveća dnevna potrošnja 09. februara u 2005. godini je bila 148,0 GWh, pri temperaturi od minus 1,5 stepena Celzijusa);

Tabela 1.

## Ostvarenje bilansa proizvodnje (na pragu elektrana) i nabavki električne energije EES-a Srbije

| Raspoloživo                  | 2006. godina       |                    | Ostvareno 2006./<br>Planirano 2006.<br>(%) | 2005. godina<br>Ostvareno<br>(GWh) | Ostvareno 2006./<br>Ostvareno 2005.<br>(%) |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------------------|--|
|                              | Planirano<br>(GWh) | Ostvareno<br>(GWh) |  |                                    |  |
|                              |                    |                    | (2/1)                                      |                                    | (2/4)                                      |
|                              | (1)                | (2)                | (3)  | (4)                                | (5)  |
| Proizvodnja HE               | 10 584             | 10 959,8           | 103,6                                      | 12 043,0                           | 91,0                                       |
| Proizvodnja TE               | 25 121             | 27 601,8           | 109,9                                      | 26 564,8                           | 103,9                                      |
| <b>Sopstvena proizvodnja</b> | <b>35 705</b>      | <b>38 561,6</b>    | <b>108,0</b>                               | <b>38 607,8</b>                    | <b>99,9</b>                                |
| Nabavka od EES EPCG          | 762                | 994,2              | 130,5                                      | 1 024,4                            | 97,1                                       |
| Nabavka od drugih EES        | 1 691              | 1 375,9            | 81,4                                       | 1 032,4                            | 133,3                                      |
| <b>Ukupno raspoloživo</b>    | <b>38 158</b>      | <b>40 931,8</b>    | <b>107,3</b>                               | <b>40 755,7</b>                    | <b>100,7</b>                               |



Slika 1. Ostvarenje EEB EPS-a

Tabela 2.

## Ostvarenje bilansa potrošnje i isporuka električne energije EES EPS-a

| Plasman                    | 2006. godina       |                    | Ostvareno 2006./<br>Planirano 2006.<br>(%) | 2005. godina<br>Ostvareno<br>(GWh) | Ostvareno 2006./<br>Ostvareno 2005.<br>(%) |
|----------------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------------------|--|
|                            | Planirano<br>(GWh) | Ostvareno<br>(GWh) |  |                                    |  |
|                            |                    |                    | (2/1)                                      |                                    | (2/4)                                      |
|                            | (1)                | (2)                | (3)  | (4)                                | (5)  |
| Direktni potrošači         | 1 668              | 1 641,7            | 98,4                                       | 1 477,5                            | 111,1                                      |
| Distribucije (bruto)       | 33 705             | 34 672,2           | 102,9                                      | 34 000,6                           | 102,0                                      |
| Gubici u prenosu           | 1 134              | 1 474,3            | 130,0                                      | 1 620,8                            | 91,0                                       |
| Pumpanje PAP Lisine        | 74                 | 100,2              | 135,4                                      | 97,9                               | 102,3                                      |
| Pumpanje RHE Bajina Bašta  | 413                | 751,5              | 182,0                                      | 864,5                              | 86,9                                       |
| <b>Sopstvena potrošnja</b> | <b>36 994</b>      | <b>38 639,9</b>    | <b>104,4</b>                               | <b>38 061,3</b>                    | <b>101,5</b>                               |
| Isporuka za EPCG           | 1 071              | 1 241,9            | 116,0                                      | 1 285,4                            | 96,6                                       |
| Isporuka drugim EES        | 93                 | 1 050,0            | 1 129,0                                    | 1 317,9                            | 79,7                                       |
| <b>Ukupan plasman</b>      | <b>38 158</b>      | <b>40 931,8</b>    | <b>107,3</b>                               | <b>40 664,7</b>                    | <b>100,7</b>                               |

- najveća srednja satna snaga je bila **26. januara 6 940 MW** u 18 h (najveća u 2005. godini je bila 6 867 MW);
- prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2006. godini, bez energije za pumpanje je iznosila **101,7 GWh** (planirana 100,0 GWh), (prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2005. godini 100,4 GWh).

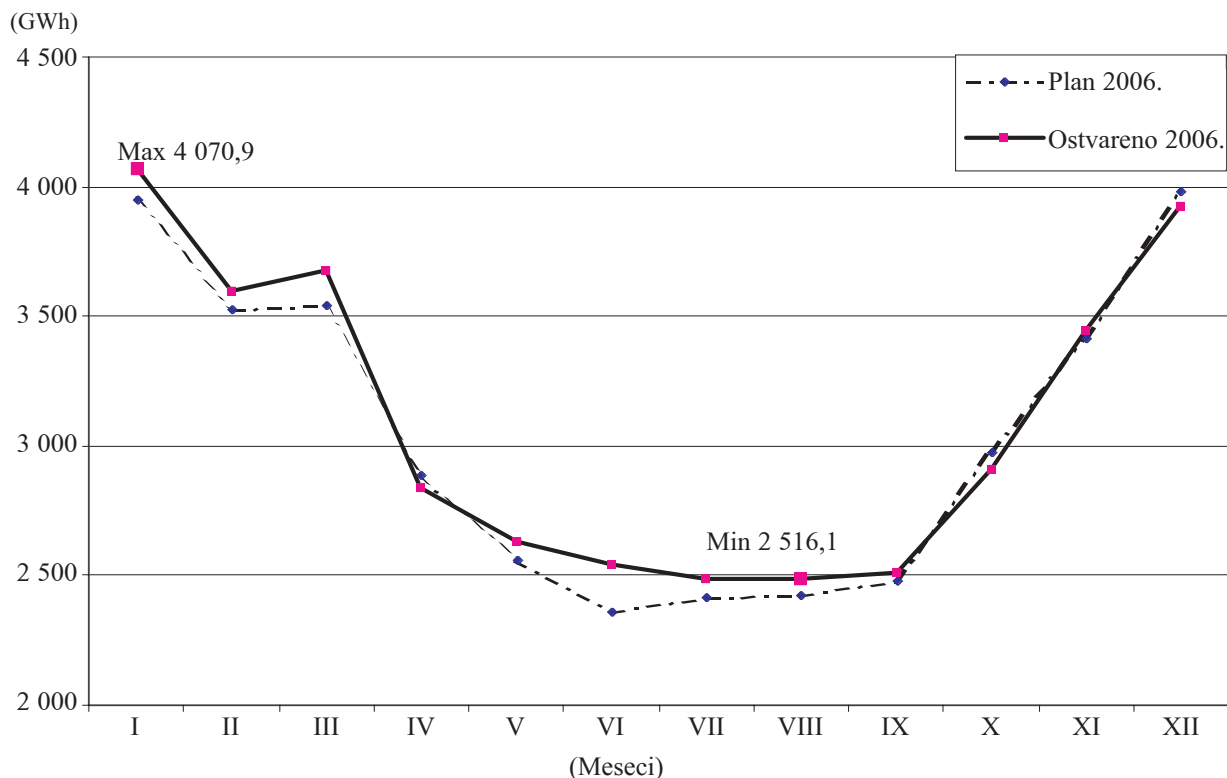
U tabeli 3. prikazano je kako su se kretale minimalne i maksimalne snage sistema EPS-a to-

kom kvartala 2006. godine u odnosu na planove tih perioda (bez pumpanja i Kosova i Metohije).

### 2.3. Razmena električne energije EPS-a i EPCG

Razmena električne energije između EPS-a i EPCG u 2006. godini je u skladu sa dugoročnim ugovorom.

EPS je tokom 2006. godine EPCG isporučio električne energije **1 241,9 GWh** ili **116,0 %** od pla-

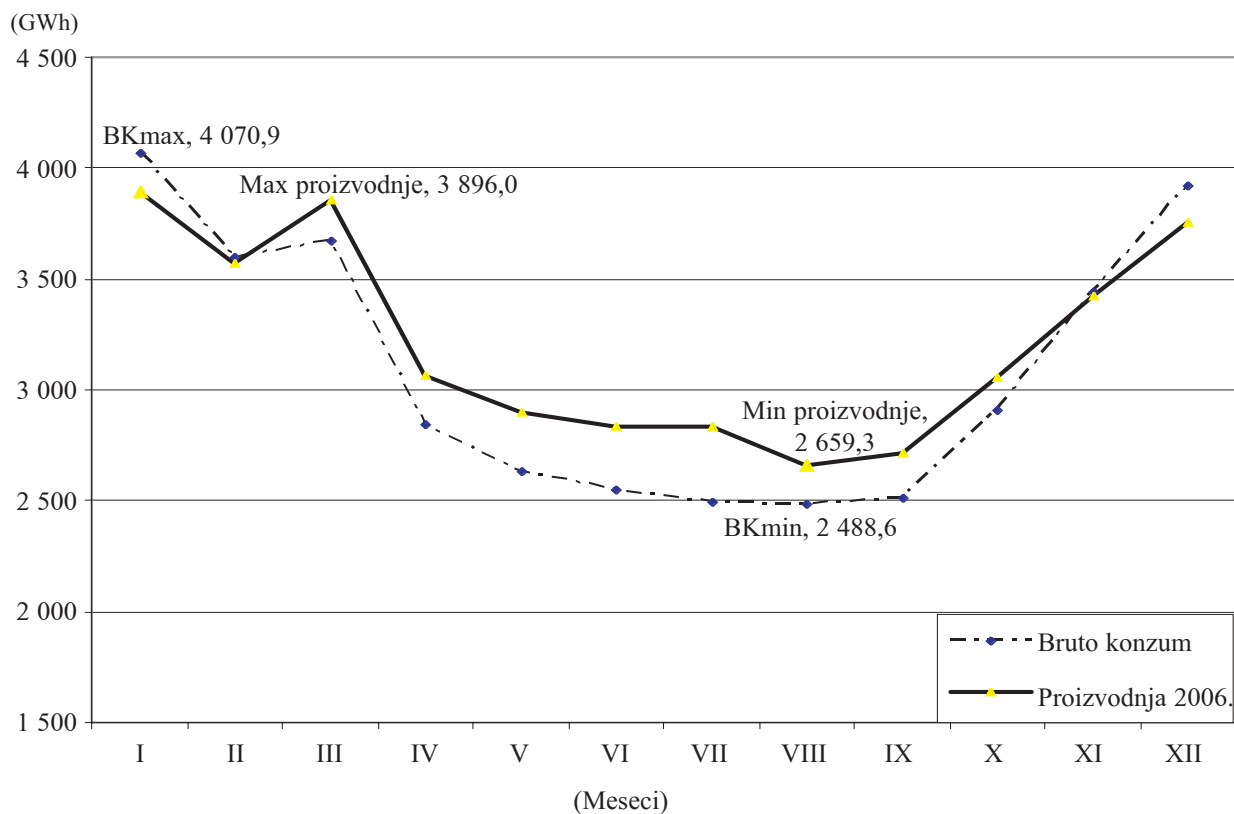


Slika 2. Mesečni bruto konzum EES EPS-a

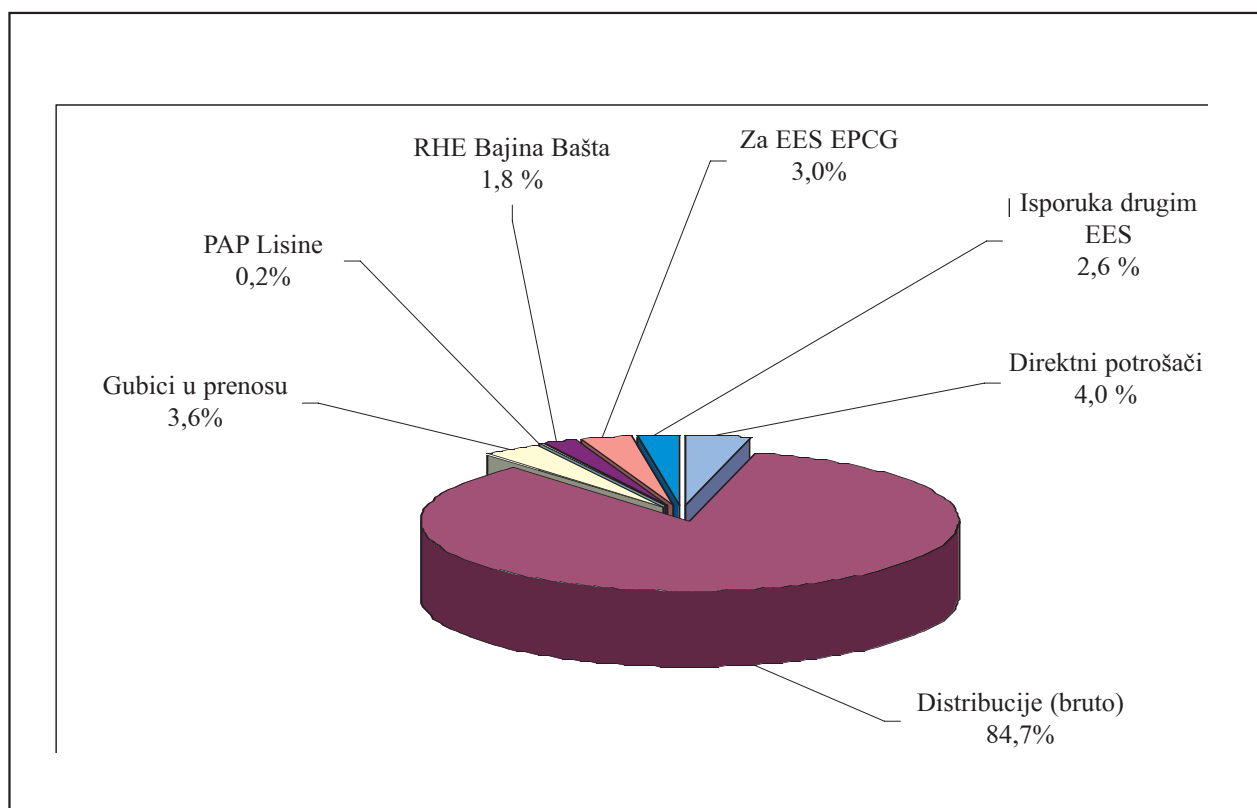
Tabela 3.

### Minimumi i maksimumi snage EES EPS-a bez Kosova i Metohije

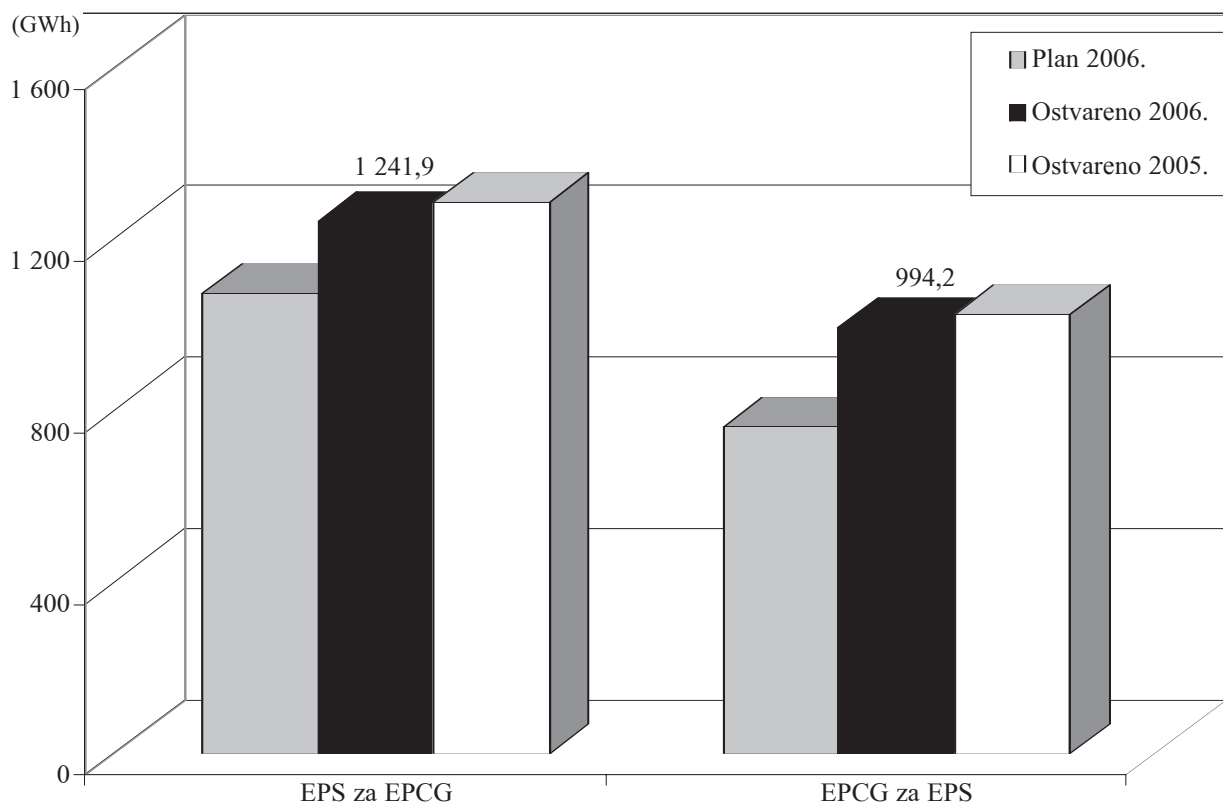
| (Meseci) | 2006. godina |           |       |       |           |       |
|----------|--------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|
|          | Min          |           |       | Max   |           |       |
|          | Plan         | Ostvareno | (%)   | Plan  | Ostvareno | (%)   |
| (1)      | (2)          | (3)       | (4)   | (5)   | (6)       | (7)   |
|          | (MW)         |           | (3/2) | (MW)  |           | (6/5) |
| I        | 3 489        | 3 295     | 94,4  | 5 697 | 6 256     | 109,8 |
| II       | 3 356        | 3 248     | 96,8  | 5 513 | 5 985     | 108,6 |
| III      | 2 679        | 2 638     | 98,5  | 5 438 | 5 719     | 105,2 |
| IV       | 2 478        | 2 166     | 87,4  | 5 253 | 5 000     | 95,2  |
| V        | 2 475        | 2 105     | 85,1  | 4 291 | 4 349     | 101,4 |
| VI       | 2 334        | 2 154     | 92,3  | 3 886 | 4 197     | 108,0 |
| VII      | 2 352        | 2 052     | 87,2  | 3 845 | 3 920     | 102,0 |
| VIII     | 2 283        | 2 070     | 90,7  | 3 921 | 4 251     | 108,4 |
| IX       | 2 392        | 2 162     | 90,4  | 4 286 | 4 332     | 101,1 |
| X        | 2 697        | 2 242     | 83,1  | 5 047 | 5 140     | 101,8 |
| XI       | 2 966        | 3 078     | 103,8 | 5 341 | 5 520     | 103,4 |
| XII      | 3 113        | 3 155     | 101,3 | 5 690 | 5 970     | 104,9 |



Slika 3. Mesečna proizvodnja i bruto konzum u EES EPS-a



Slika 4. Učešće potrošača električne energije u ukupnom plasmanu električne energije u EES EPS-a u 2006. godini



Slika 5. Razmena električne energije između EPS-a i EPCG

Tabela 4.

Razmena električne energije između republičkih elektroprivreda

| Razmena električne energije između EPS-a i EPCG | Plan za 2006. (GWh) | Ostvareno u 2006. (GWh) | Ostvareno u 2006./Plan u 2006. (%) | Ostvareno u 2005. (GWh) | Ostvareno 2006./2005. (%) |
|---|---------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| EPS isporučio EPCG                              | 1 071               | 1 241,9                 | 116,0                              | 1 285,4                 | 96,6                      |
| EPCG isporučio EPS-u                            | 762                 | 994,2                   | 130,5                              | 1 024,4                 | 97,1                      |

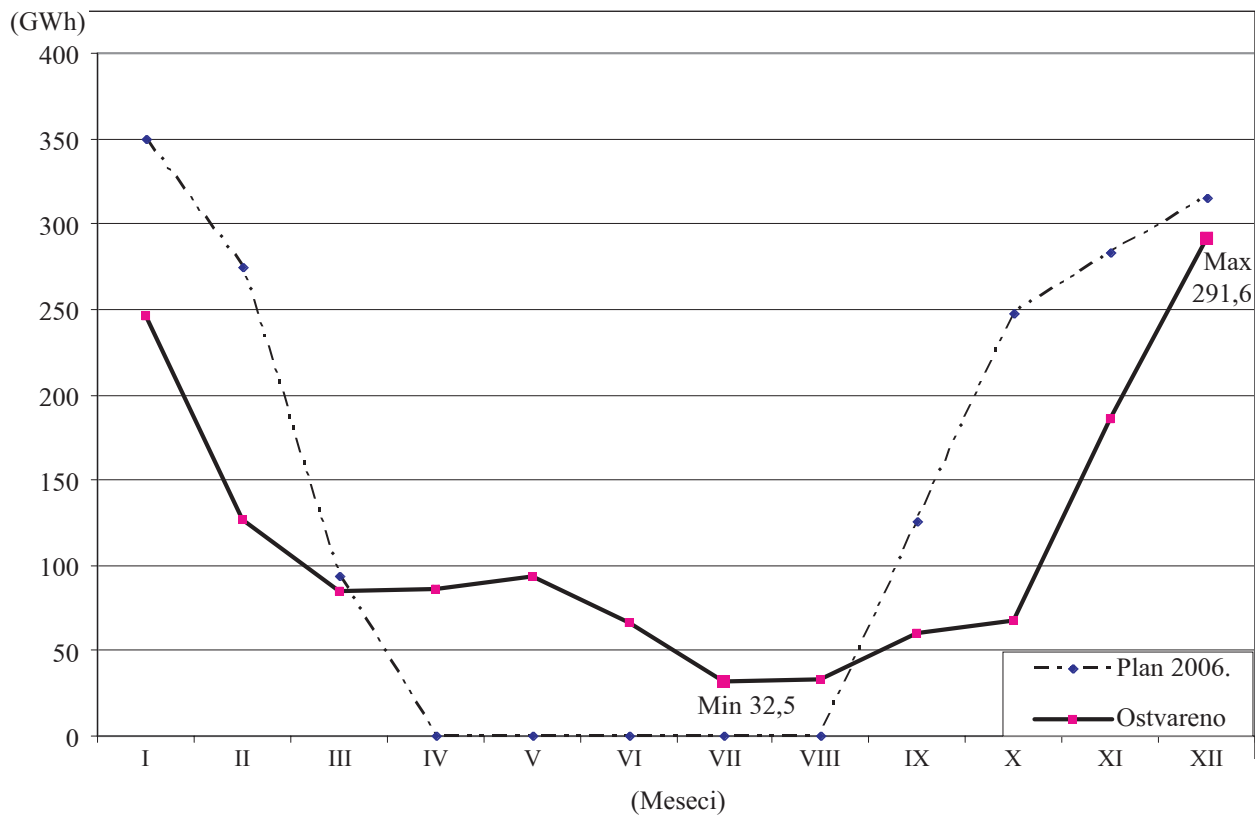
**Napomena:** pomenutim ugovorom je definisan odnos između vršne energije koju EPCG isporučuje EPS-u i energije u bandu koju EPS isporučuje EPCG u odnosu 1,415 : 1.

Tabela 5.

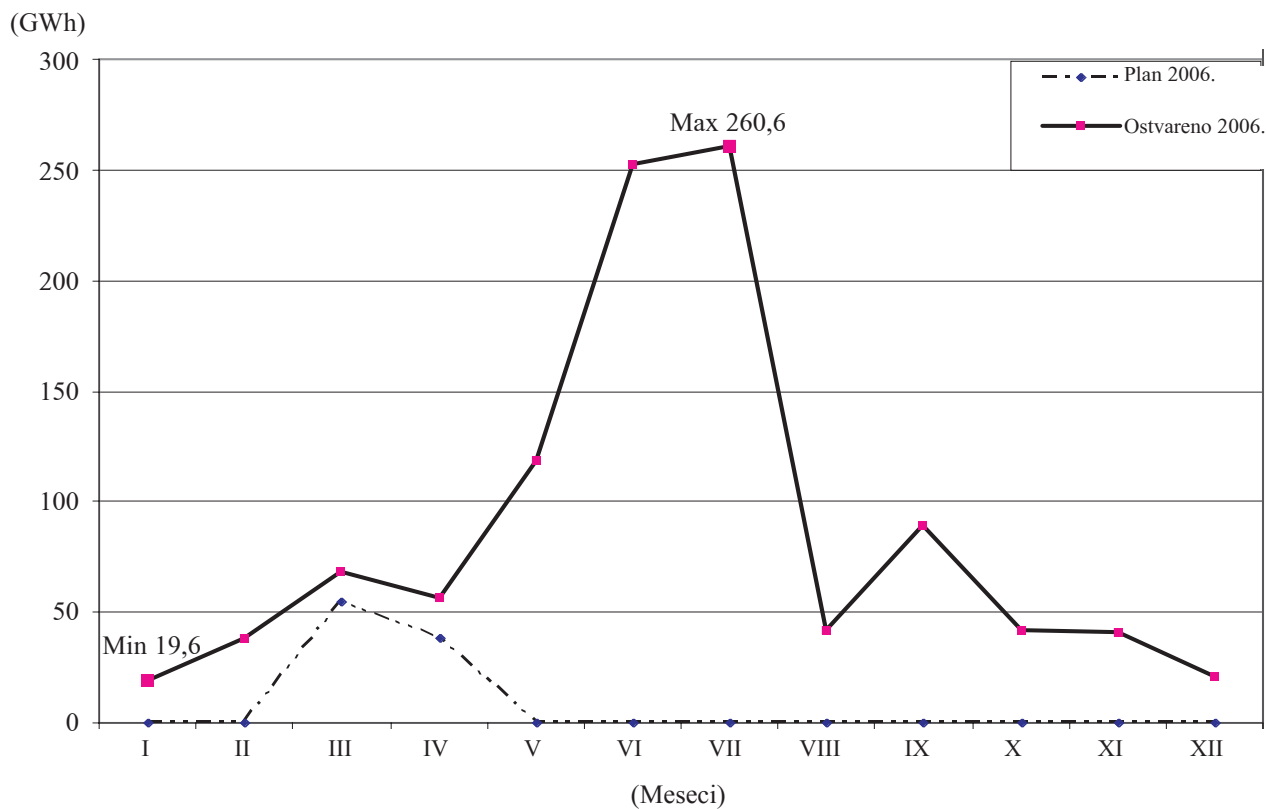
Stanje akumulacija za HE EPS-a sa HE Piva

| Akumulacije                         | 01. I   | II    | III   | IV    | V       | VI      | VII     | VIII    | IX      | X       | XI      | XII   | 31.XII  |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|
| Plan 2006. (GWh)                    | 666,0   | 505,0 | 426,0 | 486,0 | 652,0   | 901,0   | 990,0   | 1 040,0 | 1 052,0 | 1 030,0 | 933,0   | 920,0 | 773,0   |
| Ostvareno 2006 (GWh)                | 1 110,3 | 904,4 | 711,2 | 878,7 | 1 107,6 | 1 208,6 | 1 203,9 | 1 089,6 | 1 054,9 | 1 019,7 | 907,3   | 797,1 | 651,9   |
| Ostvareno 2006./Planirano 2006. (%) | 166,7   | 179,0 | 166,8 | 181,0 | 170,0   | 134,1   | 121,6   | 104,8   | 100,3   | 99,0    | 97,3    | 86,6  | 84,4    |
| Ostvareno 2005. (GWh)               | 1 887,1 | 865,3 | 630,9 | 833,0 | 1 114,6 | 1 207,7 | 1 145,5 | 1 127,2 | 1 163,3 | 1 162,8 | 1 091,7 | 919,5 | 1 101,0 |
| Ostvareno 2006./Ostvareno 2005. (%) | 102,1   | 104,5 | 112,7 | 105,5 | 99,4    | 100,7   | 105,0   | 96,7    | 90,7    | 87,7    | 83,1    | 86,7  | 59,2    |
| Ostvareno 2006./Maksimum (%)        | 85,3    | 69,5  | 54,6  | 67,5  | 85,1    | 92,9    | 92,4    | 83,7    | 81,0    | 78,3    | 69,7    | 61,2  | 50,1    |

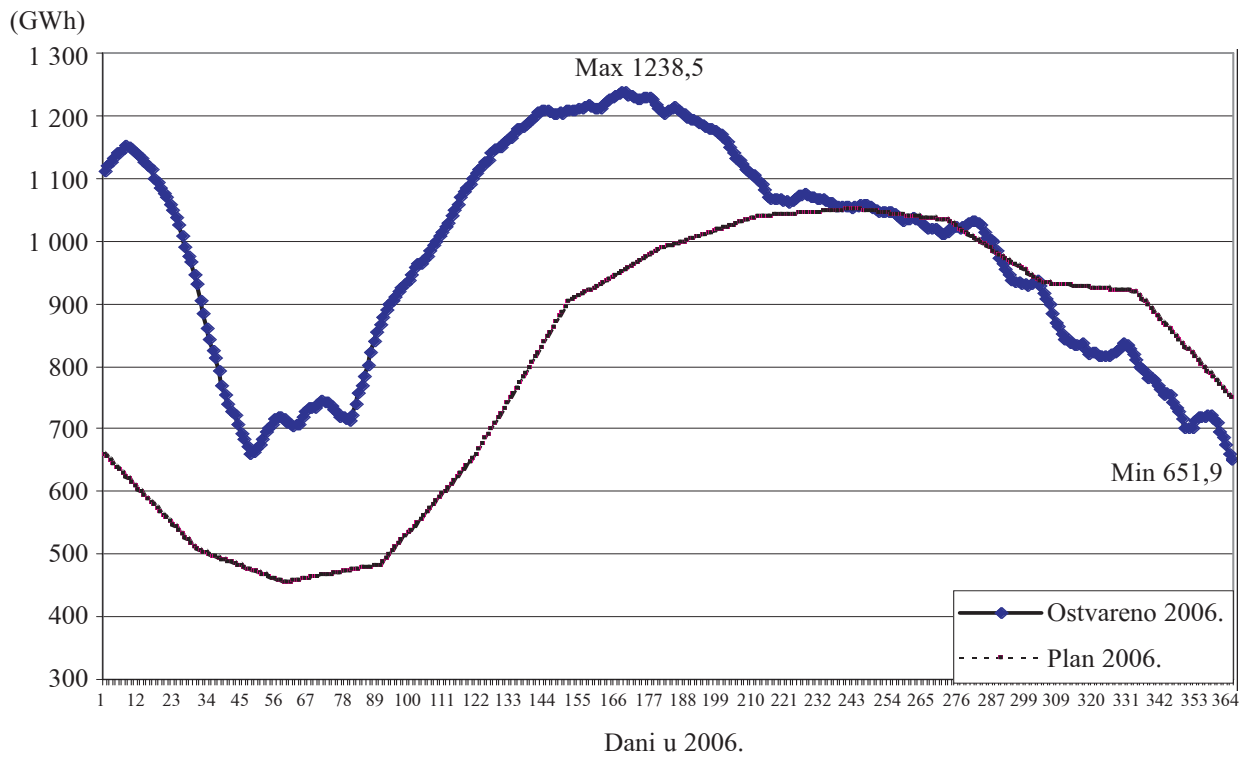
**Napomena:** Maksimalne akumulacije EPS-a sa uticajem Uvca i sa HE Piva (306 GWh) iznose: 1 301,6 GWh.



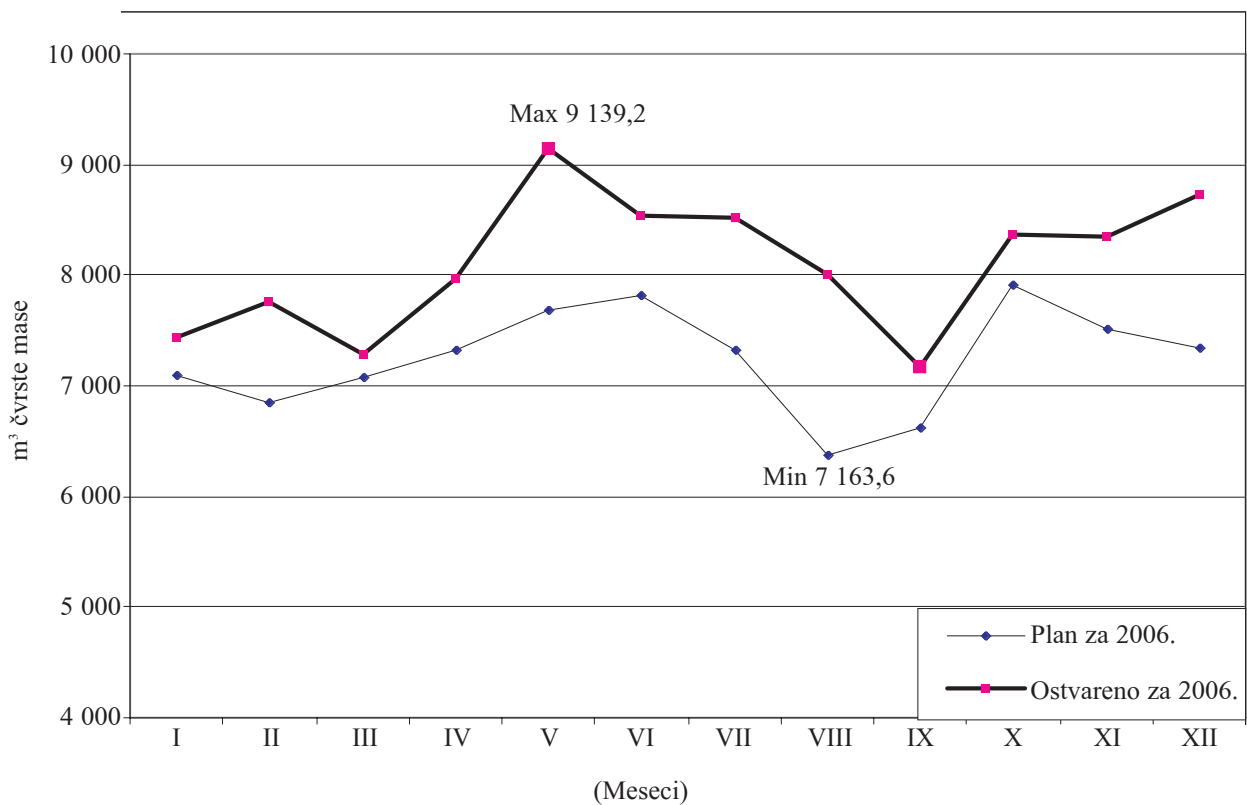
Slika 6. Nabavka EES EPS-a



Slika 7. Isporuka električne energije EES EPS-a drugim EES sistemima



Slika 8. Akumulacije za HE EPS-a sa HE Piva



Slika 9. Mesečne otkrivke uglja u EPS-u

Tabela 6.

## Otkrivka uglja u EPS-u

| Otkrivka                | Plan 2006.<br>(m <sup>3</sup> čvrste mase) | Ostvareno 2006.<br>(m <sup>3</sup> čvrste mase) | Ostvareno 2006./<br>Planirano 2006.<br>(%) | Ostvareno 2005.<br>(m <sup>3</sup> čvrste mase) | Ostvareno 2006./<br>Ostvareno 2005.<br>(%) |
|-------------------------|--|---|--|---|--|
| <b>Otkrivka u EPS-u</b> | 86 900                                     | 97 239,0  | 111,9                                      | 92 517,3  | 105,1                                      |

Napomena: Podaci za EPS su bez Kosova i Metohije

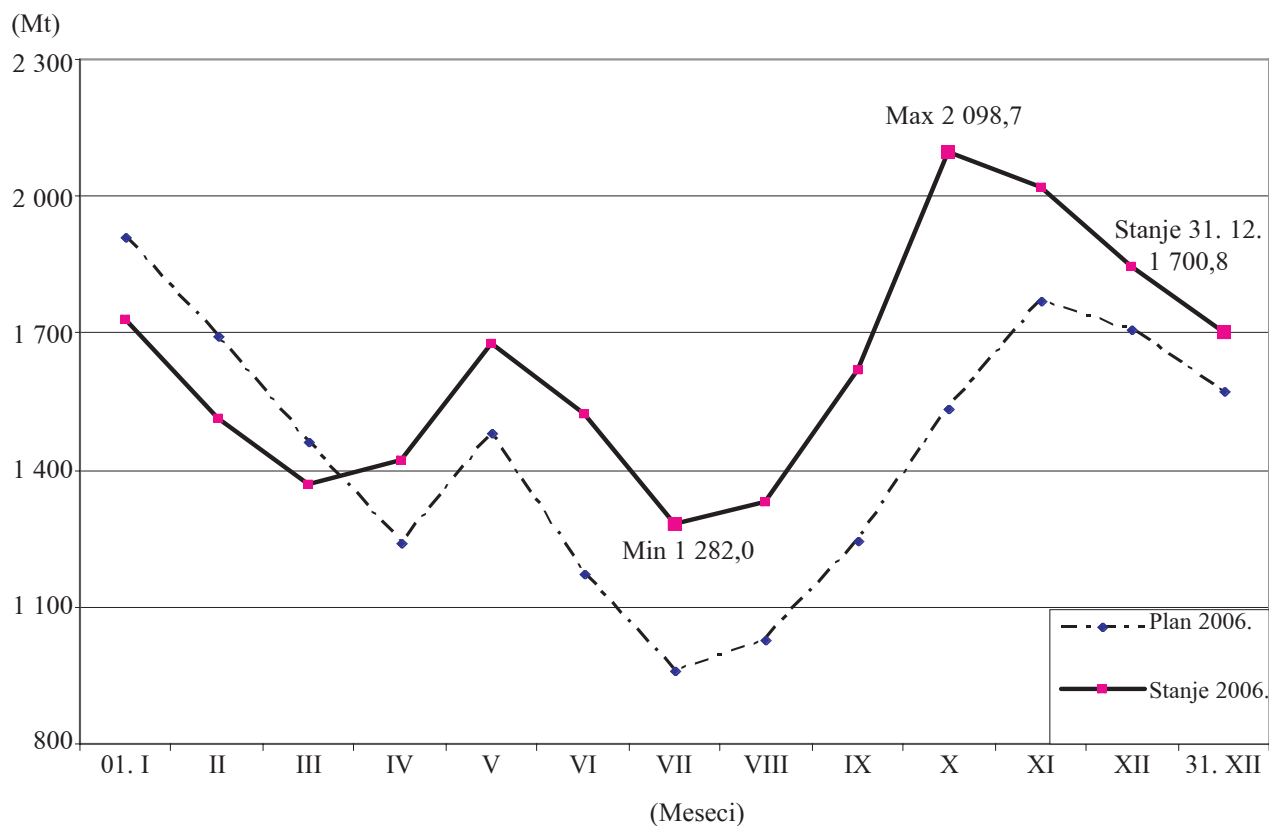
Tabela 7.

## Deponije uglja za TE EPS-a bez TE na Kosovu i Metohiji

Mt

|                              | 01. I   | II      | III     | IV      | V       | VI      | VII     | VIII    | IX      | X       | XI      | 01. XII | 31. XII |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Plan 2006. (Mt)              | 1 910,0 | 1 690,0 | 1 460,0 | 1 240,0 | 1 480,0 | 1 170,0 | 960,0   | 1 028,0 | 1 246,0 | 1 531,0 | 1 768,0 | 1 705,0 | 1 570,0 |
| Stanje 2006. (Mt)            | 1 731,0 | 1 511,9 | 1 370,3 | 1 422,8 | 1 676,6 | 1 522,5 | 1 282,0 | 1 330,1 | 1 622,3 | 2 098,7 | 2 018,8 | 1 846,6 | 1 700,8 |
| Stanje 2006/Plan 2006. (%)   | 90,6    | 89,5    | 93,9    | 114,7   | 113,1   | 130,1   | 133,5   | 129,4   | 172,2   | 137,1   | 114,2   | 108,3   | 108,3   |
| Stanje 2005. (Mt)            | 2 035,0 | 1 703,3 | 1 240,8 | 1 272,3 | 1 572,3 | 1 593,9 | 1 448,1 | 1 397,9 | 1 858,3 | 2 035,1 | 1 998,2 | 1 851,6 | 1 724,3 |
| Stanje 2006/Stanje 2005. (%) | 85,1    | 88,8    | 110,4   | 111,8   | 106,6   | 95,5    | 88,5    | 95,2    | 87,3    | 103,1   | 101,0   | 99,7    | 98,6    |
| Stanje 2006/Maksimum (%)     | 80,1    | 70,0    | 63,4    | 65,9    | 77,6    | 70,5    | 59,4    | 61,6    | 75,1    | 97,2    | 93,5    | 85,5    | 78,7    |

Napomena: Deponije u EPS-u su bez deponija za Kosovo i Metohiju (max 2 160 Mt)



Slika 10. Deponije uglja za TE EPS-a



na, ali to je u odnosu na isporučenu električnu energiju u 2005. godini za 3,4 % manje (tabela 4 i slika 5).

EPCG je tokom 2006. godine EPS-u isporučio električne energije **994,2 GWh** ili **130,5 %** plana, što je u odnosu na 2005. godinu manje za 3,0 % .

#### 2.4. Nabavka i isporuka električne energije od drugih EES

Na slici 6, koja prikazuje planiranu i ostvarenu nabavku električne energije od strane EPS-a tokom 2006. godine se vidi da je ostvarena nabavka bila manja od plana u zimskim mesecima, a veća u ljetnjim. Razlog je u potrebama potrošnje na Kosovu i Metohiji, koja se odvija mimo planiranja EPS-a. Skoro sva nabavka u letnjim mesecima je za potrebe Kosova i Metohije. Plan nabavke električne energije je iznosio 81,4 % plana (bez razmene sa EPCG).

Isporuka električne energije drugim sistemima (slika 7.) je, kao što se vidi, bila tokom 2006. godine veća od planirane. Plan isporuka električne energije je iznosio 1 129,0 % plana (bez razmene sa EPCG).

#### 2.5. Stanje akumulacija

U tabeli 5. i pripadajućem dijagramu na slici 8. prikazano je stanje akumulacija u EES EPS-a tokom 2006. godine, sa poređenjem u odnosu na 2005. godinu, zajedno sa akumulacijom HE Piva.

Stanje je bilo takvo da je 31. 12. 2006. godine dočekan sa **88,4 %** plana akumulacija, a to je **50,1 %** maksimalno mogućih akumulacija EES EPS-a, zajedno sa akumulacijom HE Piva.

#### 2.6. Otkrivka uglja

Pošto od veličine otkrivke uglja zavisi proizvodnja uglja, a samim tim i popunjenost deponija uglja i rad TE, to će se u ovom poglavlju kao i na slici 9 i u tabeli 6 dati i ova problematika, jer njena uspešnost itekako utiče na ostale rezultate ostvarenja EB zemlje.

Ostvarenje plana otkrivke uglja u EPS-u u 2006. godini (bez podataka za plan i proizvodnju na Kosovu i Metohiji) je iznosilo **111,9 %** i veće je od ostvarenja u 2005. godini za **5,1 %**.

#### 2.7. Deponija uglja

U energetskom bilansu EPS-a, plan deponija uglja za TE i njihovo stanje tokom 2006. godine prikazano je na slici 10 i u tabeli 7, sa poređenjem: stanja deponija u odnosu na ostvareno u 2005. godini.

### 2.8. ZAKLJUČAK

*Kada se analiziraju proizvodnja i potrošnja električne energije u 2006. godini, kao i ostali aspekti vezani za tu vrstu problematike, može se konstatovati sledeće:*

- kao posledica kvalitetnijih remonata, pojedinih obavljenih revitalizacija i održavanja, evidentni su i bolji rezultati u radu i proizvodnji čitavog EES EPS-a;
- tarifni sistem i netržišna cijena električne energije, posustaju u smanjenju maksimalnog dnevnog opterećenja u mreži EPS-a, kao i u eventualnom rastu minimalnog dnevnog opterećenja, zbog neusklađenosti-dispariteta cena energenata, što dovodi do nešto manje ravnomernosti dnevnog dijagrama opterećenja na nivou EES;
- delimično se popravljaju i tehnička efikasnost izvora električne energije;
- potrebno je stvoriti uslove za što racionalnije korišćenje električne energije;
- potrebno je nastaviti sa intenzivnim ulaganjem u remonte na svim nivoima, nastavkom revitalizacije, kao i što hitnijim novim investicijama, kako u hidro tako i u termo sektoru, jer potrebe su sve veće, a vremešnost postojećih izvora je evidentna.

### 3. ELEKTROPRIVREDA CRNE GORE

#### 3.1. Proizvodnja električne energije

U 2006. godini, energetskim bilansom elektroprivrede Crne Gore predviđena je:

- proizvodnja iz sopstvenih izvora 2 746 GWh (HE 1 673 GWh, TE 1 073 GWh) i
- nabavka od drugih EES-a 2 362 GWh.

Ukupna proizvodnja električne energije u EPCG je iznosila **2 818,4 GWh** (**61,8 %** iz HE a **38,2 %** iz TE), dok su nabavke električne energije od drugih EES-a iznosile **2 929,3 GWh**.

Plan proizvodnje iz sopstvenih izvora je veći za **2,6 %**. HE su svoj plan ostvarile sa **104,2 %** a TE su ostvarile sa **100,2 %** plana.

Nabavka električne energije od drugih EES-a (uključujući i od EPS-a) je veća za **16,6 %** od plana.

Ukupno raspoloživa električna energija je bila za **6,1 %** veća od plana za 2006. godinu.

Kada se prave poređenja proizvodnje električne energije u 2006. godini u odnosu na 2005. godinu, onda su odnosi sledeći:

- sopstvena proizvodnja je veća za **2,6 %**, pri čemu je proizvodnja HE manja za **6,2 %** a TE veća za **20,8 %**;
- nabavka električne energije od drugih EES-a (uključujući i EPS) je veća za **2,3 %**;

– raspoloživa električna energija je veća za **2,2 %**.

Svi gore navedeni podaci dati su u tabeli 8. i na slici 11.

**Karakteristične proizvodnje** na pragu elektrana:

- najveća mesečna proizvodnja je bila u **januaru** 2006. godine i iznosila je **395,9 GWh** (najveća mesečna proizvodnja u 2005. godini je bila 353,0 GWh), tog meseca HE su proizvele **302,3 GWh**, a TE **93,6 GWh**;
- najveća mesečna proizvodnja HE je bila u **januaru** 2006. godine i iznosila je **303,3 GWh** (najveća mesečna proizvodnja HE u 2004. godini je bila 235,3 GWh);
- najveća mesečna proizvodnja TE je bila u **junu** 2006. godine i iznosila je **121,9 GWh** (najveća mesečna proizvodnja TE u 2005. godini je bila 117,7 GWh);

### 3.2. Potrošnja električne energije

Ukupne potrebe potrošača električne energije u CG su iznosile **4 684,7 GWh**, dok su isporuke drugim EES (uključujući i EPS) iznosile **1 063,0 GWh**.

Plan potrošnje domaćih potrošača električne energije je ostvaren sa **101,3 %**, a isporuke električne energije drugim EES (uključujući i EPS) je iznosio **1 063,0 GWh**, tako da je ukupan plasman iznosio **106,1 %** plana. U tabeli 9. i na slici 12. se vidi kakvo je učešće potrošača električne energije. Vidi se da su direktni potrošači ispunili plan sa **101,7 %** (potrošili su električne energije više nego 2005. godine za **4,1 %**). Distributivna potrošnja je **102,2 %** od plana, i ista ima rast od **3,3 %** u odnosu na 2005. godinu. Gubici električne energije u prenosu su manji od planiranih, za **14,4 %** ali su i u odnosu na 2005. godinu manji za **10,7 %**. Na slici 12, prikaza-

na je prosečna potrošnja električne energije bruto konzuma .

**Karakteristične potrošnje** električne energije:

- najveća mesečna bruto potrošnja je bila u **januaru** 2006. godine i iznosila je **468,2 GWh** (najveća mesečna bruto potrošnja u 2005. godini je bila 441,1 GWh);
- najveća dnevna potrošnja je bila **26. januara** 2006. godine i iznosila je **16,6 GWh** (najveća dnevna potrošnja u 2005. godini je bila 16,8 GWh);
- najveća srednja satna snaga je bila **26. januara 779 MW** u 20 časova (najveća srednja satna snaga u 2005. godini je bila 799 MW ) i
- prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2006. godini je iznosila **12,4 GWh** (planirana 12,2 GWh dok je u 2005. godini ostvarena prosečna dnevna potrošnja bila 11,9 GWh).

### 3.3. Nabavka i isporuka električne energije drugim EES

Nabavke električne energije (zajedno i od EPS-a) tokom 2006. godine (slika 15.) bile su, osim u aprilu, stalno veće od planiranih, zbog izuzetno loših hidroloških uslova.

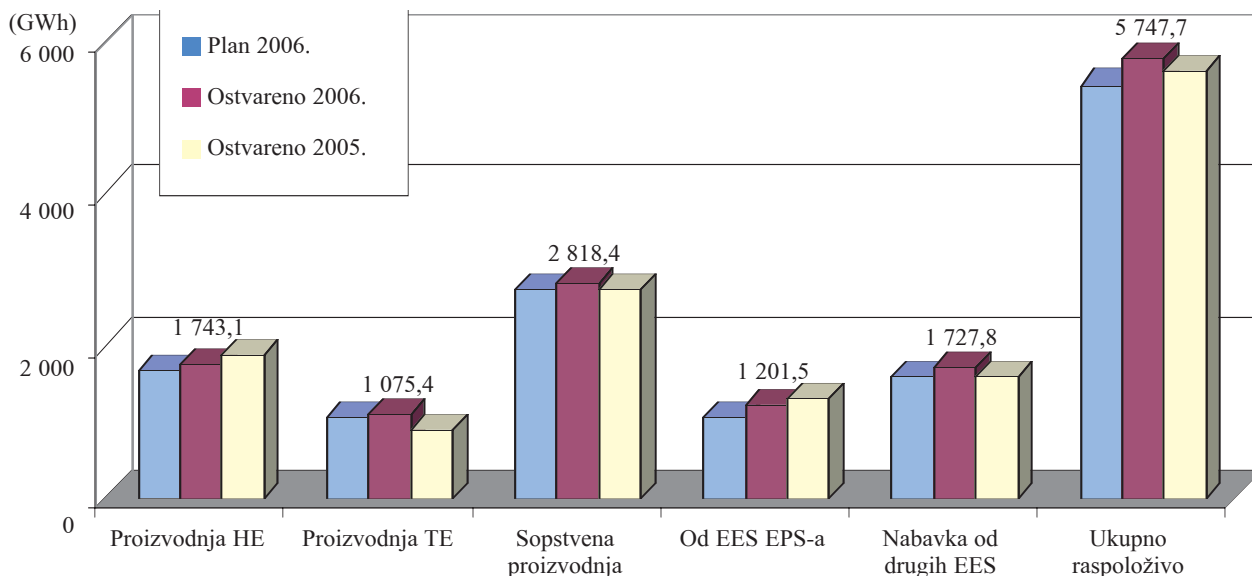
Isporuke električne energije (i za EPS) tokom 2006. godine bile su, osim u martu, aprilu septembru, oktobru i novembru, veće od plana, kao što se to vidi na slici 16.

### 3.5. Otkrivka uglja

Pošto od veličine otkrivke uglja zavisi proizvodnja uglja, a samim tim i popunjenost deponija uglja i rad TE, to će se u ovom poglavlju kao i na sli-

Tabela 8.  
Ostvarenje bilansa proizvodnje (na pragu elektrana) i nabavki električne energije EES-a EPCG

| Raspoloživo                  | 2006. godina       |                    | Ostvareno 2006./<br>Planirano 2006.<br>(%) | Ostvareno 2005.<br>(%) |              |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------|--------------|
|                              | Planirano<br>(GWh) | Ostvareno<br>(GWh) |  |                        |              |
|                              | (1)                | (2)                | (2/1)                                      | (4)                    | (2/4)        |
| Proizvodnja HE               | 1 673              | 1 743,1            | 104,2                                      | 1 857,4                | 93,8         |
| Proizvodnja TE               | 1 073              | 1 075,4            | 100,2                                      | 890,4                  | 120,8        |
| <b>Sopstvena proizvodnja</b> | <b>2 746</b>       | <b>2 818,4</b>     | <b>102,6</b>                               | <b>2 747,8</b>         | <b>102,6</b> |
| Nabavka od EES EPS-a         | 1 071              | 1 241,9            | 116,0                                      | 1 285,4                | 96,6         |
| Nabavka od drugih EES        | 1 600              | 1 687,4            | 105,5                                      | 1 579,0                | 106,9        |
| <b>Ukupno raspoloživo</b>    | <b>5 417</b>       | <b>5 747,7</b>     | <b>106,1</b>                               | <b>5 612,3</b>         | <b>102,4</b> |



Slika 11. Ostvarenje EEB EES EPCG

Tabela 9.

Ostvarenje bilansa potrošnje i isporuka električne energije EES EPCG

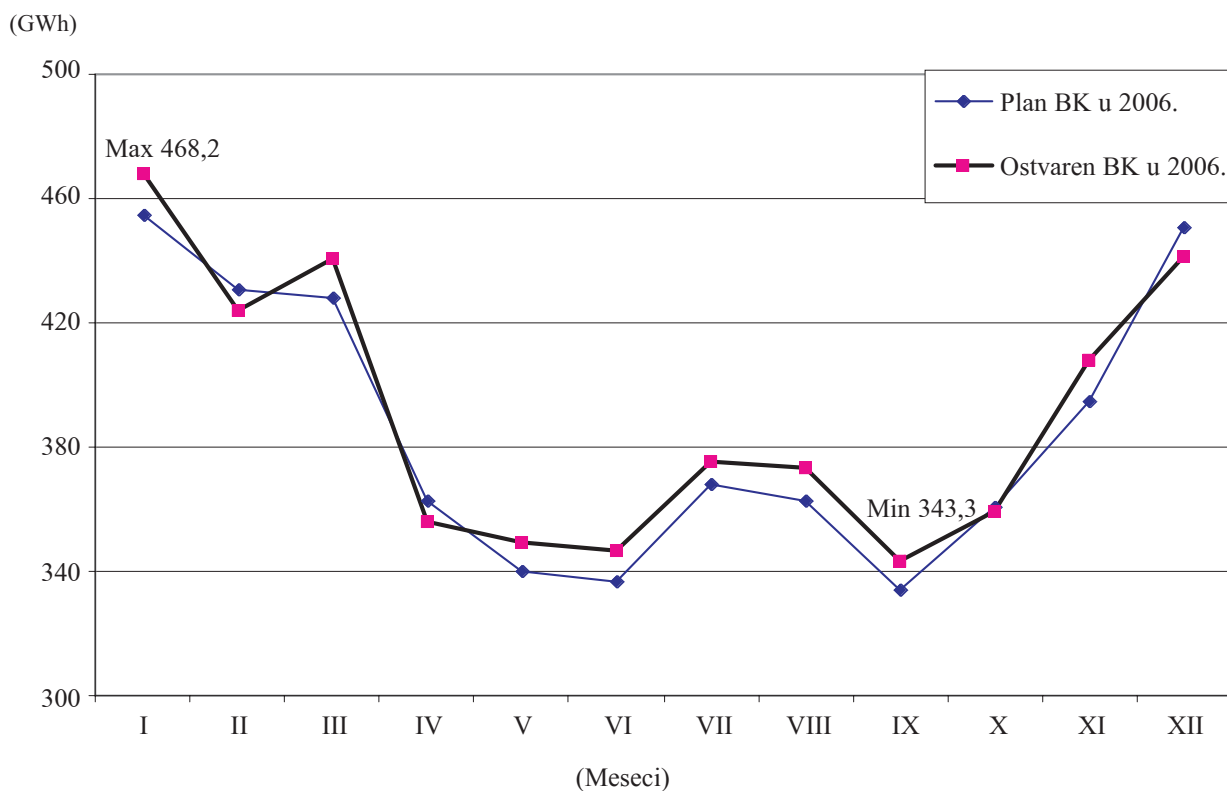
| Plasman                    | 2006. godina       |                    | Ostvareno 2006/<br>Planirano 2006.<br>(%) | 2005. godina       |              |
|----------------------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------|
|                            | Planirano<br>(GWh) | Ostvareno<br>(GWh) |   | Ostvareno<br>(GWh) |              |
|                            |                    |                    | (2/1)                                     |                    |              |
|                            | (1)                | (2)                | (3)                                       | (4)                | (5)          |
| Direktni potrošači         | 2 107              | 2 142,3            | 101,7                                     | 2058,3             | 104,1        |
| Distribucije (bruto)       | 2 336              | 2 385,8            | 102,1                                     | 2309,8             | 103,3        |
| Gubici u prenosu           | 183                | 156,6              | 85,6                                      | 175,4              | 89,3         |
| <b>Sopstvena potrošnja</b> | <b>4 626</b>       | <b>4 684,7</b>     | <b>101,3</b>                              | <b>4543,4</b>      | <b>103,1</b> |
| Isporuka EPS-u             | 762                | 994,2              | 130,5                                     | 1 024,4            | 97,1         |
| Isporuka drugim EES        | 29                 | 68,8               | 237,3                                     | 44,4               | 155,0        |
| <b>Ukupan plasman</b>      | <b>5 417</b>       | <b>5 747,7</b>     | <b>106,1</b>                              | <b>5612,3</b>      | <b>102,4</b> |

ci 17 i u tabeli 10 dati i ova problematika, jer njena uspešnost itekako utiče na ostale rezultate ostvarenja EB zemlje, odnosno na rad TE Pljevlja.

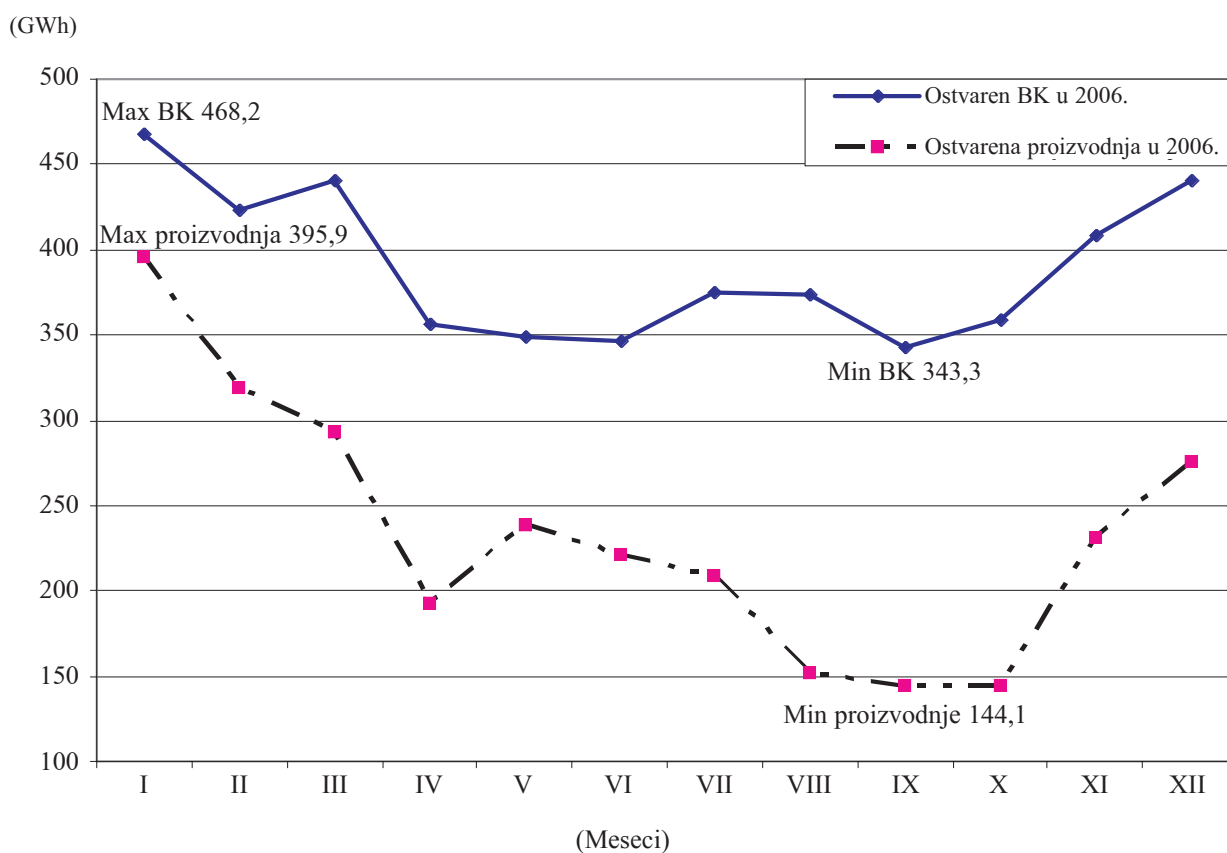
Otkrivenje uglja u Crnoj Gori u 2006. godini je iznosila **66,6 %** od plana. Ista je veća u odnosu na ostvareno u 2005. godini **131,0 %**.

### 3.6. Deponija uglja

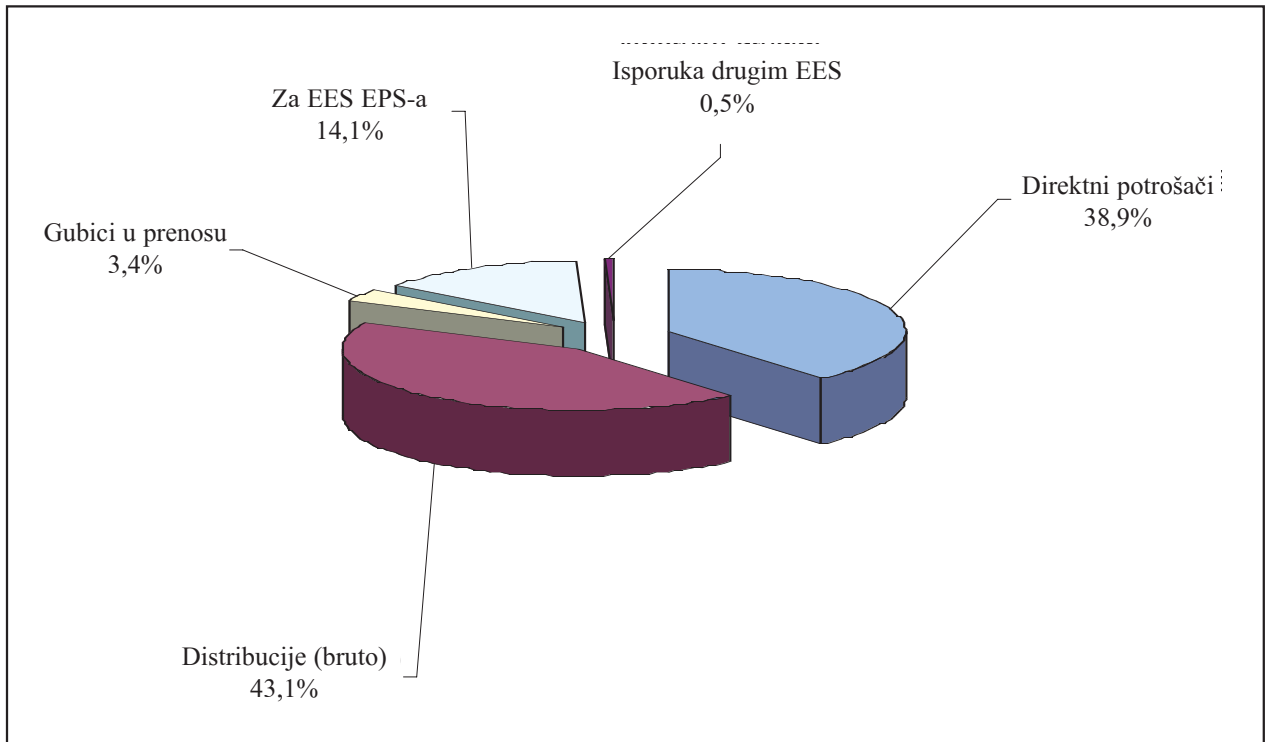
U energetske bilansu Crne Gore, plan deponija uglja za TE i njihovo stanje tokom 2006. godine prikazano je na slici 18. i u tabeli 11, sa poređenjem: stanja deponija u odnosu na ostvareno u 2005. godini.



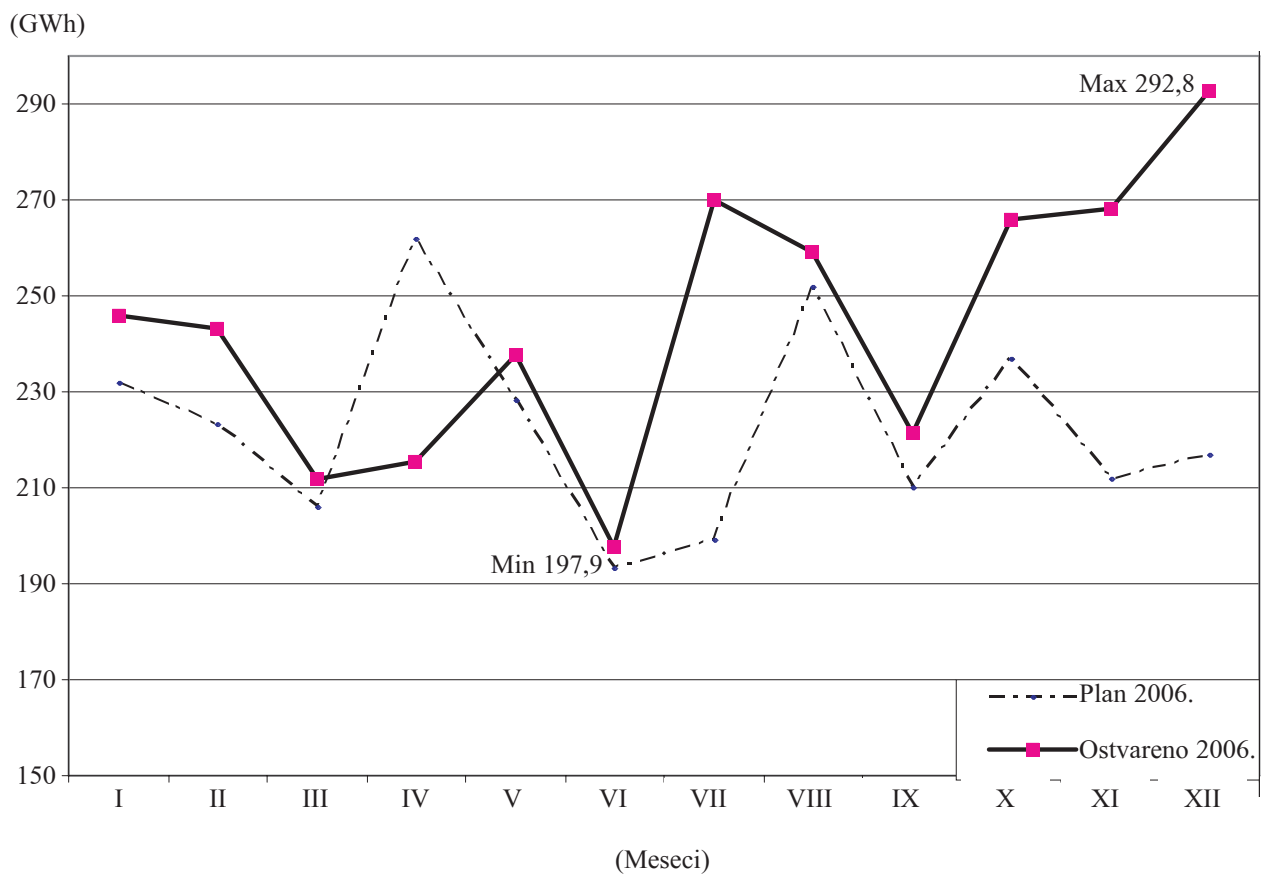
Slika 12. Mesečni bruto konzum EES EPCG



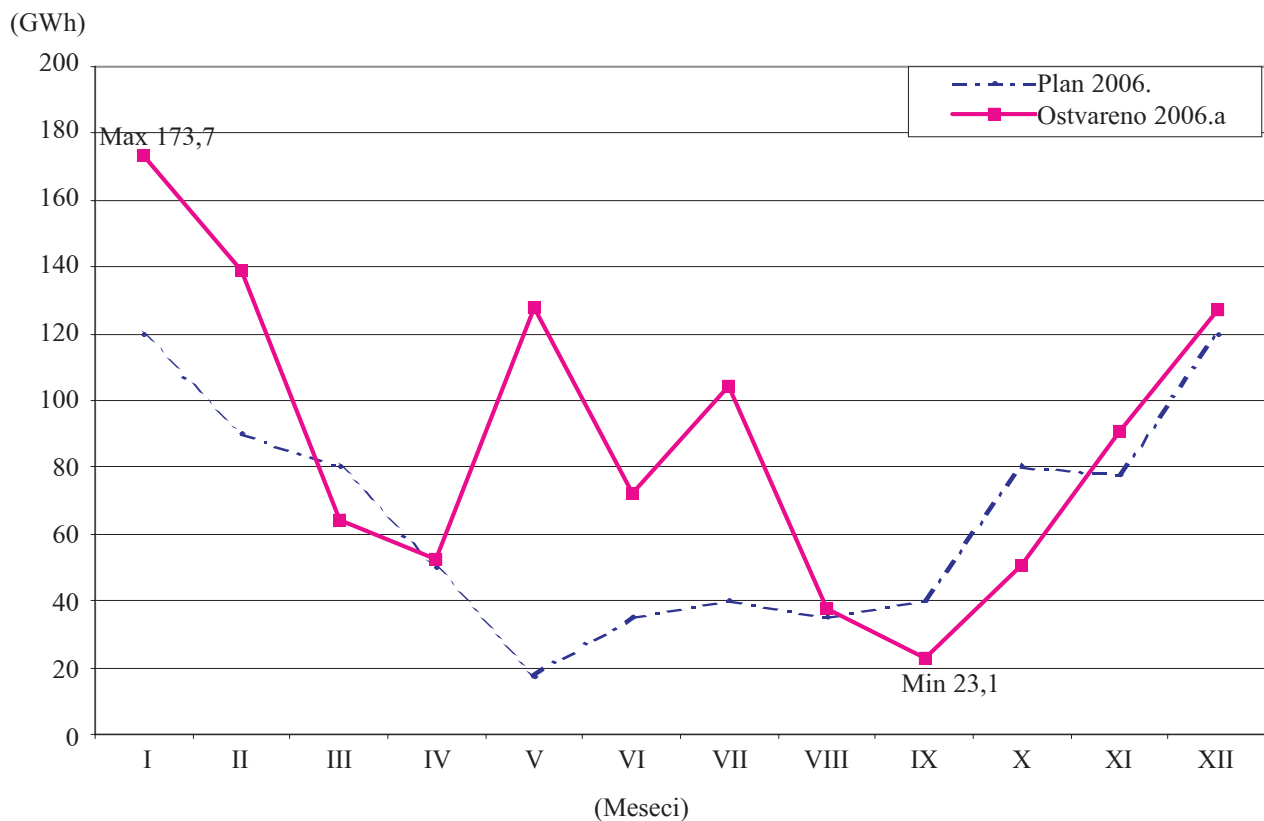
Slika 13. Mesečna proizvodnja i bruto konzum u EES EPCG



Slika 14. Struktura potrošnje u EPCG



Slika 15. Ukupne nabavke EPCG (uključujući i od EPS-a)



Slika 16. Ukupne isporuke EPCG (uključujući i za EPS)

Tabela 10.

Otkrivka uglja u Crnoj Gori

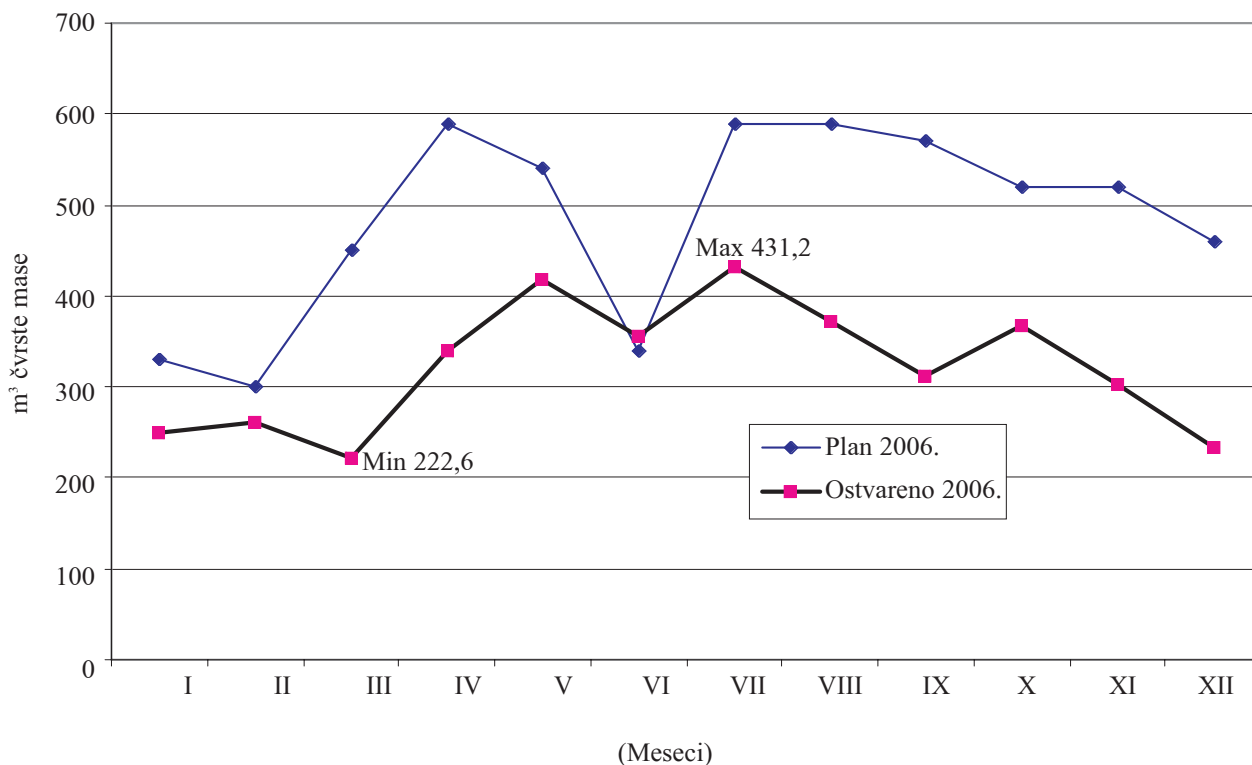
| Otkrivka                      | Plan 2006.<br>(m <sup>3</sup> čvrste mase) | Ostvareno 2006.<br>(m <sup>3</sup> čvrste mase) | Ostvareno 2006./<br>Planirano 2006.<br>(%) | Ostvareno 2005.<br>(m <sup>3</sup> čvrste mase) | Ostvareno 2006./<br>Ostvareno 2005.<br>(%) |
|-------------------------------|--|---|--|---|--|
| Otkrivka u rudniku „Pljevlja” | 5 800                                      | 3 864,4   | 66,6                                       | 2 950,1   | 131,0                                      |

Tabela 11.

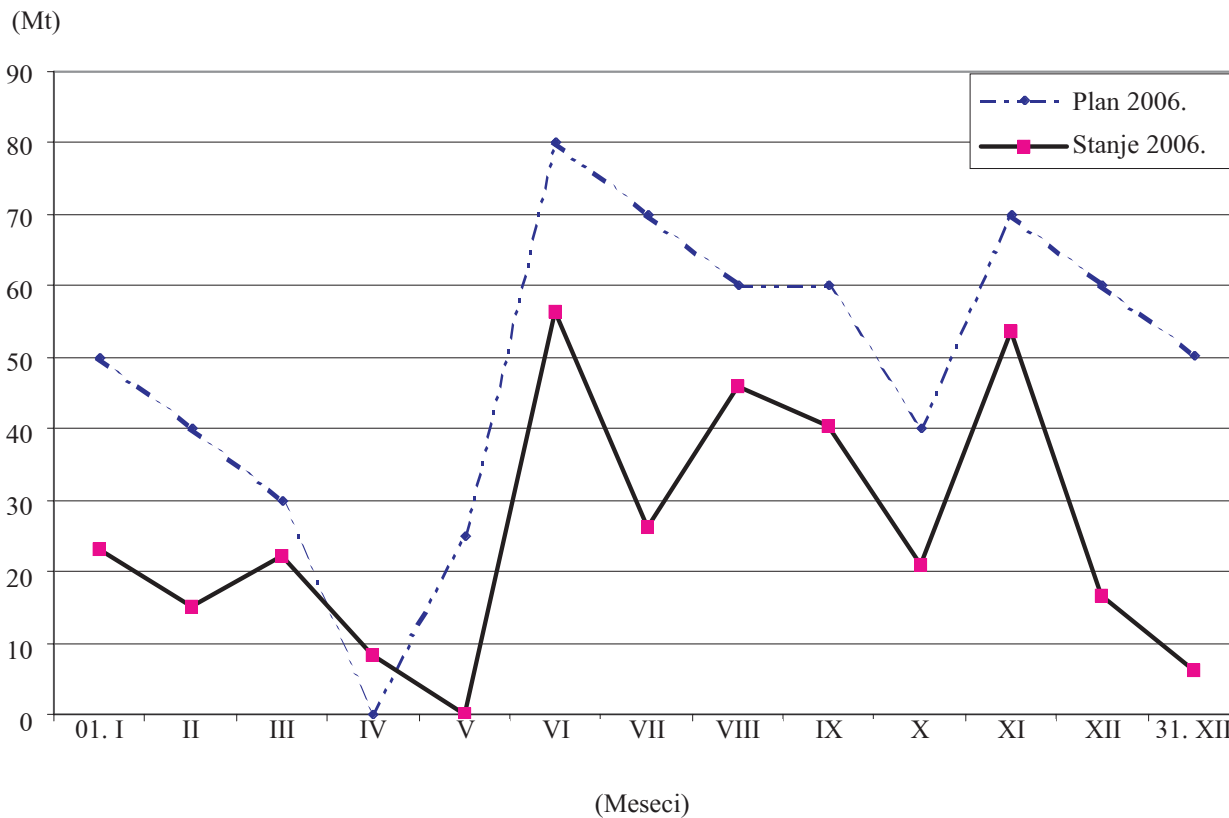
Deponije uglja za TE Pljevlja

Mt

|                           |      | 01. I | II   | III   | IV    | V    | VI    | VII  | VIII  | IX    | X    | XI     | 01. XII | 31. XII |
|---------------------------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|--------|---------|---------|
| Plan 2006.                | (Mt) | 50,0  | 40,0 | 30,0  | 0,0   | 25,0 | 80,0  | 70,0 | 60,0  | 60,0  | 40,0 | 70,0   | 60,0    | 50,0    |
| Stanje 2006.              | (Mt) | 23,1  | 15,0 | 22,1  | 8,4   | 0,0  | 56,5  | 26,2 | 45,8  | 40,4  | 21,0 | 53,6   | 16,6    | 6,3     |
| Stanje 2006./Plan 2006.   | (%)  | 46,2  | 37,5 | 73,6  |       | 0,0  | 70,6  | 37,5 | 76,3  | 67,3  | 52,5 | 76,7   | 27,7    | 12,5    |
| Stanje 2005.              | (Mt) | 16,2  | 23,4 | 5,0   | 0,9   | 56,4 | 14,5  | 48,0 | 12,2  | 6,5   | 32,5 | 3,6    | 15,0    | 23,1    |
| Stanje 2006./Stane 2005.. | (%)  | 142,9 | 64,3 | 444,2 | 976,9 | 0,0  | 397,7 | 54,6 | 374,5 | 617,8 | 64,6 | 1484,0 | 110,8   | 27,3    |
| Stanje 2006./Maksimum     | (%)  | 14,4  | 9,4  | 13,8  | 5,3   | 0,0  | 35,3  | 16,4 | 28,6  | 25,2  | 13,1 | 33,5   | 10,4    | 3,9     |



Slika 17. Otkrivka u rudniku Pljevlja



Slika 18. Deponije uglja za TE Pljevlja

### 3.7. ZAKLJUČAK

*Kada se analiziraju proizvodnja i potrošnja električne energije u 2006. godini, kao i ostali aspekti vezani za tu vrstu problematike, može se konstatovati sledeće:*

- i dalje, već decenijski, je veliki nedostatak električne energije, koji se svake godine povećava, danas je veći od trećine potreba, posebno u uslovima loše hidrologije;*
- nedovoljna otkrivka, samim tim i nedostajuća količina uglja, umanjuju mogućnost proizvodnje električne energije iz TE Pljevlja, koja zadnjih godina, posle kapitalnog remonta i velike stručnosti i zalaganja osoblja, postiže veliki stepen tehničke efikasnosti;*
- potrebno je stvoriti uslove za što racionalnije korišćenje električne energije, posebno smanjiti gubitke u distributivnoj mreži – dovesti ih na nivo tehničkih gubitaka;*
- potrebno je nastaviti sa intenzivnim ulaganjem u remonte na svim nivoima, pripremom revitalizacije, kao i novim investicijama, izgradnjom novih kapaciteta;*

#### **Generalna napomena čitaocima:**

*Ukoliko bi čitalac proveravao zbirove u tabelama, našao bi mala neslaganja, što je posledica zaokruživanja na jednu decimalu, jer su podaci dati, recimo u kWh, a u tabelama su prikazivani u GWh, pa otuda i razlika. Isto važi i kada su procenti (%) u pitanju. Takođe i pojedina ostvarenja u 2005. godini, se razlikuju od datih u broju 1/2006, jer su ista publikovani prije konačnih komercijalnih podataka.*

Rad je primljen u uredništvo 10. 02. 2007. godine



**Branislav A. Bošković** je rođen 1946. godine u Kolašinu. Srednju tehničku školu i prvi stepen elektrotehničkog fakulteta završio u Titogradu (danas Podgorica), a drugi stepen u Beogradu. Po završetku studija, radio u „Minelu” i „Elektronu”, kao i za strane kompanije, na izgradnji elektroenergetskih i industrijskih postrojenja u zemlji i inostranstvu. Od 1996. godine zaposlen u Zajednici jugoslovenske elektroprivrede. Oblast rada u ZJE je bio EEB SRJ.

### 4. LITERATURA

- [1] UGOVOR O DUGOROČNOJ POSLOVNO–TEHNIČKOJ SARADNJI, mart 1991. godine.
- [2] EEB REPUBLIKE SRBIJE (aktuelizovani) U 2005, i 2006. GODINI.
- [3] EB REPUBLIKE CRNE GORE U 2005, I 2006. GODINI.
- [4] KOMERCIJALNI PODACI EPS-a O OSTVARENJU EEB u 2006, Beograd, 25. 01. 2007. godine.
- [5] IZVEŠTAJ EPS-a O OSTVARENJU PROIZVODNJE UGLJA, Beograd, br. II-13/3 12.01. 2007. godine.
- [6] IZVEŠTAJ RUDNIKA UGLJA PLJEVLJA O OSTVARENJU PROIZVODNJE UGLJA, Pljevlja, januar 2007. godine.
- [7] ELEKTROPRIVREDA SRBIJE 2006. GODINA, Beograd, 2007. godine.
- [8] ELEKTROPRIVREDA CRNE GORE 2005. GODINA, Nikšić, 2006. godine.
- [9] ELEKTROPRIVREDA SRBIJE 2006. GODINA, Beograd, 2007. godine.