



# Elektroprivreda

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

Godina Year	LVI	Januar-Mart January-March	Broj No.	1
----------------	-----	------------------------------	-------------	---

Sadržaj	Strana Page	Content
---------	----------------	---------

		<i>Dragan P. Popović</i>
PRAKTIČNI ASPEKTI AUTOMATIZOVANOG PRORAČUNA GRANIČNIH PRENOSNIH KAPACITETA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA	3	PRACTICAL ASPECTS OF AUTOMATIC CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITIES ASSESSMENTS OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTIONS
		<i>Milenko Đurić i Željko Đurišić</i>
ALGORITAM ZA BRZU ESTIMACIJU FREKVENCIJE U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU	15	AN ALGORITHM FOR FAST FREQUENCY MEASUREMENTS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS
		<i>Miroslav D. Nimrihter, Strahil J. Gušavac, Miomir M. Dutina i Snežana B. Novaković</i>
PLANIRANJE REVITALIZACIJE NADZEMNIH VODOVA	31	OVERHEAD LINES REVITALIZATION PLANNING
		<i>Snežana Mijailović, Zoran Vujasinović i Mladen Apostolović</i>
PREGLED AKTUELNIH METODA ZA UPRAVLJANJE ZAGUŠENJIMA U PRENOSNOJ MREŽI U EVROPI	40	OVERVIEW OF PRESENT CONGESTION MANAGEMENT MET- HODS IN TRANSMISSION NETWORK IN EUROPE
		<i>Duško Bekut i Valentina Treskanica</i>
JEDAN POSTUPAK ZA PRORAČUN GUBITAKA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	56	A PROCEDURE FOR DISTRIBUTION NETWORK LOSSES ANALYSIS
		<i>Dragoslav Perić</i>
TRAJANJE PREKIDA NAPAJANJA I ŠTETE USLED KVAROVA U GRADSKIM SREDNJENAPONSKIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	65	DURATION AND COSTS OF SUPPLY INTERRUPTION DUE TO FAULT IN URBAN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK
		<i>Miodrag Arsić, Stojan Sedmak i Vujadin Aleksić</i>
OCENA INTEGRITETA I PRODUŽENJE RADNOG VEKA ROTORNH BAGERA	79	INTEGRITY ASSESSMENT AND PROLONGATION OF ROTOR DREDGERS WORKING LIFE
		<i>I deo</i>
		<i>Radoslav S. Maksimović</i>
ODRŽAVANJE JONOIZMENJIVAČKIH SMOLA	100	MAINTENANCE OF ION EXCHANGE RESINS
		<i>Prikaz nove knjige</i>
OSNOVI ANALIZE ELEKTROENERGETSKIH MREŽA I SISTEMA	104	BASES FOR ANALYSIS OF ELECTRIC POWER NETWORKS AND SYSTEMS
		<i>Autori: Milan S. Čalović i Andrija T. Sarić</i>
		<i>Prikaz knjige</i>
HIDROENERGETSKO KORIŠĆENJE VODA	107	UTILIZATION OF HYDRO POWER FROM WATER RESOURCES
		<i>Autora prof. dr Branislava Đorđevića</i>

**IZDAVAČ:**  
**PUBLISHER:**

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

11 000 Beograd, Balkanska 13

Telefon: 686-633, 643-823, 688-092, 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)

**DIREKTOR I GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK**  
**DIRECTOR AND CHIEF EDITOR**

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

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

Branislav A. Bošković, dipl. ing., predsednik, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;

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

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing., član, Ministarstvo za energetiku i rudarstvo u Vladi Republike Srbije, Beograd;

Radomir Naumov, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;

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

Branko Kotri, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić.

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

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

Dr Duško Tubić, dipl. ing., zamenik predsednika, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

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

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

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

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

Prof. dr Nikola Rajaković, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;

Prof. dr Sreten Škuletić, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Podgorica;

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

Dr Milivoje Cvetinović, dipl. mat., član, SAP, Beograd;

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

Mr Milan Gavrilović, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

Mr Gojko Dotlić, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

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

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

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

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

Aleksandar Vlajčić, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

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

Mladen Šerventi, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;

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

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

Lela Lončar, dipl. filolog, član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd.

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

Jovo Todorović dipl. teh.

**LEKTOR**

**LINGUISTIC REVIEW**

Lela Lončar, dipl. filolog

**TEHNIČKI CRTAČ**  
**MAPS AND GRAPHICS**

Milanka Pejović,  
teh. crtač

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Časopis „Elektroprivreda” se izdaje u 2004. godini uz finansijsku pomoć Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije

The „Elektroprivreda” journal is published in 2004 with financial support of Ministry for Science, Technology and Development of the Republic of Serbia

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

---

Dragan P. Popović

# Praktični aspekti automatizovanog proračuna graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija

Originalni naučni rad  
UDK: 621.315; 621.31

---

Rezime:

*U ovom delu rada, koji je u prirodnom i logičkom kontinuitetu sa njegovim prvim delom, izlažu se relevantni praktični aspekti automatizovanog proračuna graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija. Izlažu se najpre dalja metodološka unapređenja vezana za proces automatizacije, sam način automatizacije proračuna i karakteristike i mogućnosti razvijenog računarskog programa. Njegova praktična primena izvršena je na primeru automatizovanog proračuna graničnih prenosnih kapaciteta u okviru Druge UCTE sinhronne zone. Ona je omogućila da se realno sagledaju karakteristike i mogućnosti razvijenog softvera sa aspekta potreba pogonske prakse u novim uslovima liberalizovanog tržišta električne energije.*

**Ključne reči:** *automatizovani proračun, prenosni kapaciteti, elektroenergetska interkonekcija, otvoreno tržište električne energije, Druga UCTE sinhrona zona*

---

Abstract:

*PRACTICAL ASPECTS OF AUTOMATIC CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITIES ASSESSMENTS OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTIONS*

*This part of paper, which is in natural and logical continuation with its first part, deals with relevant practical aspects of automatic transmission capacity assessments of electric power interconnection. The further methodological advancement according to the process of automatization, the manner thereof, as well as the possibility and characteristics of developed computer program are presented. Its practical application is made on the example of automatic cross-border transmission capacity calculation in the scope of the Second UCTE synchronous zone. This application has enabled a real evaluation of the characteristics and possibility of this computer program, regarding the real necessities of operational practice under new conditions of liberalized electricity markets.*

**Key words:** *automatic assessment, transmission capacities, electric power interconnection, open electricity market, Second UCTE synchronous zone*

---

## 1. UVOD

U prvom delu ovoga rada [1], istaknuti su značaj i aktuelnost procesa liberalizacije tržišta električne

energije i, konsekvntno tome, restruktuiranje elektroprivrednih kompanija. U pomenutom kontekstu, između ostalog, posebno je naglašeno da problematika sigurnosti, odnosno pitanje utvrđivanja gra-

---

*Prof. dr Dragan P. Popović, naučni savetnik Instituta „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a, e-mail: dpopovic@ieent.org*

ničnih prenosnih kapaciteta (u daljem tekstu za ovaj pojam koristiće se oznaka NTC - Net Transfer Capacity [2]) u okviru realnih interkonekcija, dobija prvorazredni praktični značaj.

Imajući u vidu prethodno rečeno, kao i činjenicu da će u bliskoj budućnosti, restrukturirani deo EPS-a koji se odnosi na prenosni sistem (a koji bi shodno direktivi Evropske Unije (EU) bio odvojeno i nezavisno preduzeće) vršiti proračune NTC-a, pokrenuta je inicijativa za izradu Studije - Projekta, čiji bi finalni rezultat bio računarski program za automatizovani proračun NTC-a, uz puno respektovanje aktuelne prakse Udruženja evropskih operatera prenosne mreže (ETSO). Institut „Nikola Tesla” intenzivno radi na ovoj studiji, čiji je naziv „Razvoj i praktična primena računarskog programa za automatizovan proračun prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija”. Rezultati do sada realizovanih aktivnosti, koje su se odnosile na relevantne metodološke i praktične aspekte razvijenog softvera za automatizovan proračun graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija predmet su rada, koji se sastoji iz dva dela.

U prvom delu rada [1], izloženi su relevantni metodološki aspekti jednog prilaza proračunu graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija. Za razliku od uobičajenih prilaza, baziranih na konvencionalnom modelu tokova snaga, u prilazu Instituta „Nikola Tesla” proračun prenosnih kapaciteta je baziran na nestandardnom modelu tokova snaga, koji, uz mogućnost „samopokretanja” analiza, omogućuje dalju sukcesivnu analizu niza karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja. Oni su bazirani, dakle na nestandardnoj metodologiji za analize statičke sigurnosti, uz korišćenje svih njenih pogodnosti kod utvrđivanja graničnih prenosnih kapaciteta, uz puno respektovanje aktuelnih kriterijuma, standarda i prakse ETSO [2].

Ovaj, drugi deo rada, koji je u prirodnom i logičkom kontinuitetu sa pomenutim prvim delom, bavi se relevantnim praktičnim aspektima, vezanim za automatizaciju proračuna NTC-a. U njemu se, posle ovog prvog poglavlja, koje ima uvodni karakter, u drugom poglavlju daje lista korišćenih skraćenica i definicija, saglasno praksi ETSO [2]. Treće poglavlje bavi se glavnim doprinosom u pomenutoj studiji - automatizacijom proračuna NTC-a. U četvrtom poglavlju, daju se rezultati (i njihov širi komentar) praktične primene razvijenog softvera na primeru Druge UCTE sinhronne zone. Peto poglavlje bavi se daljim pravcima rada na ovoj problematici. U šestom poglavlju daju se zaključci i na kraju, u sedmom poglavlju, daje se kraći popis korišćene literature.

## 2. KORIŠĆENE SKRAĆENICE I DEFINICIJE

- **NTC** (Net Transfer Capacity) - *neto prenosni kapacitet*, koji predstavlja najbolje procenjeni limit za total aktivne snage razmene između dva EES-a (regiona, pula, ili dve regulacione oblasti) u razmatranoj interkonekciji, odnosno to je maksimalna vrednost programa razmene između dve oblasti, kompatibilna sa sigurnosnim standardima koji se primenjuju u obe oblasti i koja uzima u obzir tehničke nesigurnosti u budućim stanjima razmatrane interkonekcije.
- **AAC** (Already Allocated Capacity) - *već dodeljeni kapacitet*, koji predstavlja ukupni iznos dodeljenih prenosnih prava, bilo da su to kapaciteti ili programi razmene, zavisno od primenjene alokacione metode (ili metode dodele kapaciteta).
- **ATC** (Available Transfer Capacity) - *raspoloživi prenosni kapacitet*, koji predstavlja preostali prenosni kapacitet između dva dela interkonekcije, imajući u vidu već ugovorene razmene između njih, odnosno predstavlja deo NTC-a, koji ostaje raspoloživ posle svake faze alokacione procedure (ili procedure dodeljivanja kapaciteta), i kao takav je validan za buduće komercijalne aktivnosti i transakcije.
- **TTC** (Total Transfer Capacity) - *ukupni prenosni kapacitet*, odnosno ukupni iznos snage koji može da se razmenjuje kontinualno između posmatranih EES-a, odnosno delova interkonekcije, a da ne bude ugrožena njena sigurnost, respektujući unapred zadate tehničke kriterijume i ograničenja.
- **TRM** (Transmission Reliability Margin) - *margina pouzdanosti prenosa*, koja je uvedena iz sledećih razloga:
  - neplanirane varijacije fizičkih tokova snaga, koje su uzrokovane funkcionisanjem sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene;
  - vanredna, havarijska razmena snaga između operatera prenosnih sistema (TSO), nastala kao posledica neočekivanih debalansa snaga (gubici injektiranja, odnosno ispadi većih proizvodnih kapaciteta) u realnom vremenu;
  - netačnosti u podacima i merenjima, kao i u primenjenim računarskim metodama i modelima;
- **NTF** (Notified Transmission Flow) - *objavljeni tok snage*, odnosno *fizički tokovi snaga* koji će nastati realizacijom postojećih ugovora o razmeni između posmatranih EES-a, odnosno delova interkonekcija;
- **BCE** (Base Case Exchange) - razmene u baznom stanju;
- $\Delta E_{max}$  - maksimalan iznos korekcija snaga generatora tokom proračuna **NTC-a** (u odnosu na polazno, bazno stanje) u stanju razmatrane interko-

nekcije, pri kome još nije došlo do narušavanja zadatih sigurnosnih ograničenja;

- **TTF** (Total Transfer Flow) - **ukupni prenosni tok snage**, koji predstavlja neto iznos fizičkih tokova snaga na graničnom preseku između posmatranih oblasti, koji odgovaraju programu razmene u iznosu **TTC**, respektujući pri tome postojanje razmene u baznom stanju. To je fizički maksimum snage u preseku između posmatranih oblasti, koji je kompatibilan sa njihovim sigurnosnim standardima. On može da bude sastavljen od sledeće dve komponente:
- **NTF** (Notified Transmission Flow) - **objavljeni tok snage**;
- $\Delta F_{max}$  (Physical flow)- fizički tokovi snaga na svim interkonektivnim dalekovodima između posmatranih oblasti, uzrokovani maksimalnom promenom snaga generatora  $\Delta E_{max}$  koji su učestvovali u proračunu **NTC-a**.

### 3. AUTOMATIZACIJA PRORAČUNA GRANIČNIH PRENOSNIH KAPACITETA

#### 3.1. Dalja unapređenja koja imaju metodološki karakter

U toku rada na studiji, pomenutoj u uvodnom izlaganju ovog dela rada, izvršena su sledeća unapređenja, koja imaju metodološki karakter, a koja su u funkciji zahteva za automatizovani proračun **NTC-a**:

- Formiran je model učešća generatora u proračunima **NTC-a** [3], čija **generalna forma** omogućuje jednostavno modelovanje niza modela i njihovih kombinacija do sada korišćenih u praksi. Karakteristike razvijenog modela obezbeđuju da se na veoma jednostavan način mogu da „preslikaju” različite pogonske situacije, vezane za uobičajene „vozne redove” izvora u uslovima otvorenog tržišta električne energije. Pri tome, obezbeđeno je postojanje odgovarajuće (unapred zadate) rotacione i regulacione rezerve tokom proračuna **NTC-a**.
- Izvršen je izbor adekvatnog participacionog faktora generatora, s obzirom na prethodno stečena praktična iskustva na primeru realne interkonekcije. Ona su pokazala da ubedljivo najveću jednostavnost, realnost, potrebnu fleksibilnost, dakle i zahtevanu efikasnost ima model participacije generatora, u kome se povećanje/smanjenje snage vrši proporcionalno aktuelnim vrednostima rotacione rezerve generatora koji učestvuju u proračunu **NTC-a** [3].
- Imajući u vidu realnu pogonsku praksu, u kojoj se kod povećanja aktivne snage generatora povećava i njegova naponska referenca, dok se kod sniženja snage ona snižava, uvedena je mogućnost korekci-

je naponskih referenci angažovanih generatora tokom proračuna **NTC-a**, saglasno prirodi i veličini promene aktivne snage [3]. Na taj način se dolazi do realnijih tokova reaktivnih snaga, a time do pouzdanijih indikacija za (ne)narušavanje zadatih ograničenja u analizama sigurnosti.

- Razvijeni generalizovani model učešća generatora uspešno je inkorporiran u programsku celinu za automatizovani proračun **NTC-a**, čime je, uz visoku realnost i tačnost dobijenih rezultata, omogućena i velika brzina i efikasnost njihovog odvijanja.
- Formulirana je **generalna forma** injeccionog modela transformatora, koja omogućuje jednostavno predstavljanje svih postojećih vrsta energetskih transformatora (sa i bez regulacije ugla) i statičkih transformatora sa regulacijom ugla (tzv. serijski **FACTS** kontroleri tokova snaga)[4].
- Takav način modelovanja, koji ne ugrožava simetričnost matrice admitansi **EES-a**, uspešno je inkorporiran u metodologiju za analizu sigurnosti, odnosno omogućio je da se tokovi snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima određuju i dalje posredstvom brzog raspregnutih postupaka datog u potpoglavlju 5. 3 prvog dela rada [1], u kome matrice koeficijenata imaju konstantne elemente za nepromenjenu topologiju. Jedino, bile su samo potrebne minimalne dopune kod formiranja vektora debalansa snaga tokom iterativne procedure, saglasno usvojenom načinu modelovanja transformatora preko odgovarajućih snaga injeckiranja u tačkama njihovog priključka [4].
- Omogućeno je da se polazno, odnosno tzv. bazno stanje i sva stacionarna stanja, koja se formiraju tokom proračuna **NTC-a**, određuju na bazi jednom formiranih (faktorisanih i memorisanih) submatrica koeficijenata, što takođe doprinosi visokoj efikasnosti ovih proračuna.
- Omogućeno je da se posebno zadaju dozvoljena preopterećenja u analizama sigurnosti za dalekovode („obične” i interkonektivne) i transformatore.

#### 3.2. Dalja unapređenja u pogledu aplikacije

Dalje, izvršena su odgovarajuća unapređenja u pogledu samog načina i mogućnosti primene razvijene programske celine. Kao rezultat, unapređena i modifikovana verzija računarskog programa **STATIC**, razvijena u Institutu Nikola Tesla, koja vrši automatizovani proračun **NTC-a**, pruža korisniku sledeće četiri opcije primene:

- **OI** - Identifikacija i verifikacija polaznog stanja - **I faza** -određivanje samo tokova snaga u tzv. baznom stanju (uz veoma široku dijagnostiku veza-

nu za proveru tačnosti i harmonizaciju relevantnih ulaznih podataka);

- **OII** - Identifikacija i verifikacija polaznog stanja - **II faza** - određivanje tokova snaga u tzv. baznom stanju i obavljanje analiza sigurnosti za to stanje;
- **OIII** - Automatizovani proračun NTC-a, za fazu planiranja (planning [2]) na godišnjem nivou;
- **OIV** - Automatizovani proračun NTC-a, za fazu dodeljenog kapaciteta (allocated [2]) na mesečnom, sedmičnom i dnevnom nivou. S obzirom na mogućnost dobijanja preciznijih ulaznih podataka i zahtevanoj većoj tačnosti proračuna, u ovoj fazi uvedena je mogućnost korekcije naponskih referenci angažovanih generatora tokom proračuna NTC-a, saglasno prirodi i veličini promene aktivne snage. Praksa je pokazala da se na taj način dolazi do realnijih tokova reaktivnih snaga, a time do pouzdanijih indikacija za (ne)narušavanje zadatih ograničenja u analizama sigurnosti.

Dalje, postoje sledeće dve opcije za izbor referentnog stanja, od koga startuje automatizovani proračun NTC-a:

- Prva opcija se odnosi na stanje bez posebno specificiranih međusobnih razmena u baznom stanju, na bazi podataka dobijenih od učesnika u interkonekciji;
- Druga opcija, kada te razmene postoje, odnosno kada se one precizno specificiraju u okviru ulaznih podataka (**BCE** - razmene u baznom stanju).

Zatim, postoje sledeće opcije izbora, odnosno formiranja liste poremećaja, za potrebe analiza sigurnosti :

- Samo ispadi generatora (jednostruki i višestruki);
- Samo ispadi elemenata (transformatora i dalekovoda);
- Kombinovani ispadi (generatora i elemenata);
- Automatsko formiranje liste poremećaja u razmatranoj interkonekciji (obuhvataju se ispadi svih elektrana i svih elemenata koji su opterećeni preko unapred zadatog procenta od svog termičkog limita);
- Simultana promena ukupne snage potrošača u razmatranoj interkonekciji.

Prva grupa poremećaja (samo ispadi generatora), kao zasebna celina, uvedena je da bi se precizno sagledali efekti poremećaja, pri kojima je izrazito aktivna, pre svega primarna regulacija učestanosti, a zatim i sekundarna regulacija učestanosti i snaga razmene. Takođe, pri ovim poremećajima značajne efekte daje preduzimanje odgovarajućih dispečerskih akcija, koje imaju karakter havarijske isporuke. Dakle, u pitanju su efekti koji u velikoj meri utiču na procenu veličine prenosnog kapaciteta (TRM).

U dosadašnjoj praksi tom pitanju posvećivana je posebna pažnja (na primer [5, 6, 7, 8]), ali i dalje

se smatra da još uvek nije formulisana odgovarajuća procedura koja bi, na jedan sofisticiran način, izvršila precizniju procenu **TRM**. Stoga, u prilazu Instituta „Nikola Tesla” učinjen je pokušaj da se izvrši preciznija procena ove važne kategorije prenosnog kapaciteta. To je postignuto uvođenjem mogućnosti pojedinačnog rada sa navedenom prvom i drugom grupom poremećaja, kao i uvođenjem mogućnosti preduzimanja odgovarajućih dispečerskih akcija, odnosno havarijskih isporuka.

Dakle, poređenjem rezultata proračuna za navedenu prvu grupu poremećaja (samo ispadi generatora, sa i bez dispečerskih akcija) i drugu (samo ispadi elemenata) grupu poremećaja, dolazi se do mogućnosti da se izvrši dobra procena veličine **TRM**. Na taj način, na bazi dobijenog **TTC** za drugu grupu poremećaja, i izvršene dobre estimacije za **TRM**, dolazi se do tražene vrednosti za prenosni kapacitet **NTC**. O tome će biti više reči u narednom poglavlju.

Takođe, u okviru razvijenog i testiranog programskog paketa za automatizovani proračun NTC-a postoji mogućnost izbora njegovog rada sa i bez ekvivalenta (bilo eksternih, bilo internih). Osnovu tog ekvivalenta čini dobro poznata Wardova tehnika ekvivalentiranja [9]. Postoji mogućnost izbora tzv. klasičnih (ili standardnih) tipova statičkih ekvivalenta: admitantni ili injekcioni (u oba slučaja, postoji mogućnost zanemarivanja šantova - otočnih delova elemenata EES-a). Dalje, postoji mogućnost izbora proširenog Wardovog ekvivalenta (Extended Ward) [10], koji poboljšava „odziv” po reaktivnoj snazi u graničnim čvorovima, kao i izbora generalizovanog Wardovog ekvivalenta (Generalized Ward) [11], koji vrši dalje poboljšanje ovog „odziva”.

Međutim, poseban izazov bio je kako dovoljno tačno da se uvažavaju efekti primarne regulacije učestanosti susednih EES-a, za poremećaje tipa gubitaka većih injektiranja, što je za EES Srbije i njegovo okruženje, od velikog praktičnog značaja. U tom cilju, formiran je jedinstveni statički ekvivalent spoljnog sistema (Unified External Network Equivalents) koji, kako je to pokazano u [12, 13], veoma efikasno i dovoljno tačno uvažava efekte primarne regulacije, kako napona tako i učestanosti delova interkonekcije koji se ekvivalentiraju, uključujući i delove sopstvene mreže (koja se takođe ekvivalentira). Pri tome, predviđena je mogućnost selektivnog definisanja delova susednih EES-a, koji bi se eksplisitno modelovali (tzv. „buffer” zone).

Davanje ovakog „publiciteta” ekvivalentima u kontekstu proračuna NTC-a odražava stav autora ovog rada o velikoj praktičnoj korisnosti njihovog prisustva u slučajevima kada nije potrebno da se iz tranzitnih razloga modeluje mreža nižeg naponskog nivoa (na primer 110 kV). Tada, ako se u njoj nalazi

značajan broj generatora, obezbeđena je tačnost proračuna NTC-a, jer se dovoljno tačno utvrđuje njihova participacija u primarnoj regulaciji napona i učestanosti nakon razmatranih poremećaja.

Takođe, nakon povezivanja Druge UCTE sinhronne zone sa glavnim delom mreže UCTE i formiranja Regionalnog tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi, jedinstveni statički ekvivalent formiran u graničnim tačkama posmatranog regiona će doprinosti znatno efikasnijem i bržem proračunu NTC-a, uz obezbeđenje željene tačnosti. Dakle, sa ekvivalentima ovoga tipa, i dalje bi postojala mogućnost za tačniju procenu prenosnog kapaciteta TRM, s obzirom na pomenuta njegova svojstva u pogledu uvažavanja efekata primarne regulacije.

### 3.3. Tok odvijanja automatizovanog proračuna NTC-a

U realizaciji unapređene verzije računarskog programa STATIC, koja vrši automatizovani proračun NTC-a, uspešno je primenjen Compaq Fortran Compiler- verzija 6. x. Time je u potpunosti respektovan predlog EPS-a u pogledu neophodne implementacije sa razvojnim alatima, za koje postoji regulisana licenca. Ova unapređena verzija programa STATIC ima ukupno 67 potprograma tipa subrutine, 24 ulaznih i 10 izlaznih datoteka. Ona omogućuje tretiranje interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora i 200 regulacionih basena.

Na slici 1 daje se uprošćeni blok dijagram toka automatizovanog proračuna NTC-a. Proračuni startuju sa formiranjem i sređivanjem ulaznih podataka razmatrane interkonekcije (blok 1). Kao što je to već rečeno u [1], saglasno praksi ETSO, proračuni NTC-a zahtevaju razrađenu proceduru razmene potrebnih podataka između učesnika [14, 15], kao i neophodnu efikasnu softversku podršku koja bi omogućavala automatizaciju pomenutih aktivnosti, a samim tim i skraćivanje vremena potrebnog za njihovo obavljanje, što je od izuzetne praktične važnosti. U prilazu Instituta „Nikola Tesla”, za te svrhe razvija se specijalni interfejs za dvosmernu komunikaciju između podataka, koji se daju u UCTE i PTI formatu sa bazom, u ORACLE okruženju.

Po sređivanju ulaznih podataka, vrši se proračun polaznog stanja, primenom procedure („samopokretanje”) opisane u [16] (blok 2). To spada u veoma važnu fazu proračuna NTC-a, jer se omogućuje da se otklone uočene greške u ulaznim podacima (koje, nažalost nisu retke, kada je „ljudski faktor” u pitanju). Ako je izabrana samo ova opcija (OI), po određivanju tokova snaga program se zaustavlja, čime se korisniku omogućuje mali predah da osmisli dalji rad.

Izborom opcije OII, po određivanju tokova snaga, dalje se vrše analize sigurnosti (blok 3), za broj i vrste poremećaja koji izabere korisnik. Ako je izabrana ova opcija, po izvršenoj analizi sigurnosti, program se zaustavlja.

Ukoliko nema narušavanja sigurnosnih ograničenja u razmatranom polaznom stanju, to znači da proračun NTC-a može nesmetano da se dalje obavlja. Ukoliko je, pak, došlo do narušavanja sigurnosnih ograničenja, tada bi bilo neophodno da se primene odgovarajuće mere u cilju eliminacije nastalih prekoračenja. Na primer, uvođenjem odgovarajućeg korektivnog upravljanja u analize sigurnosti, što će biti svakako predmet daljeg rada na ovoj problematiki.

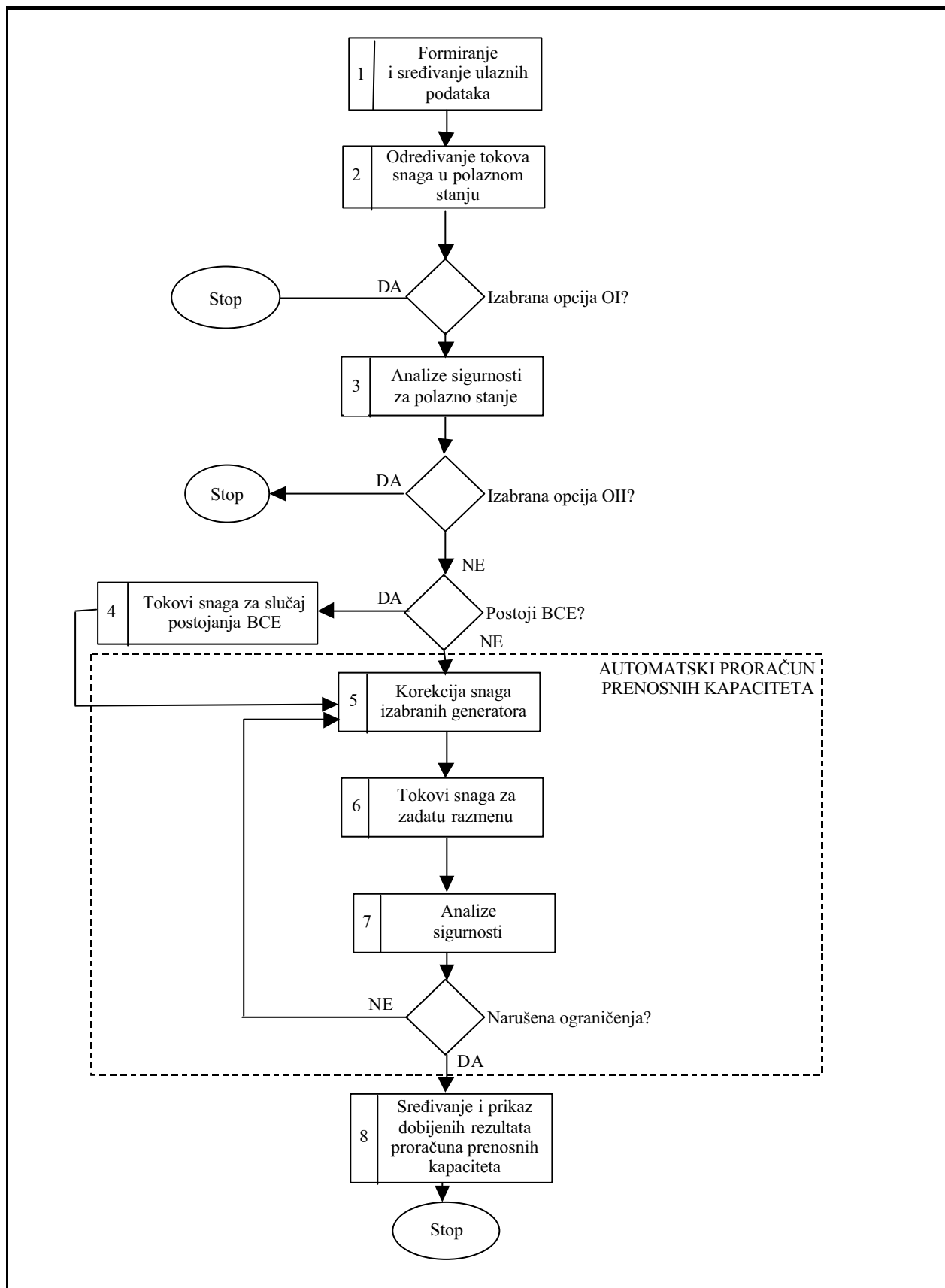
Takođe, u budućem radu posebna pažnja biće data i odgovarajućim procedurama za upravljanje zagušenjem (congestion management), u okviru kojih posebno mesto ima proračun NTC-a. Pri tome biće u potpunosti respektovana činjenica da u praksi ETSO postoji niz metoda koje služe za eliminaciju uočenih zagušenja [17].

Dalje, ako je kod izbora referentnog stanja izabrana opcija koja se odnosi na stanje bez posebno specificiranih međusobnih razmena u baznom stanju, vrši se automatizovani proračun NTC-a, kroz obavljanje aktivnosti navedenih u blokovima 5, 6 i 7.

Ukoliko je u pitanju opcija u kojoj te razmene postoje (već pomenute BCE - razmene u baznom stanju), i kada se one precizno specificiraju u okviru ulaznih podataka, uključujući i listu generatora koji u tome učestvuju, vrši se određivanje tokova snaga za to stanje (blok 4). Zatim, dalje se vrši automatizovan proračun NTC-a (pomenuti blokovi 5, 6 i 7).

U bloku 5, za izabrani diskretni korak promene totala snage razmene (uobičajena vrednost je 50 MW) između EES-a (ili oblasti), vrši se korekcija snaga izabranih generatora. Kao što je već rečeno, razvijena generalna forma modela učešća generatora, izložena u [4], omogućuje korisniku široke mogućnosti izbora. Dalje, određuju se tokovi snaga za to stanje (blok 6), da bi se zatim obavile analize sigurnosti (blok 7), prema listi poremećaja koju izabere korisnik.

U okviru ovih analiza, vrši se najpre brza selekcija potencijalno kritičnih poremećaja, po metodi izloženoj u [18]. Za poremećaje tipa gubitaka značajnih injektiranja (na primer, ispadi generatora velikih jediničnih snaga), vrši se najpre brza procena dinamike promene učestanosti tokom procesa primarne regulacije, uključujući i procenu uspostavljene njene kvazistacionarne vrednosti, na bazi postupka izloženog u [19]. Ujedno, sagledana dinamika promene učestanosti omogućuje utvrđivanje (ne) reagovanja sistema automatskog frekventnog rasterećenja potrošača.



Slika 1. Uprošćeni dijagram toka automatizovanog proračuna NTC-a



Slučajevi u kojima postoji indicija da će doći do ovog reagovanja, automatski se kandiduju za strožije analize. Dalje, određuje se odnos analiziranog debalansa snage i iznosa rotacione i regulacione rezerve basena u kome je nastao debalans, a nepovoljnost tih odnosa takođe automatski kandiduje tretirani slučaj za strožije analize. One se vrše na bazi analiza karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja, na način opisan u petom poglavlju prvog dela ovoga rada [1].

Aktivnosti opisane u blokovima 5, 6 i 7 obavljaju se na **automatizovani** način, sve dok ne bude narušeno neko od sigurnosnih ograničenja. Kada do toga dođe, to znači da je dostignut limit prenosnog kapaciteta u datim uslovima razmatrane interkonekcije. Tada se vrši sređivanje i prikaz dobijenih rezultata proračuna prenosnih kapaciteta (blok 8), respektujući sve prethodno rečeno u vezi njihovih definicija.

Na kraju ovog poglavlja, trebalo bi naglasiti višestrukost mogućnosti i namena ovoga računarskog programa, koji je u svojoj osnovnoj funkciji namenjen automatizovanom proračunu prenosnih kapaciteta. Dakle, pored pomenutog, moguće je vršiti samo proračune tokova snaga, zatim obavljati samo analize sigurnosti za niz različitih zadatih stanja, kao i analize efekata tranzita snaga između bilo kojih punktova u razmatranoj interkonekciji.

#### 4. PRAKTIČNA PRIMENA RAZVIJENOG SOFTVERA ZA AUTOMATIZOVANI PRORAČUN GRANIČNIH PRENOSNIH KAPACITETA

U toku razvoja softvera za automatizovani proračun NTC-a, njegovo testiranje je vršeno na primeru Druge UCTE sinhronne zone, odnosno sinhronog paralelnog rada EES-a Srbije i Crne Gore (SCG), dela Republike Srpske (RS), Makedonije (MK), Rumunije (RO), Bugarske (BG), Grčke (GR) i Albanije (AL). Modelovane su kompletne mreže 400 i 220 kV u svim pomenutim EES, osim u EES Grčke, gde su kompletno modelovane mreže 400 i 150 kV samo u njegovom severnom delu (a ostatak je predstavljen preko ekvivalenta Wardovog tipa, dobijenog od grčke elektroprivrede). Ukupan broj čvorova je iznosio 260, od kojih su 58 bili generatorski čvorovi.

Na slici 2 daje se blok dijagram razmatrane interkonekcije, sa tokovima aktivnih (MW) i reaktivnih (Mvar) snaga na interkonektivnim dalekovodima, za stanje bez razmena među EES-ima (sem razmene EES-a Srbije i Crne Gore sa EES dela Republike Srpske). Dakle, **BCE** između svih ostalih EES-a imaju nultu vrednost, što znači da su prikazani fizički tokovi snaga po interkonektivnim dalekovodima

tzv. slobodni tokovi (odnosno fizički tok **NTF**, u ovom slučaju, sadrži samo slobodne tokove snaga). U ovom stanju nije bilo narušavanja tehničkih ograničenja (naponskih i strujnih), kao i tokom analiza sigurnosti, respektujući standardni ( $n - 1$ ) kriterijum.

Na istoj slici 2, u zgradama, daju se tokovi snaga na interkonektivnim dalekovodima u slučaju kada postoji sledeća razmena u baznom stanju: RO → SCG u iznosu 300 MW. U tom slučaju dolazi do promene smera snage na interkonektivnom vodu Đerdap (SCG) - P. De Fier (RO), i taj fizički tok snage u iznosu od 9 MW (sada u smeru RO → SCG) je zapravo veličina objavljenog toka snage NTF (koja je sada, uz slobodni tok snage, rezultat i pomenute razmene od 300 MW). I ovo stanje je zadovoljilo sigurnosna ograničenja.

Ujedno, podaci o tokovima snaga, dati na slici 2, pokazuju da u slučaju kada SCG uvozi u totalu 300 MW iz RO (naravno, za dato angažovanje izvora), 60 % snage u iznosu 181 (9-(-172)) MW direktno „dolazi” iz RO preko interkonektivnog dalekovoda Đerdap (SCG)-P. De Fier (RO). Ostatak od 40 %, 119 (291-172) MW „ide” preko BG, s tim da 77 (169-92) MW (26 %) dalje direktno „ide” u SCG, preko interkonektivnog dalekovoda Sofija (BG)-Niš (SCG), a 42 (122-80) MW (14 %) „ide” preko GR. Dakle, pomenuti pokazatelji govore da u realizaciji ove razmene učestvuju (doduše veoma malo) i GR, MK i AL.

Ovo stanje sa razmenom RO → SCG, u iznosu 300 MW, predstavljalo je polazno, tzv. bazno stanje, od koga su startovali proračuni NTC. Dakle, u pitanju je bilo polazno stanje sa sledećim interesantnim (reklo bi se i indikativnim) pokazateljima:

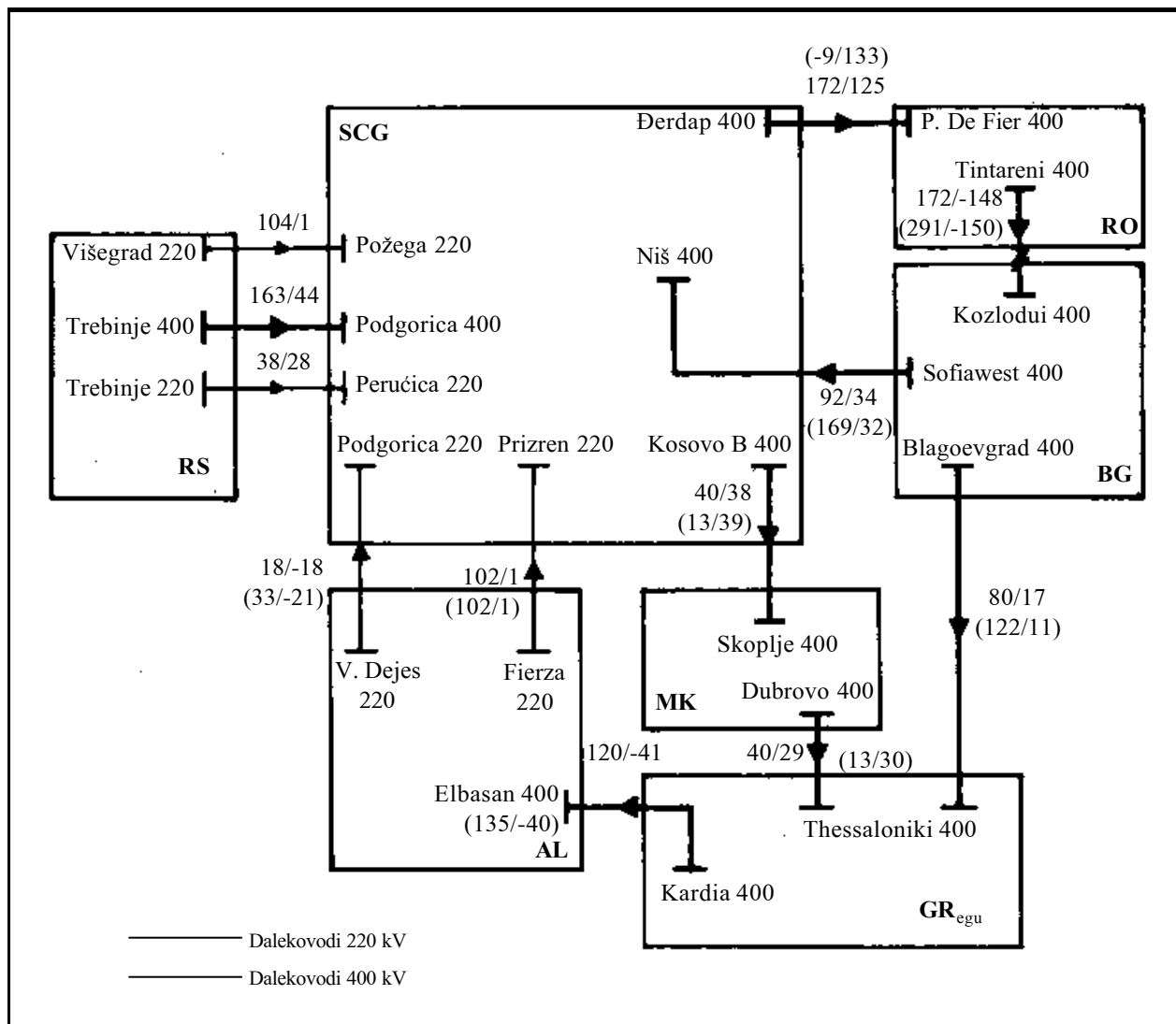
- bazna razmena **BCE**  $^{RO \rightarrow SCG} = 300$  MW,
- objavljeni tok snage **NTF**  $^{RO \rightarrow SCG} = 9$  MW.

Ujedno, ovi pokazatelji evidentno potvrđuju, već više puta pominjanu, kompleksnost proračuna NTC-a, odnosno kompleksnost kod utvrđivanja vrste i tipa prenosnog kapaciteta.

Od niza dobijenih rezultata proračuna NTC-a, koji su startovali od ovog baznog stanja, radi ilustracije, izdvojiće se samo rezultati koji se odnose na slučaj utvrđivanja graničnih prenosnih kapaciteta između EES-a Rumunije (RO) (izvoz) i Srbije i Crne Gore (SCG) (uvoz).

Imajući u vidu tranzitne puteve, koji su utvrđeni u slučaju prethodno razmatrane razmene RO → SRCG u iznosu 300 MW (**BCE**  $^{RO \rightarrow SCG} = 300$  MW), bilo je jasno da u analizama sigurnosti treba obuhvatiti poremećaje, ne samo u EES RO i SCG, već i u EES BG i MK.

U slučaju poremećaja tipa ispada elementa (obuhvaćeni ispadi svih elementa u pomenutim EES, čije opterećenje je prevazilazilo 40 % od termičke grani-



Slika 2. Blok dijagram Druge UCTE sinhronne zone, sa tokovima aktivnih (MW) i reaktivnih (Mvar) snaga na interkonektivnim dalekovodima

ce), do narušavanja sigurnosnih ograničenja je došlo kod totala razmene RO → SCG u iznosu od 750 MW. Kritičan ispad je bio ispad transformatora 400/231 kV/kV, snage 400 MVA u P. De Fier (RO), tada opterećenog sa 356 MW i 24 Mvar, a element sa preoračenim termičkim limitom u iznosu od 4 % je dalekovod 220 kV u EES RO Paroseni - Baro Mare.

Dakle, ukupni prenosni kapacitet  $TTC^{RO \rightarrow SCG}$  u ovom slučaju je iznosio 700 MW. To je veličina za 50 MW niža od pomenutih 750 MW, jer pri totalu razmene u prethodnom koraku njene promene još nije dolazilo do narušavanja sigurnosnih ograničenja. Dakle, veličina  $\Delta E_{max}$  je iznosila 400 MW (jer, za taj iznos su izabrani generatori u EES RO povećali svoju snagu u odnosu na polazno stanje sa baznom razmenom, a izabrani generatori u EES SCG, smanjili).

Pri tome, ukupni prenosni tok snage  $TTF^{RO \rightarrow SCG}$  je iznosio 249 MW. Po već datoj definiciji, on je predstavljao neto iznos fizičkih tokova snaga na graničnom preseku između posmatranih EES (u ovom slučaju tok snage na jedinom interkonektivnom dalekovodu između EES-a RO i SRCG, P. De Fier (RO) - Đerdap (SCG)), koji odgovaraju programu razmene u iznosu dostignutog  $TTC^{RO \rightarrow SCG}$  (700 MW), respektujući pri tome postojanje razmene u baznom stanju.

To praktično znači da novo uvedena kategorija  $TTF$  predstavlja fizički maksimum snage u preseku između posmatranih oblasti za dato stanje, koji je kompatibilan sa njihovim sigurnosnim standardima. U ovom slučaju, fizički tok  $TTF$  (249 MW) je imao znatno manju vrednost od ukupnog prenosnog kapaciteta  $TTC$  (700 MW), što je direktna posledica to-

poloških struktura graničnih EES-a i lokacija angažovanih izvora. Utvrđeni **TTF** bio je sastavljen od sledeće dve komponente:

- Objavljeni tok snage  $NTF^{RO \rightarrow SCG}$  u iznosu od 9 MW, jer po definiciji to su fizički tokovi snaga na svim interkonektivnim dalekovodima između razmatranih oblasti u baznom stanju, pre korekcije snaga generatora, koje će se vršiti tokom proračuna NTC-a. U razmatranom slučaju, to je već utvrđeni fizički tok snage na jedinom interkonektivnom dalekovodu između EES-a RO i SCG, P. De Fier (RO) - Đerdap (SCG), koji je nastao kao posledica prisustva razmene u baznom stanju  $BCE^{RO \rightarrow SCG}$  u iznosu od 300 MW i tzv. slobodnih (paralelnih) tokova snaga (fizički tokovi snaga za multi program razmene).
- Fizički tok snage  $\Delta F_{max}^{RO \rightarrow SCG}$  u iznosu od 240 MW. Po već datoj definiciji, to je fizički tok snaga na svim interkonektivnim dalekovodima (u našem slučaju, fizički tok snage na pomenutom jedinom interkonektivnom dalekovodu) između posmatranih oblasti, uzrokovan maksimalnom promenom snaga generatora  $\Delta E_{max}$  (400 MW), koji su učestvovali u proračunu NTC-a.

Dakle, saglasno relaciji (4) datoj u [1], dobija se:

$$\begin{aligned} TTF^{RO \rightarrow SCG} &= NTF^{RO \rightarrow SCG} + \Delta F_{max}^{RO \rightarrow SCG} = \\ &= 9 + 240 = 249 \text{ MW} \end{aligned}$$

Ujedno, interesantno je napomenuti da u ovom graničnom slučaju, kada SCG uvozi dodatnih 400 MW iz RO (a u totalu 700 MW, uključujući razmenu u baznom stanju), 60 % dodatne snage razmene u iznosu od 240 (249-9) MW i dalje direktno „dolazi” iz RO preko interkonektivnog dalekovoda Đerdap (SCG) - P. De Fier (RO). Ostatak od oko 40 % dodatne razmene, u iznosu od 160 (451-291) MW, „ide” preko BG, s tim da 100 (269-169) MW (oko 26 %) dalje direktno „ide” u SCG, preko interkonektivnog dalekovoda Sofija (BG)-Niš (SCG), a 60 (182 -122) MW (oko 14 %) „ide” preko GR .

Dakle, ovi pokazatelji govore da su, u realizaciji ove dodatne razmene u iznosu od 400 MW, praktično zadržana ista učešća EES-a u tranzitima aktivnih snaga, kao u slučaju bazne razmene u iznosu od 300 MW. To i ne iznenađuje, ako se zna da je, kada su u pitanju samo tokovi aktivnih snaga, moguća linearizacija odgovarajućeg matematičkog modela. S druge strane, izloženi pokazatelji i njihovi odnosi, na evidentan način ukazuju na više puta apostrofiranu kompleksnost vezanu za proračune NTC-a.

Ta kompleksnost još je više potencirana kada je u pitanju procena prenosnog kapaciteta  $TRM^{RO \rightarrow SCG}$ . S toga ne iznenađuje da u dosadašnjoj prak-

si ova procena nije određivana u svim EES u okviru ETSO na jedinstveni način, već svaki EES (ili grupa EES-a) je imao svoj pristup određivanju **TRM-a** [5, 6, 7, 8, 20]. **TRM** se u većini EES-a procenjuje, na bazi empirije ili na bazi statistike, a u „igri” su statističke procene odstupanja (neželjenih) snaga razmena, empirijske procene scenarija poremećaja, procene standardne devijacije snaga razmene za interkonektivne dalekovode, kao i sam njihov broj.

Takođe, na procenu vrednosti **TRM** imaju uticaja raznovrsne neodređenosti u proračunima (netočnost predviđenog scenarija, vezana za nepouzdanost podataka o proizvodnji, potrošnji i modelu mreže). U praksi se za ovaj faktor procenjuje da nije veći od 5 % vrednosti **TTC**, sa tendencijom smanjivanja što je period posmatranja kraći.

Šira elaboracija ovoga problema biće predmet posebnog rada, koji je u pripremi. Za potrebe ovoga rada navešće se praksa pojedinih evropskih operatera prenosne mreže [8], u okviru koje se za pojedinačne dalekovode 400 kV **TRM** kreće oko 100 MW, a za dalekovode 220 kV, 50 MW. U slučaju da u graničnoj oblasti postoji više interkonektivnih dalekovoda, pojedini operatori za ukupnu vrednost **TRM** koriste sledeću relaciju:

$$TRM [MW] = 100 \sqrt{l} \quad (1)$$

gde je  $l$  broj interkonektivnih dalekovoda u graničnoj oblasti.

Dakle, ako bi sledili pomenutu praksu u slučaju razmatranog primera EES-a RO i SCG, prenosni kapacitet  $TRM^{RO \rightarrow SCG}$  bi iznosio 100 MW, a konsekventno tome, neto prenosni kapacitet  $NTC^{RO \rightarrow SCG}$  bi iznosio 600 MW.

Međutim, imajući u vidu da bi prenosni kapacitet **TRM** trebalo da „pokrije” i efekte primarne regulacije učestanosti, kao i efekte eventualnih havarijskih isporuka, u ovom primeru EES-a RO i SCG, aktivirana je i grupa poremećaja, koja se odnosila na gubitke većih injektiranja, odnosno na ispade generatora većih jediničnih snaga (već pomenuta prva opcija kod izbora liste poremećaja u računarskom programu **STATIC**).

U slučaju uključenja poremećaja tipa gubitaka većih injektiranja, automatizovani proračun **NTC-a** između RO i SCG zaustavio se na totalu razmene u iznosu od 550 MW, jer je po ispadu dva generatora u TE Braila (RO), angažovanih sa 310/200 MW/Mvar, došlo do narušavanja naponskih ograničenja u delu EES-a RO, kome gravitira ova elektrana. Dakle, strogo uzevši, u ovom primeru prenosni kapacitet  $NTC^{RO \rightarrow SCG}$  trebalo bi da se sračunava na sledeći način:

$$\begin{aligned} \text{NTC}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}} &= \text{BCE}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}} + \Delta E_{\text{max}l}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}} - \\ &[(\Delta E_{\text{max}l}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}} - \Delta E_{\text{max}g}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}) + \text{TRMo}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}] = \\ &= 300 + 400 - [(400 - 200) + 35] = 475 \text{ MW} \end{aligned}$$

gde je:

$\Delta E_{\text{max}l}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}$  - maksimalan iznos korekcija snaga generatora tokom proračuna **NTC-a** (u odnosu na polazno, bazno stanje), pri kome još nije došlo do narušavanja zadatih sigurnosnih ograničenja za poremećaje tipa ispada grane.

$\Delta E_{\text{max}g}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}$  - maksimalan iznos korekcija snaga generatora tokom proračuna **NTC-a** (u odnosu na polazno, bazno stanje), pri kome još nije došlo do narušavanja zadatih sigurnosnih ograničenja za poremećaje tipa gubitaka većih injektiranja.

$\text{TRMo}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}$  - procenjeni deo ukupnog TRM-a, koji može da nastane usled eventualnih netačnosti u podacima i merenjima, kao i u primenjenim računarskim metodama i modelima (praksa je da nije veći od 5 % utvrđene vrednosti **TTC-a**).

To praktično znači da u ovom primeru  $\text{TRM}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}$  trebalo bi da iznosi 235 MW, jer ta vrednost bi „pokrila” sve ispadе relevantnih generatora do totala razmene od 500(300+200) MW, a konsekventno tome, neto prenosni kapacitet  $\text{NTC}^{\text{RO} \rightarrow \text{SCG}}$  sada bi iznosio 475 MW.

Međutim, potrebno je napomenuti da je u pitanju samo početna ideja u kontekstu pokušaja preciznije evaluacije **TRM-a**. Ona se bazira na određivanju veličine ( $\Delta E_{\text{max}l} - \Delta E_{\text{max}g}$ ), koja bi trebalo da omogući stvaranje prostora za „pokrivanje” neplaniranih varijacija fizičkih tokova snaga, koje su uzrokovane funkcionisanjem sekundarne regulacije učestanosti i snaga razmene. Takođe, ta veličina bi trebalo da obezbedi nesmetano obavljanje vanrednih, havarijskih razmena snaga između TSO, nastalih kao posledica neočekivanih debalansa snaga (gubici injektiranja, odnosno ispadi većih proizvodnih kapaciteta) u realnom vremenu. Naravno, pomenuta ideja zahteva dalju razradu, u okviru koje je neophodno, između ostalog, da se normiraju i sami iznosi vanrednih, odnosno havarijskih razmena. Kao što je već rečeno, šira elaboracija ove ideje biće predmet posebnog rada, koji je u pripremi. Takođe, u pripremi je rad u kome se iznose iskustva primene računarskog programa **STATIC** na primeru interkonekcije sa 1 059 čvorova (175 generatora i 1 413 grana).

Završavajući ovo poglavlje, trebalo bi još jednom napomenuti da je u pitanju bio samo jedan ilustrativni primer proračuna **NTC-a**, koji je strogo korelisano sa razmatranim stanjem posmatrane interkonekcije i izabranim načinom participacije generato-

ra, koji su u tome učestvovali (u EES RO i SCG učestvovali su svi generatori, sem regulacionih, a njihova snaga tokom proračuna **NTC-a** se menjala srazmerno aktuelnim vrednostima rotacionih rezervi). Dakle, osnovni cilj je bio da se demonstriraju mogućnosti računarskog programa **STATIC**, koga naravno tek čekaju prava iskušenja kad on bude u svakodnevnoj upotrebi.

Ujedno, dobijeni rezultati su na dovoljno indikativan način ukazali na svu kompleksnost utvrđivanja prenosnih kapaciteta, odnosno, na izabranom praktičnom primeru, razjašnjena je i kvantifikovana suštinska razlika između totala snaga razmena i fizičkih tokova snaga na interkonektivnim dalekovodima. Takođe, ovo prvo praktično iskustvo je pomoglo da se uoče mogući sadržaji u daljem radu na ovoj veoma važnoj problematici, o čemu govori naredno poglavlje.

## 5. MOGUĆI PRAVCI DALJEG RADA NA PROBLEMATICI PRORAČUNA **NTC-a**

U prethodnom poglavlju, apostrofirano je veliki praktičan značaj koji ima efikasno upravljanje zagušenjem (congestion management), u okviru koga proračun **NTC-a** ima veoma značajno mesto. Tada je i istaknuto prisustvo, u praksi ETSO, više metoda koje služe za njegovu eliminaciju [17]. Stoga, u budućem radu, ne samo Instituta „Nikola Tesla”, ovom problemu potrebno je posvetiti izuzetnu pažnju, posebno u kontekstu formiranog Regionalnog tržišta električne energije. Tu se, između ostalog, misli i na uvođenje odgovarajućeg korektivnog upravljanja u analize sigurnosti.

Takođe, ne manju pažnju trebalo bi i dalje posvećivati unapređenju procene prenosnog kapaciteta **TRM**. Dosadašnja i novo stečena iskustva ETSO, kao i takva iskustva Instituta „Nikola Tesla”, u pogledu dalje primene i razrade ideje o tačnijoj proceni **TRM-a**, izložene u ovom radu, biće dobar putokaz za to.

U prvoj fazi studije koja se radi za Elektroprivredu Srbije, pomenute u uvodnom poglavlju ovoga rada, zahtevano je da se do traženih vrednosti prenosnih kapaciteta dolazi u okviru tzv. *statičkog prilaza* ili preciznije rečeno, u okviru analiza niza karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja, na čemu je baziran računarski program **STATIC**. Znači, bila su obuhvaćena samo strujna i naponska ograničenja, uz respektovanje ( $n-1$ ) kriterijuma statičke sigurnosti. Međutim u dokumentima ETSO [2,21], stoji da je potrebno, uz naponska i strujna ograničenja, respektovati i ograničenja vezana za stabilnost, što se, prema uvidu u raspoloživu literaturu, za sada, ne radi u praksi. Postoje samo odgovarajući radovi,

na primer [22, 23, 24, 25, 26], koji pokušavaju da uključe i dinamičke aspekte u proračune NTC-a.

Ograničenja vezana za relevantne *dinamičke aspekte* (npr. statička i tranzijentna stabilnost, naponska (ne)stabilnost i dr. ), a koji, kako je rečeno, nisu do sada uključeni u postojeće poznate procedure, bila bi predmet druge faze rada na studiji, pomenutoj u uvodnom poglavlju. Do koncipiranja i izrade ove druge faze studije došlo bi eventualno po izvršenoj kompletnoj valorizaciji ukupnih rezultata i stečenih iskustava, vezanih za realizaciju njene prve faze. Takođe, o njenoj sudbini odlučivale bi stvarne potrebe koje bi nametnula stečena pogonska iskustva u okviru Druge UCTE sinhronne zone, kao i aktuelna internacionalna iskustva u ovom domenu. Za sada, najnovija iskustva vezana za teške „rapade” delova interkonekcija (14. avgust 2003. godine – SAD i Kanada, kao i 27. avgust – Italija i Austrija) mogu da budu veoma indikativna i veoma poučna.

## 6. ZAKLJUČCI

*U ovom drugom delu rada izloženi su relevantni praktični aspekti jednog prilaza automatizovanom proračunu graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija, koji u potpunosti respektuje zahteve, standarde i kriterijume Udruženja evropskih operatora prenosnih mreža (ETSO). Za razliku od prilaza koji se koriste u aktuelnoj praksi, baziranih na konvencionalnom modelu tokova snaga, ovaj prilaz je baziran na nestandardnom modelu tokova snaga, koji omogućuje analizu niza karakterističnih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja.*

*U takav nestandardni model uspešno je inkorporirani model učešća generatora u proračunima prenosnih kapaciteta, čija generalna forma omogućuje jednostavno modelovanje niza modela i njihovih kombinacija, do sada korišćenih u praksi. Ujedno, karakteristike razvijenog modela obezbeđuju da se na veoma jednostavan način mogu da „preslikaju” različite pogonske situacije, vezane za uobičajene „vozne redove” izvora u uslovima otvorenog tržišta električne energije.*

*Takođe, uspešno je inkorporirana specijalno razvijena generalna forma injekcionog modela transformatora, koja omogućuje jednostavno predstavljanje svih postojećih vrsta energetskih transformatora (sa i bez regulacije ugla) i statičkih transformatora sa regulacijom ugla (tzv. serijski FACTS kontroleri tokova snaga).*

*Uz sve to, omogućena je automatizacija proračuna prenosnih kapaciteta, čime oni značajno dobijaju na efikasnosti i brzini, što je utvrđeno na primeru proračuna graničnih prenosnih kapaciteta u okviru Druge UCTE sinhronne zone.*

## 7. LITERATURA

- [1] Popović D. P. AUTOMATIZOVANI PRORAČUN GRANIČNIH PRENOSNIH KAPACITETA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, časopis Elektroprivreda, br. 4, 2003.
- [2] DEFINITIONS OF TRANSFER CAPACITIES IN LIBERALISED ELECTRICITY MARKETS, Final Report, ETSO, April, 2001
- [3] Popović D. P., GENERALIZOVANI MODEL UČEŠĆA GENERATORA U PRORAČUNIMA PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, časopis Elektroprivreda, br.3, 2003, str 3-12.
- [4] Popović D. P. GENERALIZOVANI MODEL TRANSFORMATORA I TOKOVI SNAGA, časopis Elektroprivreda, br. 1, 2003, str. 3-14.
- [5] Dobson I. et al., ELECTRIC POWER TRANSFER CAPABILITY: CONCEPTS, APPLICATIONS, SENSITIVITY AND UNCERTAINTY, University of Wisconsin, Madison WI USA, July 11, 2001
- [6] A NOTE ON TRANSMISSION RELIABILITY MARGIN EVALUATION, ETSO, February 2000
- [7] Janković V., Vlajsavljević D., Jelisavčić M., Savić P., NAČINI ODREĐIVANJA I PRIMENE PRENOSNIH KAPACITETA U INTERKONEKCIJI DEREGULISANIH ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA U EVROPI, 10. Simpozijum-Upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, Herceg Novi, 22 -25 maj 2000, referat I&II. 3
- [8] Stančević P., Vujašinović Z., Pupovac D., SIGURNOSNI KRITERIJUMI KOD PRORAČUNA PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA, 11 Simpozijum - Upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, Herceg Novi, 21 -24 maj 2002, referat II. 7
- [9] Ward J. B., EQUIVALENT CIRCUITS FOR POWER FLOW STUDIES, AEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 68, 1949, pp. 373-382.
- [10] Monticelli A., Deckmann S., Garcia A. and Stott B., REAL-TIME EXTERNAL EQUIVALENTS FOR STATIC SECURITY ANALYSIS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, March/April 1979, pp. 498-508.
- [11] Van Amerongen R. A. M. and Van Meeteren H. P., A GENERALIZED WARD EQUIVALENT FOR SECURITY ANALYSIS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, June 1982, pp. 1519-1526.
- [12] Popović D. P., Dobrijević Đ., Mijušković N., Vlajsavljević D., JEDINSTVENI EKVIVALENT EKSTERNIH ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA U ANALIZAMA STATIČKE SIGURNOSTI, časopis Elektroprivreda, br. 3, 1999, str. 5-18.

- [13] Dobrijević Đ. M., Popović D. P., Mijušković, N. A., Vlaisavljević D. J., AN UNIFIED EXTERNAL NETWORK EQUIVALENT IN STEADY-STATE SECURITY ASSESSMENT OF BALKAN INTERCONNECTION, Black Sea EL-NET Regional Meeting, 10-14. June 2001, Suceava, Romania, paper No. I. 2. 2.
- [14] UCTE WG Operation & Security, SG Network Models & Forecast Tools, LOAD FLOW AND CONGESTION FORECAST, 2002
- [15] UCTE data exchange format for load flows and three phase short circuit studies (UCTE-DEF), Version 01, 2003
- [16] Popović D. P., ODREĐIVANJE TOKOVA SNAGA U POLAZNIM USTALJENIM STANJIMA U ANALIZAMA SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, časopis Elektroprivreda, br. 2, 2000, str. 13-26.
- [17] EVALUATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION, ETSO, Florence Regulators Meeting, November, 1999
- [18] Popović D. P., Dobrijević Đ., JEDNA METODA ZA BRZU SELEKCIJU KRITIČNIH POREMEĆAJA U STUDIJSKIM ANALIZAMA STATIČKE SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, časopis Elektroprivreda, br. 1, 2000, str. 18-29.
- [19] Popović D. P., Mijailović S., FAST EVALUATION OF DYNAMIC CHANGES OF THE ELECTRIC POWER SYSTEMS FREQUENCY DURING PRIMARY CONTROL, Int. Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 8, November 1997, pp 525-532
- [20] NTC/ATC USER'S GUIDE-TECHNICAL VERSION, ETSO, February 2000
- [21] PROCEDURES FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, ETSO, October, 2001
- [22] Bettiol A. L., Wehenkel L., Pavella M., TRANSIENT STABILITY-CONSTRAINED MAXIMUM ALLOWABLE TRANSFER, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, May 1999, pp. 654-659.
- [23] Repo S., REAL TIME TRANSMISSION CAPACITY CALCULATION IN VOLTAGE STABILITY LIMITED POWER SYSTEMS, Proc. of International Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control-IV Restructuring, Santorini, Greece, August 22-28, 1998, pp. 599-605.
- [24] Popović D. P., Dobrijević Đ. M., Mijušković N. A., Vlaisavljević D. J., Mijailović S. V., ANALYTICAL TOOLS FOR THE TRANSFER CAPABILITY EVALUATION OF BALKAN INTERCONNECTION, Session-2000, CIGRE, Paris, paper 39-206
- [25] Yokoyama A., Fujiwara S., A NEW CALCULATION METHOD OF TOTAL TRANSMISSION CAPACITY (TTC) TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS KINDS OF STABILITY, 14 PSCC Conference, Sevilla, Spain, June 24-28, 2002
- [26] Popović D. P., Dobrijević Đ., Mijušković N., Vlaisavljević D., Mijailović S., JEDINSTVENA METODOLOGIJA ZA EVALUACIJU PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, 10. Simpozijum Upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, Herceg Novi, 22-25. maj 2000, referat III. V. 1, časopis Elektroprivreda, br. 3, 2000, str. 3-12.

Rad je primljen u uredništvo 03. 10. 2003. 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. Kao autor (pretežno) ili koautor do sada je objavio preko 140 naučnih i stručnih radova i razvio je veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih stanja elektroenergetskih interkonekcija.

# Algoritam za brzu estimaciju frekvencije u elektroenergetskom sistemu

Originalni naučni rad  
UDK: 621; 3.018.4

---

## Rezime:

U radu je predložen jedan novi algoritam za digitalnu estimaciju frekvencije i napona u elektroenergetskom sistemu. Algoritam se bazira na metodi minimizacije sume kvadrata odstupanja. Predložena forma predstavlja unapređenje iterativne forme ove metode u pogledu brzine procesiranja, čime je proširena oblast njene praktične primenljivosti. Celokupan matematički model za minimizaciju sume kvadrata odstupanja je u predloženom algoritmu pretočen u jednu fiksnu matricu koeficijenata koja je smeštena u memorijskom prostoru digitalnog estimatora. Estimacija frekvencije i napona se svodi na množenje vektora od biraka tekućeg prozora podataka sa odgovarajućim vrstama formirane matrice. U radu su date osnovne smernice za optimalno formiranje matrice koeficijenata za konkretne primene estimatora. U cilju verifikacije praktične primenljivosti algoritma izvršeni su odgovarajući simulacioni testovi estimacije frekvencije za realne i kompjuterski generisane signale.

**Ključne reči:** digitalna relejna zaštita, estimacija frekvencije, LES metoda

---

## Abstract:

### AN ALGORITHM FOR FAST FREQUENCY MEASUREMENTS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Some power system protection applications require accurate estimates of voltage magnitude and frequency over a wide measurement range. Most digital techniques for measuring frequency have acceptable accuracy over a small range in the neighborhood of the nominal value. This paper describes a new algorithm for measuring the frequency in electric power systems. The algorithm is based on the Least Error Squares technique and uses digitized samples of voltage at a relay location. This paper deals with improved version of algorithm which is developed in [5]. The improved algorithm uses one matrix with constant coefficients which can be previously calculated. It was successfully tested both with computer simulations and signals obtained through laboratory tests. The test results demonstrate the ability of this algorithm to estimate voltage and frequency with acceptable accuracy.

**Key words:** digital relay protection, frequency measurement, LES technique

---

## 1. UVOD

Frekvencija predstavlja veoma važan operativni parametar u elektroenergetskom sistemu (EES).

Kao globalna sistemaska veličina omogućava da se njenim merenjem, odnosno praćenjem, vrši kontrola i upravljanje balansom aktivnih snaga generisanja i potrošnje (uključujući i gubitke) u EES-u. S obzi-

---

Prof. dr Milenko Đurić, Željko Đurišić dipl. ing. – Elektrotehnički fakultet, 11 000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

rom na to da je EES veoma dinamičan sistem, brza i tačna estimacija frekvencije omogućava pravovremene i pravilne upravljačke akcije koje obezbeđuju stabilan rad agregata i mali nivo varijacije frekvencije oko propisane nominalne vrednosti.

Pouzđano i tačno merenje frekvencije ima posebnu važnost u sistemu relejne zaštite. Za savremene mikroprocesorske multifunkcionalne digitalne releje neophodno je što pouzdanije i preciznije merenje frekvencije, ne samo iz razloga pravilnog vršenja nadfrekvencijske i potfrekvencijske zaštitne funkcije, već i iz razloga što metode digitalnog procesiranja, odnosno estimacije mernih signala (napona i struja), zahtevaju poznavanje njihove frekvencije. Dakle, merenje frekvencije je neophodno za pravilno funkcionisanje kompletnog sistema digitalne relejne zaštite. S obzirom na to da se zaštitne funkcije najčešće aktiviraju kao posledica poremećaja (kvara) ili opasnih radnih stanja u EES-u, od posebne važnosti je pouzđano merenje frekvencije i u poremećenim odnosno havarijskim i posthavarijskim stanjima. Iako je frekvencija globalna veličina, nježno merenje se vrši lokalno, procesiranjem signala napona (jednog od ulaznih naponskih signala). U poremećenim stanjima u sistemu, vremenski oblik napona može u velikoj meri odstupati od prostoperiodičnog, pa u takvim okolnostima klasične digitalne tehnike merenja frekvencije (metoda brojanja prolazaka signala kroz nulu i slične) postaju praktično neprimenljive. U savremenoj literaturi predloženo je nekoliko metoda koje su kroz različite algoritme prilagođene digitalnom merenju frekvencije u EES-u. Metode minimizacije sume kvadrata odstupanja (LES – Least Error Squares) metode [1, 2, 5], Kalmanovo filtriranje [3, 4], Rekurzivna Newtonova metoda [6] su samo neke od predloženih metoda za estimaciju frekvencije u EES-u. Implementacija predloženih algoritama u digitalnim zaštitama za realne merne signale koji se karakterišu prisustvom različitog nivoa viših harmonika, a u nekim uslovima i postojanjem jednosmerne komponente, uglavnom zahteva kompleksan hardver, kao i primenu različitih numeričkih filtera. Dakle, merenje frekvencije u realnim uslovima zahteva značajno procesorsko vreme što se negativno odražava na pouzđanost, raspoloživost i brzinu rada releja. Savremeni digitalni releji zahtevaju robusne, brze i tačne algoritme za estimaciju frekvencije mernih signala.

U ovom radu je predložen algoritam za merenje frekvencije koja se zasniva na LES metodi. Rekurzivna i nerekurzivna forma ove metode je poznata u relejnoj zaštiti i analizirana je u [1, 2, 5, 7]. Mane predloženih algoritama su uglavnom vezane za uzak opseg rada ili, kod iterativnog modela [5], relativno veliko zahtevano procesorsko vreme. Algoritam ko-

ji je predložen u ovom radu eliminiše ove nedostatke postojećih algoritama baziranih na nerekurzivnoj LES tehnici, a istovremeno zadržava kvalitet u pogledu tačnosti i robusnosti, što je verifikovano kroz simulacije na različitim veštačkim i realnim mernim signalima.

## 2. OSNOVNI MODEL

Naponski signal čija se frekvencija meri u opštem slučaju je složenoperiodična funkcija vremena, kako u stacionarnim tako i u poremećenim režimima, kada može sadržati pored viših harmonika i jednosmernu komponentu. Iz tog razloga, u ovoj analizi, matematički model ulaznog naponskog signala u A/D konvertor ima analitičku formu definisanu relacijom (1).

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^M V_k \sin(k \omega_0 t + \varphi_k) + e(t) \quad (1)$$

Koristeći osnovne trigonometrijske jednakosti, prethodna relacija se može napisati u sledećem obliku:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^M V_{rk} \sin(k \omega_0 t + \varphi_k) + \sum_{k=1}^M V_{ik} \cos(k \omega_0 t) + e(t) \quad (2)$$

gde su:

$v(t)$  - magnituda napona u trenutku  $t$ ,

$V_0$  - jednosmerna komponenta napona,

$\omega = 2\pi f$  - kružna učestanost osnovnog harmonika napona,

$M$  - najviši red harmonika u signalu napona,

$V_k$  - amplituda  $k$ -tog harmonika,

$\varphi_k$  - faza  $k$ -tog harmonika,

$V_{rk} = V_k \cos \varphi_k$ ,  $V_{ik} = V_k \sin \varphi_k$  - realna i imaginarna

komponenta  $k$ -tog harmonika, respektivno,

$e(t)$  - aditivni signal greške.

Razvojem trigonometrijskih funkcija  $\sin(k\omega t)$  i  $\cos(k\omega t)$  u Tejlorov red u okolini nominalne (pretpostavljene) frekvencije  $\omega_0$  izraz (2) se može linearizovati. Linearizovana analitička forma signala napona u okolini nominalne frekvencije  $\omega_0$  je data relacijom (3).

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^M [V_{rk} \sin(k \omega_0 t) + V_{rk} k t \cos(k \omega_0 t)] + \sum_{k=1}^M [V_{ik} \cos(k \omega_0 t) + V_{ik} k t \sin(k \omega_0 t)] + e(t) \quad (3)$$

Relacija (3) se može formalno napisati u sledećoj jednostavnijoj formi:

$$v(t) = \sum_{j=1}^{4M} a_j(t) x_j + e(t), \quad (4)$$



gde su:  $a_j(t)$  - koeficijenti i  $x_j$  - nepoznate, definisani prema relaciji (5).

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 & x_1 &= V_0 \\ a_{1k} &= \sin(k_0 t) & x_{1k} &= V_{rk} \\ a_{M-1k} &= kt \cos(k_0 t) & x_{M-1k} &= V_{rk} \\ a_{2M-1k} &= \cos(k_0 t) & x_{2M-1k} &= V_{ik} \\ a_{3M-1k} &= kt \sin(k_0 t) & x_{3M-1k} &= V_{ik} \end{aligned} \quad (5)$$

$k = 1, \dots, M$

Na izlazu iz A/D konvertora za svaki od odbiraka signala napona može se napisati relacija (4). Ako se uoči  $m$  uzastopnih odbiraka koji čine tzv. prozor podataka, tada se ispisivanjem relacije (4) za svaki od odbiraka može formirati sistem od  $m$  jednačina, koji se može predstaviti u sledećoj matricnoj formi:

$$v = a x + e, \quad (6)$$

gde su:  $[v] = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$  - vektor odbiraka,  $[e]$  - vektor grešaka (odstupanja odbiraka od pretpostavljenog modela signala),  $[a]$  - matrica koeficijentata čije su dimenzije  $(m \times (4M+1))$ ,  $[x]$  - vektor nepoznatih definisanih u relaciji (5).

Učestanost odabiranja  $f_s$  ( $f_s = 1/T$ ) će se u ovoj analizi smatrati konstantnom, pa su pod takvom pretpostavkom odbirci signala napona ekvidistantni, odnosno međusobno pomeneni za vreme  $T$ . Uvažavajući ovu pretpostavku, koeficijenti matrice  $[a]$  se računaju prema sledećim relacijama:

$$\begin{aligned} a_1(n) &= 1, \\ a_{1k}(n) &= \sin(k_0 nT), \\ a_{M-1k}(n) &= knT \cos(k_0 nT), \\ a_{2M-1k}(n) &= \cos(k_0 nT), \\ a_{3M-1k}(n) &= knT \sin(k_0 nT), \end{aligned} \quad (7)$$

$n = 1, 2, \dots, m.$

U ovom radu će biti pretpostavljeno da se promenljive  $x_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 4M+1$ ), odnosno elementi vektora  $[x]$  u relaciji (6) ne menjaju u okviru prozora podataka. Ovakva pretpostavka je realna za frekvenciju, jer je njena promena direktno vezana sa brzinom obrtanja rotora generatora u sistemu. S obzirom na to da se radi o relativno velikim, odnosno inertnim zamajnim masama, promena frekvencije i pri naglim poremećajima balansa aktivnih snaga u sistemu je relativno mala u vremenskom intervalu koji odgovara širini prozora podataka (obično je širina prozora podataka reda jedne do tri periode merenog

signala, odnosno  $(0,02 \div 0,06$  s). Dakle, sistem jednačina (6) pod ovom pretpostavkom ima ukupno  $4M+1$  nepoznatu. Minimalna širina prozora podataka treba da obuhvati  $m_{min} = 4M+1$  odbiraka da bi sistem imao jedinstveno rešenje. Obično je širina prozora podataka veća od minimalne, odnosno sistem je redudantan ( $m > 4M+1$ ), jer se time obezbeđuje veća stabilnost proračuna u uslovima prisustva većeg šuma u procesiranom signalu.

S obzirom na to da je u svakoj od jednačina u relaciji (6) prisutna greška, za rešavanje ovakvog sistema jednačina pogodna je metoda najmanjih kvadrata. Suština metode je da se nađe optimalna procena vektora nepoznatih  $[x]$  tako da je greška minimalna. Kompletan matematički aparat kojim se sprovodi ova metoda je dat u [2,3,4] i on daje optimalnu procenu vektora nepoznatih  $[x]^*$  prema relaciji:

$$x^* = (a^T a)^{-1} a^T v = A^{-1} v, \quad (8)$$

gde je  $[A]$  leva pseudoinverzna matrica matrice  $[a]$ . Elementi ove matrice zavise od periode odabiranja i pretpostavljene učestanosti  $w_0$  i mogu se unapred proračunati, čime se ne zauzima procesorsko vreme.

Nakon proračuna elemenata vektora  $[x]$ , mogu se izračunati: jednosmerna komponenta napona, efektivne vrednosti i početne faze (računate u odnosu na prvi odbirak u prozoru podataka) osnovnog i viših harmonika koji su obuhvaćeni modelom signala, odstupanje učestanosti od pretpostavljene (nominalne) vrednosti. Proračun ovih parametara se može izvršiti na osnovu sledećih relacija:

$$V_0 = x_1, V_k = \sqrt{V_{rk}^2 + V_{ik}^2} = \sqrt{x_{1k}^2 + x_{2M-1k}^2}, \quad (9a)$$

$$\frac{V_{rk}}{V_k} = \frac{x_{M-1k}}{x_{1k}}, \quad (9b)$$

$$\frac{V_{ik}}{V_k} = \frac{x_{3M-1k}}{x_{2M-1k}}, \quad (9c)$$

$$\left| \begin{array}{c} \sqrt{x_{M-1k}^2 + x_{3M-1k}^2} \\ \sqrt{x_{1k}^2 + x_{2M-1k}^2} \end{array} \right| \quad (9d)$$

$$0 \quad \cdot \quad (9e)$$

Koristeći relacije (9b) i (9c) (obično se primenjuju na osnovni harmonik, jer je on po pretpostavci dominantan u signalu), može se odrediti odstupanje frekvencije u tekućem prozoru podataka od pretpostavljene vrednosti  $w_0$  po znaku i po modulu.

Performanse ovog algoritma su testirane u [1,2,7]. Tačnost određivanja frekvencije je uglavnom zadovoljavajuća u relativno uskom opsegu oko

nominalne (pretpostavljene) vrednosti  $w_0$ , odnosno algoritam je praktično primenljiv za merenje frekvencije bliske nominalnoj vrednosti.

Naprednija ideja u pogledu primene metode najmanjih kvadrata za merenje frekvencije je uvođenje povratne sprege po frekvenciji. Ova iterativna metoda je opisana i testirana u [5]. Osnovna ideja je da se iterativno koriguje početna vrednost frekvencije  $w_0$ , čime se postiže da se u svakom narednom koraku (iteraciji) tačka oko koje se vrši linearizacija modela napona (jednačina 4) približava stvarnoj vrednosti frekvencije. Ovakvim postupkom se može postići, u odgovarajućem broju iteracija, zahtevana tačnost proračuna frekvencije. Iterativni algoritam je matematički formulisan relacijama (10, 11 i 12).

$$[x_i] = [A_i(w_{i-1})][v_i] \quad (10)$$

$$[x_{i+1}] = [A_i + 1(w_i)][v_i] \quad (11)$$

$$w_i = w_{i-1} + \Delta w_i \quad (12)$$

gde su:

$w_{i-1}$ ,  $w_i$  - estimirana vrednost frekvencije u  $(i-1)$ -oj, odnosno  $i$ -toj iteraciji, respektivno;

$[A_i(w_{i-1})]$ ,  $[A_i(w_i)]$  - leve pseudo-inverzne matrice koeficijentata proračunate za  $w_{i-1}$ , odnosno  $w_i$ , respektivno;

$[x_i]$ ,  $[x_{i+1}]$  - optimalna procena vektora nepoznatih u  $(i-1)$ -oj i  $i$ -toj iteraciji, respektivno;

$\Delta w_i$  - korekcija vrednosti frekvencije koja je estimirana u prethodnoj  $((i-1)$ -oj) iteraciji;

Uslov zaustavljanja iterativnog procesa je da tekuća proračunata korekcija frekvencije bude manja od unapred zadate vrednosti.

Iterativni algoritam je pokazao dobre osobine u pogledu tačnosti estimacije frekvencije. Nedostatak ove metode je što u svakoj iteraciji zahteva ponovno računanje matrice koeficijentata  $[a]$ , odnosno njene leve pseudo-inverzne matrice. Ovaj nedostatak se odražava na veliko oduzimanje procesorskog vremena, pre svega na invertovanje matrice  $[a]$ , što je ograničilo njegovu praktičnu primenu u relejnoj zaštiti.

### 3. ALGORITAM ZA BRZU ESTIMACIJU FREKVENCije

Da bi se obezbedio brz iterativni proračun frekvencije procesiranog signala, potrebno je analizirati mogućnost izbegavanja proračuna matrice  $[A]$  u svakom koraku iteracije. U tom cilju potrebno je analizirati matricu  $[a]$ , odnosno njenu levu pseudo-inverznu matricu  $[A]$ , kao i relacije (9) koje definišu

postupak ekstrahovanja merene frekvencije iz vektora nepoznatih  $[x]$ .

Relacijom (13) prikazana je razvijena forma matrice  $[a_i]$ , koja odgovara linearizovanom modelu merenog signala napona u okolini tekuće frekvencije  $w_{0i}$  estimirane u  $i$ -toj iteraciji.

	1	1	...	1
	$\sin(\omega T)$	$\sin(\omega 2T)$	...	$\sin(\omega mT)$
	$\sin(2\omega T)$	$\sin(2\omega 2T)$	...	$\sin(2\omega mT)$
	.....	.....	.....	.....
	$\sin(M\omega T)$	$\sin(M\omega 2T)$	...	$\sin(M\omega mT)$
	$T \cos(\omega T)$	$2T \cos(\omega 2T)$	...	$nT \cos(\omega nT)$
	$T \cos(2\omega T)$	$2T \cos(2\omega 2T)$	...	$nT \cos(2\omega nT)$
	.....	.....	.....	.....
$a_i$	$T \cos(M\omega T)$	$2T \cos(M\omega 2T)$	...	$nT \cos(M\omega nT)$
	$\cos(\omega T)$	$\cos(\omega 2T)$	...	$\cos(\omega nT)$
	$\cos(2\omega T)$	$\cos(2\omega 2T)$	...	$\cos(2\omega nT)$
	.....	.....	.....	.....
	$\cos(M\omega T)$	$\cos(M\omega 2T)$	...	$\cos(M\omega nT)$
	$T \cos(\omega T)$	$2T \cos(\omega 2T)$	...	$nT \cos(\omega nT)$
	$T \cos(2\omega T)$	$2T \cos(2\omega 2T)$	...	$nT \cos(2\omega nT)$
	.....	.....	.....	.....
	$T \cos(M\omega T)$	$2T \cos(M\omega 2T)$	...	$nT \cos(M\omega nT)$

(13)

U relaciji (13) matrica  $[a_i]_{m \times (4M+1)}$  je predstavljena u najopštijoj formi, tj. pretpostavljeno je da su modelom signala napona obuhvaćeni jednosmerna komponenta, osnovni harmonik i svi viši harmonici do reda  $M$ . Broj vrsta matrice se može smanjiti ako se neki harmonici (npr. parni) izostave iz modela signala napona. Broj kolona matrice odgovara broju odbiraka u prozoru podataka  $m$ .

Da bi se formirala optimalna procena vektora nepoznatih  $[x_i]$  potrebno je, shodno relaciji (8), izračunati matricu  $[A_i]$ . Razvijena forma matrice  $[A_i]$  je prikazana relacijom (14). Koristeći ovu relaciju može se jednačina (8) napisati u razvijenoj formi koja je data u (15).

Proračun korekcije frekvencije  $\Delta w_i$  u odnosu na tekuću frekvenciju  $w_{0i}$  može se vršiti na osnovu relacija (9b) ili (9c). U matricnoj jednačini (15) su naznačene vrste (osim prve i poslednje) koje figurišu u proračunu korekcije frekvencije na osnovu komponenti fazora osnovnog harmonika napona (relacije (9b) i (9c) za  $i=1$ ). Jednačine (9b) i (9c) definišu odstupanje frekvencije i po znaku i po vrednosti. Dakle, u proračunu frekvencije aktivne su samo dve vrste tekuće matrice  $[A_i]$ . Međutim, za pouzdanu estimaciju frekvencije potrebno je pratiti četiri vrste u matrici  $[A_i]$ , (dve koje se odnose na relaciju (9a) i dve koje zahteva (9b)). Naime, u toku procesiranja signala može se dogoditi da prvi, odnosno referentni odbirak u prozoru podataka odgovara (ili bude blizak) trenutku prolaska fazora osnovnog harmoni-



$$\begin{array}{cccc}
A_{21}(\min) & A_{22}(\min) & \dots & A_{2m}(\min) \\
A_{(M-2)1}(\min) & A_{(M-2)2}(\min) & \dots & A_{(M-2)m}(\min) \\
A_{(2M-2)1}(\min) & A_{(2M-2)2}(\min) & \dots & A_{(2M-2)m}(\min) \\
A_{(3M-2)1}(\min) & A_{(3M-2)2}(\min) & \dots & A_{(3M-2)m}(\min) \\
\\
A_{21}(\min \quad 0) & A_{22}(\min \quad 0) & \dots & A_{2m}(\min \quad 0) \\
A_{(M-2)1}(\min \quad 0) & A_{(M-2)2}(\min \quad 0) & \dots & A_{(M-2)m}(\min \quad 0) \\
A_{(2M-2)1}(\min \quad 0) & A_{(2M-2)2}(\min \quad 0) & \dots & A_{(2M-2)m}(\min \quad 0) \\
A_{(3M-2)1}(\min \quad 0) & A_{(3M-2)2}(\min \quad 0) & \dots & A_{(3M-2)m}(\min \quad 0) \\
\\
[A^*] \quad A_{21}(\min \quad 2 \quad 0) & A_{22}(\min \quad 2 \quad 0) & \dots & A_{2m}(\min \quad 2 \quad 0) \\
A_{(M-2)1}(\min \quad 2 \quad 0) & A_{(M-2)2}(\min \quad 2 \quad 0) & \dots & A_{(M-2)m}(\min \quad 2 \quad 0) \\
A_{(2M-2)1}(\min \quad 2 \quad 0) & A_{(2M-2)2}(\min \quad 2 \quad 0) & \dots & A_{(2M-2)m}(\min \quad 2 \quad 0) \\
A_{(3M-2)1}(\min \quad 2 \quad 0) & A_{(3M-2)2}(\min \quad 2 \quad 0) & \dots & A_{(3M-2)m}(\min \quad 2 \quad 0) \\
\\
\cdot \quad \cdot \quad \cdot & \cdot \quad \cdot \quad \cdot & \cdot \quad \cdot \quad \cdot & \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
\\
A_{21}(\max) & A_{22}(\max) & \dots & A_{2m}(\max) \\
A_{(M-2)1}(\max) & A_{(M-2)2}(\max) & \dots & A_{2m}(\max) \\
A_{(2M-2)1}(\max) & A_{(2M-2)2}(\max) & \dots & A_{2m}(\max) \\
A_{(3M-2)1}(\max) & A_{(3M-2)2}(\max) & \dots & A_{2m}(\max)
\end{array} \quad (17)$$

pri čemu je potrebno parametre  $w_{max}$ ,  $w_{min}$  i  $\Delta w_0$  odabrati tako da je  $N$  ceo broj. Relacijom (17) je predstavljena opšta forma matrice  $[A^*]$ .

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti da su dimenzije matrice  $[A^*]$  -  $4N \times m$ . Bitno je primetiti da dimenzije matrice direktno ne zavise od nivoa harmonika koji su uključeni u model signala.

Na osnovu formiranog matematičkog modela, može se definisati relativno jednostavan algoritam za estimaciju frekvencije i napona u EES-u. Logička blok šema algoritma prikazana je na slici 1.

Oznake na dijagramu imaju sledeće značenje:

$w_{min}$ ,  $w_{max}$  - donja i gornja granica opsega merenja frekvencije kojeg pokriva matrica  $[A^*]$ ,

$\Delta w_0$  - korak frekvencije u matrici  $[A^*]$ ,

$w_n$  - nominalna frekvencija,

$i$  - brojač iteracija,

$i_{max}$  - maksimalni dopušteni broj iteracija u proračunu frekvencije,

$j$  - pokazivač aktuelene vrste u matrici koeficijenata  $[A^*]$ ,

$j_{max}$  - maksimalna dozvoljena brojna vrednost pokazivača vrsta ( $j_{max} = N-3 = \frac{w_{max} - w_{min}}{\Delta w_0} - 3$ ),

$R, p$  - radni registri,

$v$  - registar za smeštanje odbiraka iz tekućeg prozora podataka,

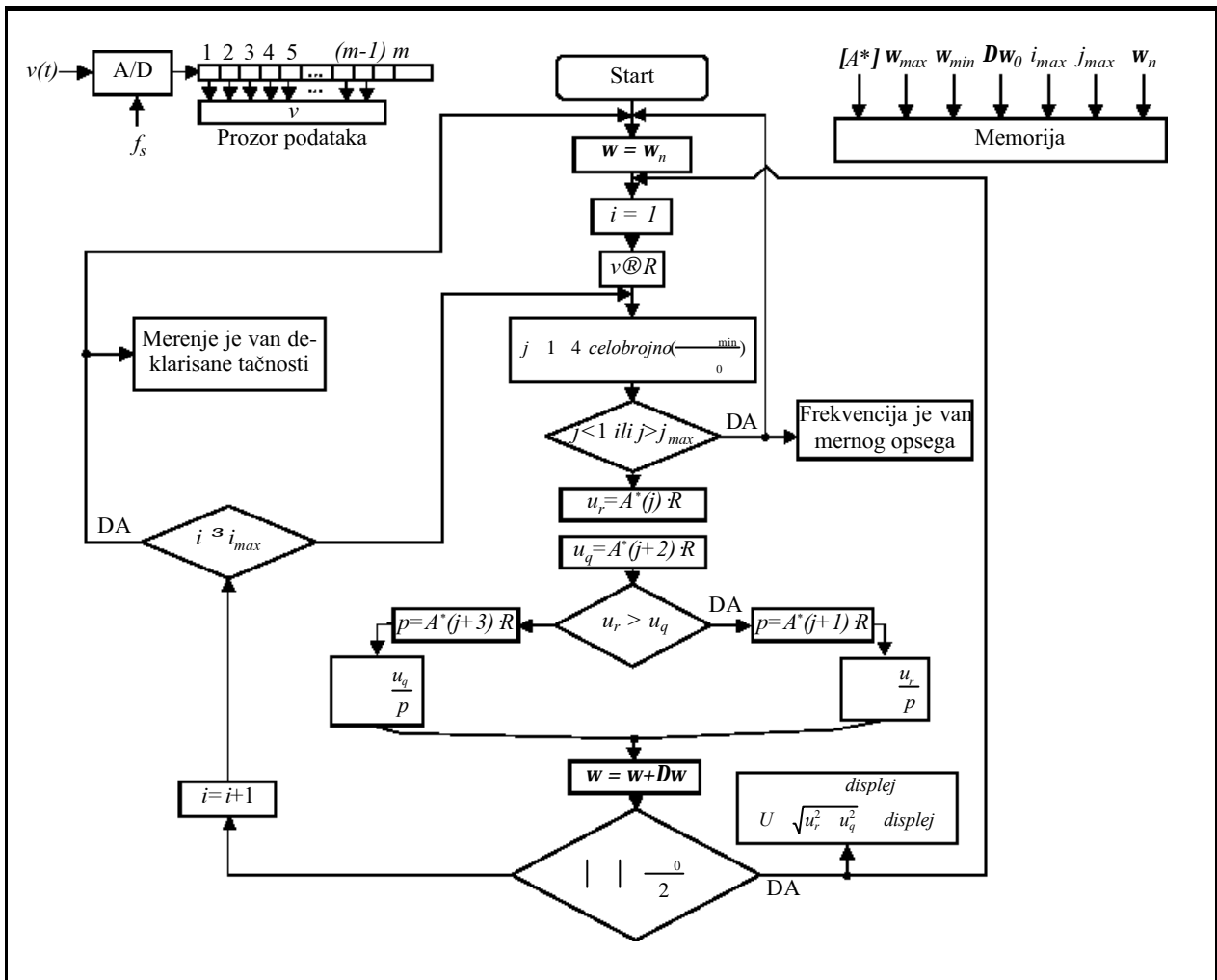
$u_r, u_q$  - registri za smeštanje tekuće realne i imaginarnе komponente fazora osnovnog harmonika napona, respektivno,

$w$  - aktuelna frekvencija u proračunu,

$\Delta w$  - aktuelna korekcija frekvencije proračunate u prethodnoj iteraciji (koraku).

### 3.1. Opis logičke realizacije algoritma

Predloženi algoritam je baziran na pretpostavci da se frekvencija signala može smatrati konstantnom u vremenskom intervalu koji odgovara širini



Slika 1. Logički blok dijagram estimatora frekvencije i napona

prozora podataka. Frekvencija odabiranja i širina prozora podataka su nepromenljive i unapred definirane veličine. Inicijalizacija merenja frekvencije se ostvaruje postavljanjem radne frekvencije na vrednost  $w_n$ . Na osnovu te vrednosti se automatski setuje pokazivač na prvu vrstu submatrice matrice  $[A^*]$  koja odgovara nominalnoj frekvenciji  $w_n$ . Sukcesivnim množenjem vrsta iz identifikovane submatrice sa tekućim vektorom odbiraka se započinje iterativni postupak estimacije frekvencije.

Zaustavljanje iterativnog postupka u algoritmu na slici 1 je predviđeno u tri slučaja i to:

1) Izračunata frekvencija je po modulu manja od polovine koraka matrice  $\Delta w_0$ . U tom slučaju nije moguće dalje popravljavanje aktuelne frekvencije u proračunu. Rezultat merenja je korektan i predstavlja zbir frekvencije proračunate u prethodnom koraku i aktuelne korekcije frekvencije  $\Delta w$ . Uzima se novi prozor podataka, radna frekvencija se zadržava na izračunatu vrednost i započinje se novi iterativni proces estimacije.

2) Tekuća frekvencija ( $w$ ) izlazi van mernog opsega koji pokriva matrica  $[A^*]$ . Signalizira se „probijanje” mernog opsega. Uzima se novi prozor podataka i setuje se frekvencija na inicijalnu vrednost ( $w = w_n$ ). Nastavlja se estimacija.

3) Broj iteracija je veći od maksimalno predviđenog. Ovo ograničenje je uvedeno iz razloga eliminacije mogućnosti „zaglavljivanja”, kao i uslova spore konvergencije iterativnog postupka. Postupak oporavka u ovakvim slučajevima je restart algoritma kao u slučaju 2.

Treba napomenuti da se predloženo logičko rešenje algoritma može dalje modifikovati u cilju zadovoljenja određenih performansi mernog sistema (selektivna tačnost, brzina, pouzdanost i slično). Matricu koeficijenata  $[A^*]$  je moguće formirati sa promenljivim korakom  $\Delta w_0$ , tako da je u okolini nominalne frekvencije (npr. u opsegu (49,5,50,5) Hz) korak  $\Delta w_0$  relativno mali, a van ovog opsega se može ići sa većim korakom frekvencije. Ovakvim formiranjem matrice  $[A^*]$  se postiže veća tačnost esti-

matora frekvencije u opsegu normalnih radnih frekvencija u sistemu, a da se pri tom značajno ne poveća red matrice  $[A^*]$ . U cilju povećanja stabilnosti konvergencije algoritma moguće je limitirati ili ponderisati skok pokazivača  $j$ , čime se može izbeći eventualna oscilatorna konvergencija u procesu estimacije frekvencije. U tom smislu može biti prihvatljivo rešenje sa konstantnim (minimalnim) skokom pokazivača ( $f_{min}=4$ ). U ovom slučaju potrebno je pratiti samo znak aktuelnog odstupanja frekvencije i proveravati uslove zaustavljanja iterativnog postupka. Ovakav pristup generalno usporava estimaciju, odnosno povećava broj iteracija, ali je opravdan ako se ima u vidu činjenica da je gradijent promene frekvencije u sistemu i pri većim poremećajima relativno mali, pa algoritam može pratiti i sa jediničnim skokom promene frekvencije.

Kompletan predloženi algoritam se bazira na relativno malom broju najjednostavnijih matematičkih operacija koje nisu zahtevne u računarskom pogledu, te se kao takav odlikuje velikom brzinom i malim zahtevima u pogledu hardvera. Predloženi algoritam, u cilju određivanja frekvencije, vrši estimaciju komponenti fazora osnovnog harmonika napona, pa on istovremeno predstavlja i estimator napona. Dakle, algoritam pored merenja frekvencije obezbeđuje i merenje efektivne vrednosti napona osnovnog harmonika procesiranog signala. Ovakvo merenje napona je pogodan za prikazivanje na displeju mernog (zaštitnog) uređaja, jer predstavlja usrednjenu efektivnu vrednost osnovnog harmonika napona na intervalu koji odgovara širini prozora podataka.

#### 4. TESTIRANJE I OPTIMIZACIJA ALGORITMA

U prethodnom odeljku definisana je opšta forma algoritma za brzu estimaciju frekvencije, pri čemu je pretpostavljeno da su učestanost odabiranja i širina prozora podataka fiksni, ali nije definisano kako treba postaviti ove parametre za konkretna merenja. Osim toga, neophodno je ispitati u kakvoj međusobnoj vezi stoje tačnost merenja frekvencije i korak matrice  $\Delta w_0$ , kao i mogući opseg merenja frekvencije (tj. granične učestanosti ( $w_{min}$  i  $w_{max}$ ) u matrice koeficijentata  $[A^*]$ ) koji obezbeđuje pouzdanu konvergenciju iterativnog postupka. Postavljanje ovih parametara nije jednoznačno, pa je u cilju optimizacije modela potrebno izvršiti kompleksne analize, pri čemu kriterijum optimizacije definiše sama uloga, odnosno zahtevane performanse, mernog (zaštitnog) sistema.

U ovom odeljku biće utvrđen uticaj navedenih parametara na osnovne performanse mernog siste-

ma, što može predstavljati podlogu za optimizaciju u konkretnim aplikacijama.

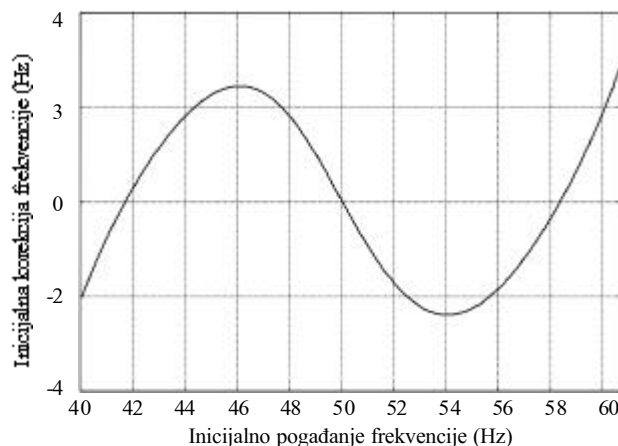
#### 4.1. Uslovi konvergencije algoritma

Primena metode najmanjih kvadrata za merenje frekvencije podrazumeva pretpostavku da se signal može aproksimirati linearnom formom oko pretpostavljene vrednosti frekvencije osnovnog harmonika procesiranog signala. U iterativnom postupku kakav je predložen u ovom radu ostvaruje se približavanje početnog pogađanja frekvencije ka tačnoj vrednosti čime se ostvaruje ispunjenje takve pretpostavke sa određenom tačnošću. Međutim, ukoliko se inicijalno pogađanje frekvencije znatno razlikuje od tačne vrednosti, linearna aproksimacija postaje sve grublja i može biti ugrožena konvergentnost iterativnog postupka, odnosno iz linearizovanog modela u okolini takve inicijalne frekvencije više nije moguće pouzdano odrediti pravilan znak korekcije frekvencije. Iz tog razloga neophodno je utvrditi u kom opsegu u okolini tačne frekvencije je moguća pouzdana konvergentnost iterativnog postupka, odnosno utvrditi merni opseg metode.

U cilju utvrđivanja mernog opsega vršene su računarske simulacije sa prostoperiodičnim test signalom (18).

$$u = 100\sin(2 \cdot 50 t) \quad (18)$$

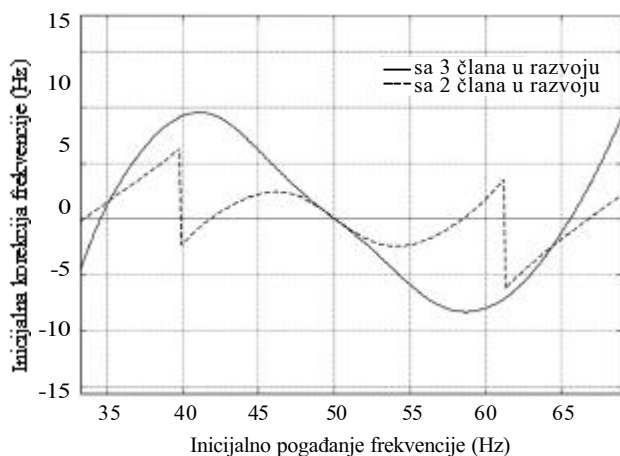
Simulacije su vršene tako što je menjano inicijalno pogađanje učestanosti signala i merena korekcija izračunata u prvom koraku iteracije. Korak promene inicijalne frekvencije je  $\Delta f_0 = 0,1$  Hz, i on odgovara koraku frekvencije formirane matrice koeficijentata  $[A^*]$ . Na slici 2 je prikazan rezultat simulacije u kojoj je frekvencija odabiranja podešena na  $f_s = 1000$  Hz i širina prozora podataka na  $T_w = 0,06$  s (tri periode signala).



Slika 2. Korekcija frekvencije u prvom koraku iteracije u funkciji inicijalnog pogađanja

Na osnovu rezultata simulacije, može se zaključiti da je, za definisani signal i parametre procesiranja, teorijski opseg konvergencije (41,5÷58,5) Hz. Međutim, realni opseg u kome estimator može pravilno da funkcioniše je nešto uži. Naime, u slučaju da, usled nekog poremećaja, tekuća frekvencija u iterativnom postupku padne u zonu blisku graničnim tačkama tekuća korekcija frekvencije biva relativno mala, pa postoji realna opasnost da se algoritam zaustavi po kriterijumu 1) i javi pogrešnu frekvenciju. Dakle, opseg pouzdane konvergencije je u testiranom slučaju oko (43÷57) Hz.

Proširenje opsega merenja frekvencije može se izvršiti tako što se pri linearizaciji signala, razvojem u Tejlorov red, uključi i kvadratni član (treći član). Upporedna analiza prethodne simulacije sa matricom  $[A^*]$  koja je formirana sa uvažavanjem dva, odnosno tri člana u linearizovanom modelu signala je prikazana na slici 3.



Slika 3. Opseg konvergencije za različite modele signala

Uvođenjem trećeg člana Tejlorovog reda u model (3), znatno se proširuje opseg merenja frekvencije, ali će kasnije analize pokazati da je kvadratni član vrlo osetljiv na šumove u signalu, pa je iz tog razloga neprihvatljiv. Skokovita promena u dijagramu koji odgovara jednostavnijoj linearizovanoj formi je posledica programske promene načina estimacije frekvencije. U opsegu od 49 do 62 Hz estimacija frekvencija je za dati signal vršena prema jednačini 9c, a van ovog opsega prema jednačini 9b.

Na slici 3 prikazano je kako se menja opseg merenja i popravka inicijalne frekvencije kada prozor podataka „klizi” po signalu napona definisanog relacijom (18).

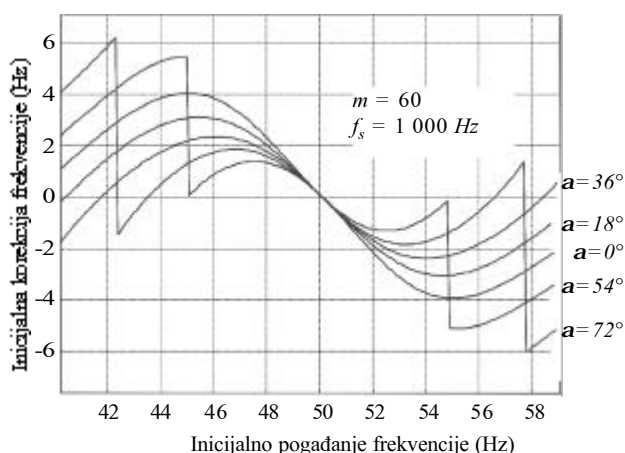
Na osnovu slike 4 može se konstatovati da se merni opseg menja u zavisnosti od položaja prozora podataka, odnosno početne faze signala računate u odnosu na prvi odbirak u prozoru podataka. Pri porastu početne faze od  $0^\circ$  do  $45^\circ$ , merni opseg se po-

mera ka većim frekvencijama, dok se njegova širina malo menja. Za početne faze od  $45^\circ$  do  $90^\circ$  merni opseg se pomera ka nižim frekvencijama. Pošto je pozicija prozora podataka proizvoljna u toku estimacije, odnosno  $\alpha \in (0^\circ \div 360^\circ)$ , treba za merni opseg uzeti minimalnu i maksimalnu frekvenciju iz familije krivih na slici 4 (krive za uglove  $90^\circ$  do  $360^\circ$  se poklapaju sa odgovarajućim iz date familije). Za konkretno izabrane parametre estimatora opseg pouzdanog merenja frekvencije je (50±4) Hz.

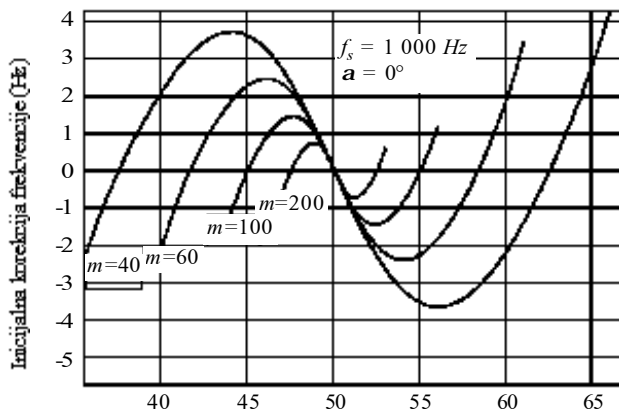
Nagib krive korekcije frekvencije, odnosno intenzitet popravke frekvencije u prvom koraku iteracije takođe zavisi od faze signala odnosno položaja prozora podataka. Na osnovu slike 4 može se konstatovati da je za sve vrednosti inicijalne frekvencije, iz opsega u kome algoritam konvergira, inicijalna korekcija frekvencije manja ili bliska razlici između inicijalne i stvarne frekvencije signala, što obezbeđuje stabilnu konvergenciju iterativnog postupka.

Prethodna analiza je pokazala da je opseg maksimalnog odstupanja frekvencije tokom iterativnog postupka u odnosu na tačnu frekvenciju relativno uzak, pa je potrebno analizirati mogućnosti proširenja opsega pouzdane konvergencije. U narednom testu je analiziran uticaj širine prozora podataka na širinu mernog opsega. Model signala i parametri su isti kao u prethodnoj analizi, s tim što je varirana širina prozora podataka od 2 do 10 perioda (od  $m=40$  do  $m=200$  odbiraka po prozoru podataka). Rezultati simulacije su prikazani na slici 4.

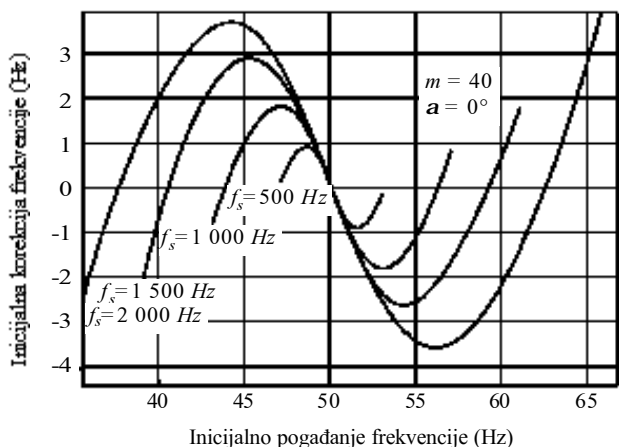
Da bi se utvrdilo da li na širinu mernog opsega utiče broj odbiraka ili broj perioda koje ulaze u prozor podataka izvršen je sledeći test: model signala je definisan relacijom (18), broj odbiraka u prozoru podataka je nepromenljiv i iznosi  $m=40$ , frekvencija odabiranja je menjana u opsegu od 500 Hz do 2 000 Hz. Rezultati testa su prikazani na slici 5.



Slika 4. Zavisnost inicijalne korekcije frekvencije od početne faze signala ( $\alpha$ )



Slika 5. Zavisnost mernog opsega od širine prozora podataka



Slika 6. Zavisnost širine mernog opsega od frekvencije odabiranja

Na osnovu dijagrama na slikama 4 i 5 može se konstatovati da širina mernog opsega frekvencije zavisi od broja perioda procesiranog signala koji obuhvata prozor podataka. Dakle, sa aspekta širine mernog opsega, pogodnije je ići sa što kraćim prozorom podataka. Za fiksnu učestanost odabiranja, kraći prozor podataka znači i manji broj odbiraka u prozoru podataka, pa je u fazi projektovanja estimatora potrebno voditi računa i o minimumu odbiraka u prozoru podataka. Minimalan broj odbiraka sa kojim program može korektno raditi mora obuhvatiti bar jednu celu periodu merenog signala i obezbediti regularnost matrice jednačine (8), tj. mora biti zadovoljeno:

$$m_{\min} \geq \max \left( 4M - 1, \frac{f_s}{f_{\min}} \right) \quad (19)$$

gde je  $f_{\min}$  minimalna učestanost osnovnog harmonika merenog signala, a  $M$  broj harmoničnih komponenti koje se opserviraju.

U cilju zauzimanja što manjeg memorijskog prostora, pogodno je da matrica koeficijenata  $[A^*]$

bude što je moguće manjih dimenzija. Već je rečeno da broj kolona matrice odgovara broju procesiranih odbiraka u prozoru podataka, dok broj vrsta zavisi od širine mernog opsega i koraka frekvencije. Ukoliko je korak frekvencije veći to je odstupanje tekuće frekvencije u poslednjem koraku iteracija u opštem slučaju veće, pa je tačnost estimacije manja. Međutim, na osnovu slike 4 može se zaključiti da ako tekuća frekvencija u poslednjem koraku padne u opsegu  $\pm 0,25$  Hz oko tačne vrednosti frekvencije (u ovom slučaju 50 Hz), estimacija u tom koraku praktično daje tačnu vrednost frekvencije. Ova konstatacija se poklapa sa iskustvima u korišćenju osnovnog modela najmanjih kvadrata [7]. Dakle, može se zaključiti da matrica koeficijenata  $[A^*]$  može biti napravljena sa maksimalnim korakom frekvencije  $\Delta f_0 = 0,25$  Hz, a da pri tom daje tačnost koja je određena samom metodom. Ipak, zbog procesiranja realnih signala koji mogu sadržati visok nivo šuma u daljoj analizi biće korišćen korak  $\Delta f_0 = 0,1$  Hz.

Nivo harmonika koji se opservira ne utiče na širinu mernog opsega. Najviši red harmonika  $M_{\max}$  koji se može korektno procesirati je određen teoremom o odabiranju prema relaciji:

$$M_{\max} \leq \frac{f_s}{2f_{0\max}} \quad (20)$$

gde je  $f_{0\max}$  gornja granica mernog opsega estimatora. Ukoliko nije zadovoljena relacija (19) ili (20) matrica  $[A^*]$  je singularna.

## 4.2. Osetljivost algoritma na slučajni šum

U realnom signalu uvek je prisutan određeni šum. Pri čemu šum predstavljaju sve one harmonične komponente u signalu koje nisu deklarirane u linearizovanom modelu, uključujući i subharmonike. Izvor šuma je prisutan u samom EES-u (nelinearni potrošači, korona, razni indukovani signali i slično) ali i sam proces A/D konverzije unosi određenu kvantizacionu grešku koja se manifestuje kao šum.

Test osetljivosti estimatora na šum je sproveden tako što je na model signala (18) aditivno uključen beli šum. Metodologija određivanja osetljivosti estimatora na šum je prikazana na primeru signala (18) sa aditivnim belim šumom čiji amplitudski nivo iznosi 20 % od amplitude korisnog signala. Ovakav signal je procesiran sa estimatorom čiji su parametri podešeni na:  $f_s = 1\,000$  Hz,  $m = 60$ . Analiza je sprovedena tako što je prozor podataka „klizao” preko definisanog signala sa pomakom od po jednog odbiraka. Estimacija je vršena na vremenskom intervalu  $\tau = 1$  s. Za svaki položaj prozora podataka je varirano pogađane frekvencije od 40 Hz do 60 Hz sa korakom 0,1 Hz (korak matrice) i računata odgovarajuća

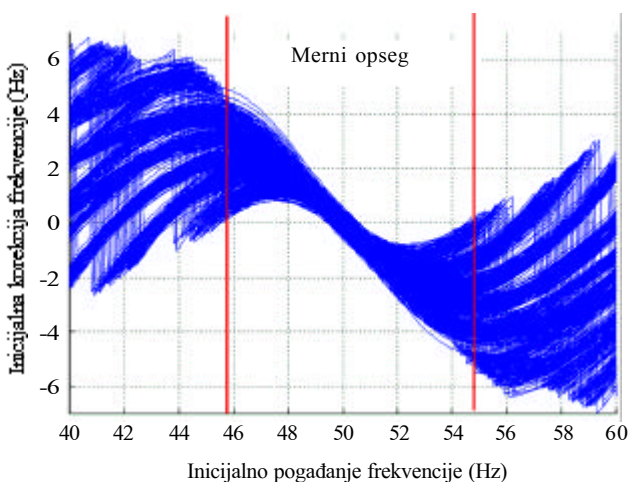


korekcija. Dobijene krive zavisnosti su predstavljene na dijagramu 7.

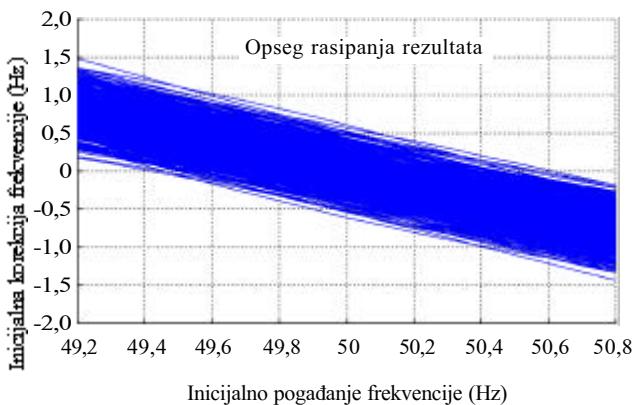
Dijagram 7 definiše polje u kojem se može naći tekuća frekvencija u procesu estimacije za merni signal koji sadrži 20 % nivo slučajnog šuma, ako se inicijalno pogađanje frekvencije nađe u opsegu  $\pm 10$  Hz oko tačne vrednosti ( $f=50$  Hz). Takođe se može konstatovati da i uslovima jakog šuma stabilnost konvergencije iterativnog procesa nije ugrožena. Rezultat estimacije se u konkretnom slučaju može naći u opsegu  $(50 \pm 0,62)$  Hz, tj. maksimalna greška je  $\pm 0,62$  Hz.

Izgled signala i tok estimacije frekvencije iz prethodne analize su prikazani na slikama 9 i 10, respektivno. Na slici 11 je, u cilju poređenja, prikazan tok frekvencije za isti signal, kada je matrica  $[A^*]$  formirana sa uvažavanjem kvadratnog člana u Tejlorovom razvoju.

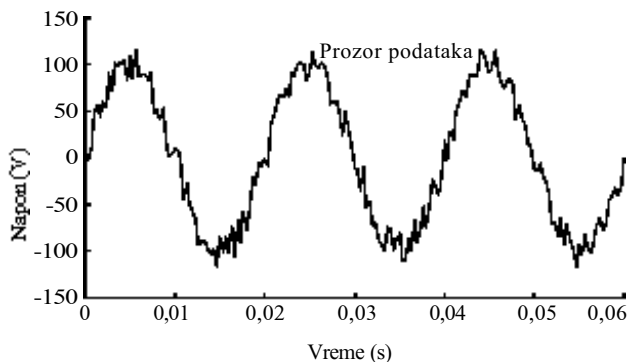
Na osnovu uporedne analize dijagrama toka frekvencije datih na slikama 10 i 11 može se zaključiti



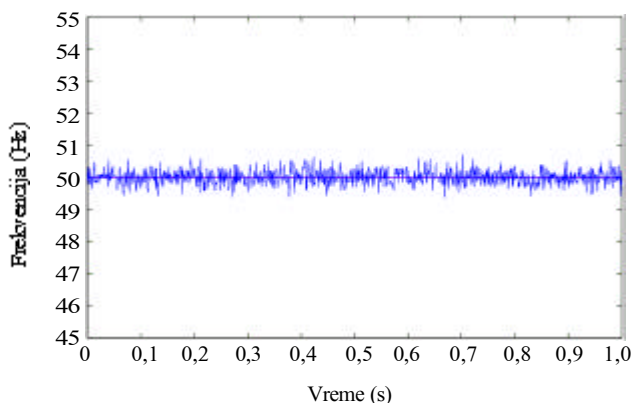
Slika 7. Širina mernog opsega u uslovima jakog zagađenja signala slučajnim šumom



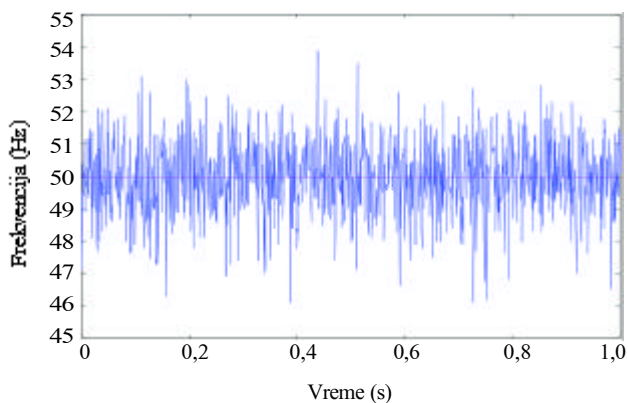
Slika 8. Opseg rasipanja rezultata estimacije frekvencije u uslovima jakog šuma



Slika 9. Vremenski oblik procesiranog signala



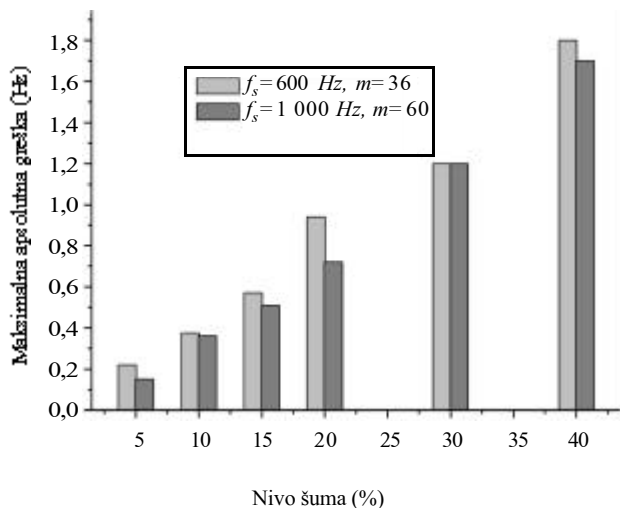
Slika 10. Vremenski tok estimirane frekvencije sa dva člana u linearizovanom modelu signala



Slika 11. Vremenski tok estimirane frekvencije sa tri člana u linearizovanom modelu signala

da je uključivanje trećeg člana u linearizovani model signala sa aspekta osjetljivosti na šum neprihvatljivo.

Da bi se odredila zavisnost nivoa greške estimatora frekvencije u odnosu na nivo aditivnog šuma sprovedeno je niz testova u kojima je menjan nivo šuma, u signalu (18) i merene maksimalne greške na jednosekundnom intervalu estimacije prema definisanoj metodologiji. Rezultati analize prikazani su dijagramom na slici 12.



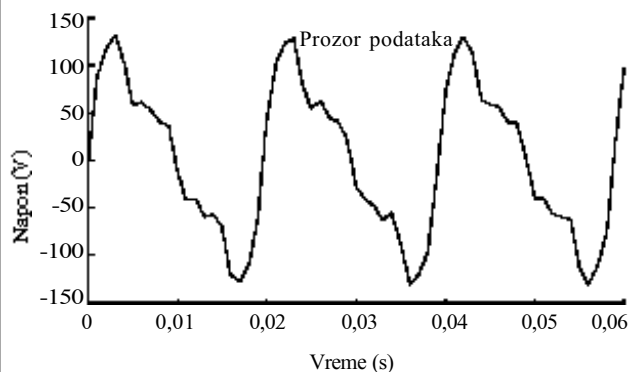
Slika 12. Maksimalna greška estimacije frekvencije u funkciji nivoa šuma za 50 Hz osnovni signal

Treba napomenuti da merni opseg estimatora nije u većoj meri ugrožen šumom do nivoa 30 %. Iznad ovog nivoa šuma opseg pouzdanog rada estimatora se sužava, da bi iznad 40 %-og nivoa šuma bili mogući prozori podataka u kojima nisu zadovoljeni uslovi konvergentnosti.

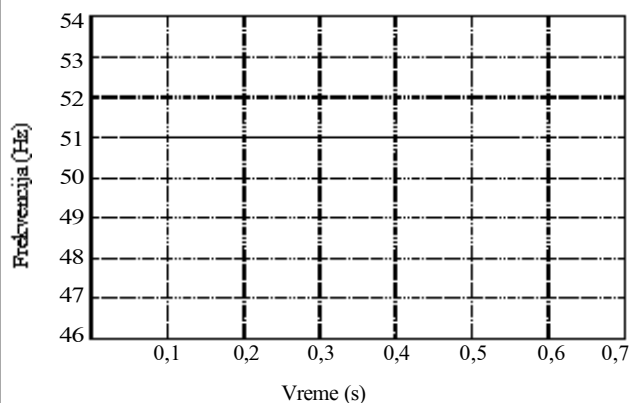
Ukoliko estimator radi u uslovima konstantnog prisustva većeg nivoa šuma potrebno je istražiti mogućnosti povećanja tačnosti estimacije frekvencije u uslovima šuma. Analizom se pokazalo da se izvesno smanjenje osetljivosti estimatora na šum može postići sa većom učestanošću odabiraja i (ili) većom širinom prozora podataka, odnosno sa većim brojem odbiraka u prozoru podataka.

### 4.3. Osetljivost algoritma na prisustvo viših harmonika

Merenje frekvencije signala u kome postoji određeni nivo viših harmoničnih komponenti se vrlo uspešno može vršiti predloženim algoritmom. Ako nivo harmonika opserviran matricom  $[A^*]$  pokriva sve harmonične komponente koje su prisutne u procesiranom signalu, onda estimator daje potpuno tačnu frekvenciju signala, što je potvrđeno u narednom testu. Korišćen je sledeći složenoperiodični signal: osnovni harmonik 51 Hz (100 %), drugi harmonik - 40 %, treći harmonik - 30 %, sedmi harmonik - 10 %. Vremenski oblik definisanog test signala prikazan je na slici 13. Estimator je podešen na:  $m=60$  i  $f_s=1000$  Hz. Matrica  $[A^*]$  je formirana tako da pokriva opseg od 46 Hz do 54 Hz sa korakom  $\Delta f_0=0,1$  Hz, pri čemu su u njoj aktivne sve harmonične komponente zaključno sa 7 harmonikom. Inicijalno pogađanje frekvencije je u algoritmu podešeno na  $f_0=50$  Hz. Rezultat estimacije frekvencije je prikazan na slici 14.



Slika 13. Vremenski oblik procesiranog signala osnovne učestanosti 51 Hz



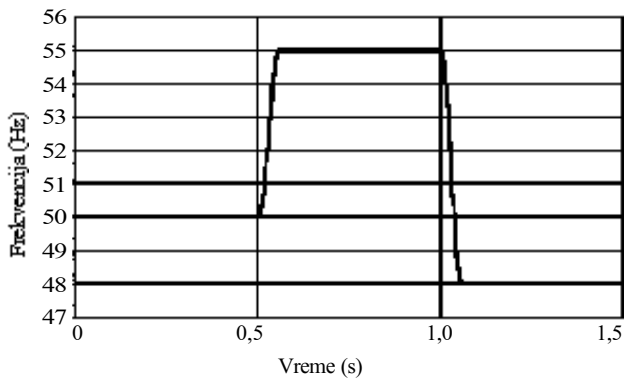
Slika 14. Vremenski tok estimirane frekvencije

### 4.4. Dinamičke performanse algoritma

Elektroenergetski sistem predstavlja jedan dinamičan sistem u kome se, kao posledica uspostavljanja balansa u aktivnim snagama proizvodnje i potrošnje, frekvencija u određenim granicama stalno menja. U cilju sprovođenja pravilnih regulacionih i zaštitnih (potfrekvencijskih i nadfrekvencijskih) akcija od suštinskog značaja je praćenje frekvencije u realnom vremenu, kako bi se pravovremeno i pravilno aktivirale zaštitne, odnosno upravljačke akcije. Dakle, za praktičnu primenu estimatora potrebno je da on u realnim uslovima dinamičkih promena frekvencije zadrži tačnost i brzinu rada.

U cilju utvrđivanja dinamičkih performansi algoritma koji je predložen u ovom radu, izvršena su dva simulaciona testa:

**TEST 1:** Simuliran je prostoperiodični ulazni signal čija se učestanost u trenutku  $t_1=0,5$  s odskočno (trenutno) menja sa 50 Hz na 55 Hz, a zatim, u trenutku  $t_2=1$  s, sa 55 Hz na 48 Hz. Estimacija je vršena sa parametrima:  $m=60$  i  $f_s=1000$  Hz. Matrica  $[A^*]$  je formirana tako da pokriva opseg od 44 Hz do 56 Hz sa korakom  $\Delta f_0=0,1$  Hz, pri čemu su u njoj aktivne sve harmonične komponente zaključno sa 7

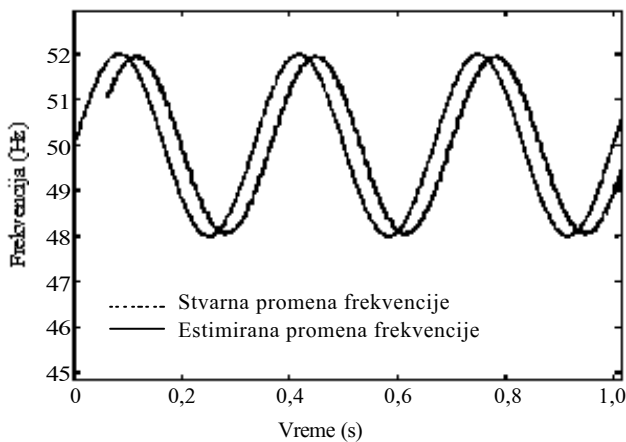


Slika 15. Estimacija odskočno promenljive frekvencije signala

harmonikom. Rezultati simulacije su prikazani na slici 15.

I u slučaju velikih i trenutnih promena frekvencije, koje inače nisu realne u sistemu, algoritam zadržava stabilnost rada. Brzina uspostavljanja novog stanja pri odskočnoj promeni frekvencije odgovara širini prozora podataka.

**TEST 2:** Simuliran je signal čija se frekvencija prostoperiodično menja sa amplitudom  $\Delta f_{max}=2$  Hz oko nominalne frekvencije  $f_n=50$  Hz. Učestanost pulsacije frekvencije signala je  $\Delta f=3$  Hz. Parametri estimatora su kao u prethodnom testu. Rezultati simulacije su prikazani na slici 16.



Slika 16. Estimacija frekvencije koja se prostoperiodično menja

Na osnovu dijagrama datih na slici 16, može se zaključiti da estimator efikasno prati promene frekvencije procesiranog signala. Kašnjenje estimacije u odnosu na realno vreme odgovara širini prozora podataka, dakle ono je unapred poznato. Takođe je prisutna i određena greška u proceni amplitude oscilovanja frekvencije i ta greška je uvek takva da je estimirana amplituda promene frekvencije manja od stvarne. Razlog postojanja ove greške je taj što se frekvencija signala menja u okviru prozora podata-

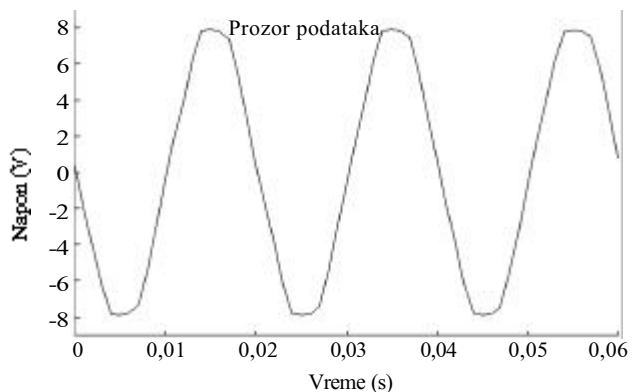
ka, pa je polazna pretpostavka o nepromenljivosti parametara u okviru prozora podataka u izvesnoj meri ugrožena. Zapravo, algoritam računa srednju vrednost frekvencije u prozoru podataka, pa je zato estimirana amplituda promene frekvencije manja od stvarne. Dakle, ako bi se upotrebio estimator sa užim prozorom podataka ova greška bi bila manja.

## 5. TESTIRANJE ALGORITMA NA REALNIM SIGNALIMA

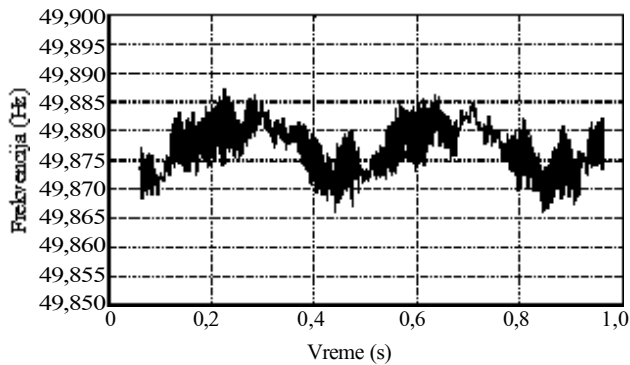
Verifikovanje mogućnosti praktične implementacije algoritma je izvršeno kroz testove na realnim signalima. Testovi su izvršeni na realnim signalima mrežnog napona snimljenim na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. U cilju utvrđivanja ponašanja estimatora u uslovima poremećaja u sistemu izvršeni su i testovi na laboratorijski dobijenim signalima napona, čija se amplituda i učestanost menjaju.

### 5.1. Estimacija frekvencije u stacionarnim radnim režimima

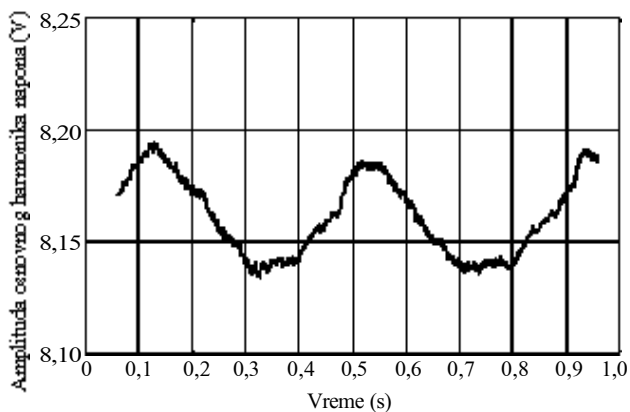
**TEST:** Ulazni signal je mrežni napon koji je pomoću transformatora po amplitudi prilagođen A/D konvertoru. Napon je snimljen u zgradi Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Vremenski oblik signala napona na ulazu u A/D konvertor je prikazan na slici 17. Iz vremenskog dijagrama se može zaključiti da u signalu napona postoji izvestan nivo viših harmonika koji su najvećim delom posledica zasićenja magnetnog kola distributivnog transformatora preko kojeg se napaja zgrada električnom energijom. Vremenski tok estimirane frekvencije i amplitude osnovnog harmonika napona su prikazani na slikama 18 i 19. Parametri estimatora u ovom testu su:  $m=60$  i  $f_s=1\ 000$  Hz. Matrica  $[A^*]$  je formirana tako da pokriva opseg od 45 Hz do 55 Hz sa korakom  $\Delta f_0=0,1$  Hz, pri čemu su u njoj aktivne sve harmonične komponente zaključno sa 7 harmonikom.



Slika 17. Vremenski oblik ulaznog test signala napona u estimator



Slika 18. Vremenski tok estimirane frekvencije



Slika 19. Vremenski tok estimirane vrednosti amplitude napona

Analizirajući dijagrame napona i frekvencije može se zaključiti da je proces estimacije bio stabilan. U estimiranim vrednostima frekvencije uočavaju se niskofrekventne pulsacije male amplitude. Ovakve pulsacije su u sistemu moguće i posledica su njihanja rotora generatora koji su priključeni na sistem. Kao posledica njihanja rotora javljaju se i pulsacije indukovanih elektromotornih sila u statorskim namotima generatora kao i pulsacija tokova snaga po vodovima što se manifestuje naponskim pulsacijama u čvorištima EES-a.

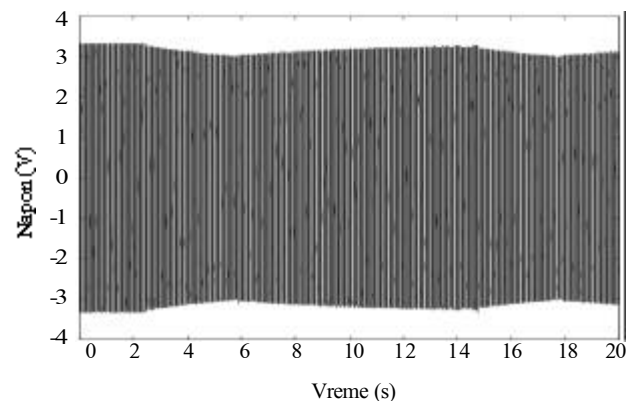
Dakle, algoritam omogućava praćenje frekvencije i napona u realnom vremenu sa visokom rezolucijom i tačnošću. To potvrđuje i uporedno merenje frekvencije koje je u ovom testu vršeno sa digitalnim komercijalnim frekvencmetrom visoke klase tačnosti (proizvođača HP). Merenja sa HP frekvencmetrom su, za analizirani signal, pokazivala frekvenciju od 49,877 Hz, što odgovara srednjoj vrednosti frekvencije koju je dao estimator na merenom vremenskom intervalu.

## 5.2. Estimacija frekvencije u poremećenim radnim režimima

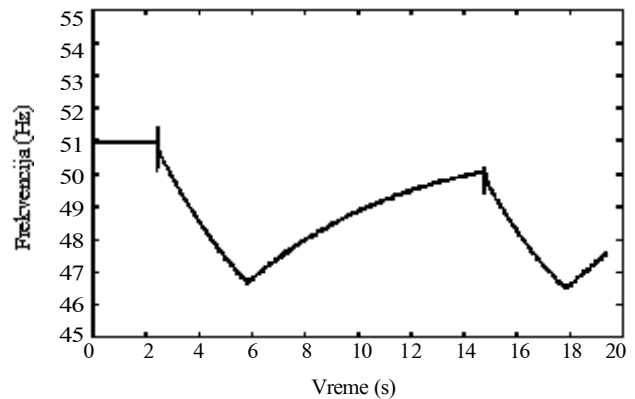
Ulazni signal je napon koji je u laboratorijskim uslovima generisan pomoću motor-generatorске grupe. Na priključke sinhronog generatora, koji je u

praznom hodu, naglo je priključeno opterećenje (uključena je sijalica), što je dovelo do opadanja frekvencije i napona, a zatim je opterećenje sukcesivno uključivano i isključivano. Vremenski tok mernog signala napona je prikazan na slici 20.

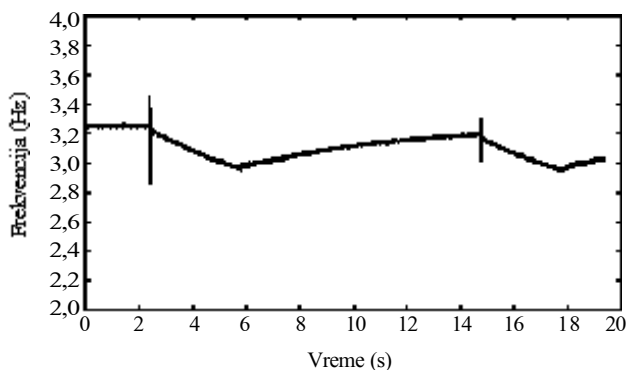
Parametri estimatora u procesiranju test signala su:  $m=80$ ,  $f_s=1\ 600$  Hz, matrica  $[A^*]$  je formirana tako da pokriva opseg od 40 Hz do 55 Hz sa korakom  $\Delta f_{\theta}=0,1$  Hz, pri čemu su u njoj aktivne sve harmonične komponente zaključno sa 11 harmonikom. Inicijalna frekvencija u iterativnom postupku je podešena na 50 Hz. Rezultati estimacije frekvencije i amplitude napona su prikazani na slikama 21 i 22, respektivno.



Slika 20. Vremenski oblik test signala



Slika 21. Vremenski tok estimirane frekvencije



Slika 22. Estimirana amplituda napona test signala

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu više testova na kompjuterski generisanim signalima i testova na realnim signalima u laboratorijskim i eksploatacionim uslovima, predloženi algoritam se pokazao kao prihvatljivo rešenje za praktične realizacije merenja frekvencije u EES. Posebne odlike algoritma su jednostavnost, robusnost i brzina procesiranja. Celokupan matematički model, baziran na minimizaciji sume kvadrata grešaka, je praktično pretočen u fiksnu matricu, što daje višestruke prednosti predloženom algoritmu u odnosu na standardne iterativne metode. Analize su pokazale da se i sa relativno malom rezolucijom matrice može postići tačnost koja odgovara klasičnoj iterativnoj metodi najmanjih kvadrata. Osim toga, red matrice ne zavisi od broja procesiranih harmoničnih komponenti, pa je u tom pogledu metoda ograničena samo frekvencijom odabiranja. Dakle, uključenje viših harmonika u proračun ne dovodi do povećanja procesorskog vremena što je bitna prednost u odnosu na standardne metode.

Algoritam je fleksibilan i daje mogućnost raznih modifikacija u cilju zadovoljenja određenih performansi. Kao jedan od najbitnijih parametara se u tom pogledu pokazala širina prozora podataka, koja definiše mogući opseg merenja frekvencije i kašnjenje estimatora u odnosu na realno vreme. Izborom užeg prozora podataka, smanjuje se red matrice i postiže veći opseg pouzdanog merenja, kao i manje kašnjenje u odnosu na realno vreme. Međutim, u uslovima šuma smanjenje prozora podataka smanjuje tačnost algoritma, pa je za konkretne aplikacije potrebno izvršiti detaljne analize u cilju izbora optimalne učestanosti odabiranja i širine prozora podataka. Za praćenje dinamike frekvencije najbolje performanse se postižu sa kratkim prozorom podataka i visokom učestanošću odabiranja. Za stacionarna merenja frekvencije mogu se koristiti širi prozori podataka i manje učestanosti odabiranja.

U predloženoj formi, algoritam estimira frekvenciju i amplitudu osnovnog harmonika napona. Ukoliko je potrebno, matrica  $[A^*]$  se može proširiti tako da omogućava estimaciju i određenih viših harmoničnih komponenti, npr. drugog harmonika za blokadu prekostrujne zaštite pri uključanju transformatora u prazan hod ili trećeg harmonika za potrebe zaštite sinhronih generatora i slično. Za svaku

dodatnu harmoničnu komponentu, broj vrsta matrice se povećava za 50 % u odnosu na osnovnu formu koja je data u ovom radu.

Kao nedostatak algoritma, u odnosu na klasične metode, može se uslovno uzeti potreba za izvesnim memorijskim prostorom u koji je potrebno smestiti matricu koeficijenata  $[A^*]$ . Memorija mora biti sa visokom brzinom pristupa, da bi se smanjilo vreme komunikacije sa procesorom. Ovakvi tehnički zahtevi, na današnjem tehnološkom nivou, se ne odražavaju bitno na cenu uređaja, pa je i u tom pogledu predloženi algoritam konkurentan.

## 7. LITERATURA

- [1] M.S. Sachdev, M.M. Giray A LEAST ERROR SQUARES TECHNIQUE FOR DETERMINING POWER SYSTEM FREQUENCY, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No 2, February 1985.
- [2] M.Giray, M.S.Sachdev OFF - NOMINAL FREQUENCY MEASUREMENTS IN POWER SYSTEMS, IEEE Transactions on power Delivery, Vol. 4, No 3, July 1989.
- [3] A. Girgis, T. L. D. Hwang, OPTIMAL ESTIMATION OF VOLTAGE PHASORS AND FREQUENCY DEVIATION USING LINEAR AND NON-LINEAR KALMAN FILTERING IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No 10, 1984, pp. 1573 - 1578.
- [4] P. K. Dash, A.K. Pradhan, G. Panda, FREQUENCY ESTIMATION OF DISTORTED POWER SYSTEM SIGNALS USING EXTENDED COMPLEX KALMAN FILTER, IEEE Transactions on power Delivery, Vol. 14, No 3, 1999, pp. 761-766.
- [5] M. Đurić, Ž. Đurišić, AN ALGORITHM FOR OFF-NOMINAL FREQUENCY MEASUREMENTS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS, Electronics, Vol. 7, No 1, September 2003, pp. 11-14.
- [6] V. V. Terzija, M. B. Đurić, B. D. Kovačević, VOLTAGE PHASOR AND LOCAL SYSTEM FREQUENCY ESTIMATION USING NEWTON TYPE ALGORITHMS, IEEE Transactions on power Delivery, Vol. 9, No 3, 1994.
- [7] V. V. Terzija, M. B. Đurić, DIGITALNO MERENJE FREKVENCije I OSTALIH PARAMETARA NISKOFREKVENCIJSKIH SIGNALA, ETF, Beograd 1999.



**Milenko B. Đurić** rođen je u Sarajevu 1948. godine. Elektrotehnički fakultet u Beogradu završio je 1973. godine, gde je magistrirao 1977. i doktorirao 1985. godine. Redovni je profesor na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Bavi se relejnom zaštitom, elektroenergetskim postrojenjima, stabilnošću i regulacijom EES-a.



**Željko R. Đurišić** je rođen 1972. godine u Beranama. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1999. godine. Od 2001. godine radi na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu kao asistent-pripravnik pri Katedri za elektroenergetske sisteme. Oblasti njegovog interesovanja su vetrogeneratori, digitalni merni sistemi u elektroenergetici i plazma tehnologije tankih prevlaka.

---

Miroslav D. Nimrihter,  
Strahil J. Gušavac, Miomir M. Dutina i Snežana B. Novaković

# Planiranje revitalizacije nadzemnih vodova

Pregledni rad  
UDK: 621.315.1

---

**Rezime:**

U članku je dat pregled danas zastupljenih načina planiranja održavanja nadzemnih vodova, među kojima treba izdvojiti dva najnovija razvijena, i to održavanje koje je fokusirano na pouzdanosti i održavanje koje je bazirano na riziku. Obe navedene strategije ne isključuju ranije primenjivane, kao što je, na primer, održavanje na bazi stanja, nego ih kombinuju uz adekvatno vrednovanje troškova vezanih za održavanje i štete koje prouzrokuje neadekvatno održavanje. Pored stranih iskustava, u radu su prikazana i domaća iskustva u razvoju metoda za donošenje odluka o održavanju vodova. Osnova za sagledavanje problematike revitalizacije nadzemnih vodova je adekvatna baza podataka sa svim neophodnim parametrima nadzemnih vodova i istorijatom događaja na njima. Na osnovu podataka iz baze, primenom studije stanja vodova, utvrđuju se potrebe za revitalizacijom. Sagledavanje značaja voda vrši se izradom odgovarajuće studije značaja koja se često zasniva na oceni pouzdanosti i rizika od otkaza. Na bazi navedenih studija, izrađuje se studija alternativnih planova revitalizacije, kojom se utvrđuju redosledi izvršavanja revitalizacije vodova kombinujući procenjeno stanje i značaj svakog voda. Alternativnih planova revitalizacije može da bude i više, zato što vremensku dinamiku izvođenja revitalizacije uslovljava raspoloživa količina novčanih sredstava. Ovo je neminovno povezano sa sagledavanjem mogućih kreditnih aranžmana, a sve ima za cilj ostvarivanje što povoljnijih novčanih efekata.

**Cljučne reči:** nadzemni vod, revitalizacija, održavanje, dijagnostika stanja, studija značaja

---

**Abstract:**

**OVERHEAD LINES REVITALIZATION PLANNING**

This article is a survey of today present ways of planning and maintenance of overhead lines. Among them should be especially emphasized the two ones that have been the most recently developed, and they are reliability centered maintenance and risk based maintenance. Both cited strategies do not exclude the earlier used ways like, for example, maintenance based on the state, but they are combined using adequate evaluation of costs related to maintenance and damages occurring due to inadequate maintenance. In addition to foreign experience, also is given the local experience in development of methods for decision making on lines maintenance. The base for looking into the issue of revitalization of overhead lines is the adequate database with all necessary parameters of the overhead lines and their history. The needs for their revitalization are determined by using data from the database and applying the study of the state of lines.

Vanredni profesor dr Miroslav D. Nimrihter, dipl. ing. [nimrr@uns.ns.ac.yu](mailto:nimrr@uns.ns.ac.yu), mr Strahil J. Gušavac, dipl. ing. [straki@uns.ns.ac.yu](mailto:straki@uns.ns.ac.yu), Snežana B. Novaković dipl. ing., [novsneza@uns.ns.ac.yu](mailto:novsneza@uns.ns.ac.yu), – Institut za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, 21 000 Novi Sad Fruškogorska 11  
Miomir M. Dutina dipl. ing., [mmdutina@nspoint.net](mailto:mmdutina@nspoint.net), – „EPS” JP „Elektroistok”, 11 000 Beograd, Kneza Miloša 11

*Announcing the line importance is done by making of corresponding study of importance, which is often based on the reliability estimation and failure risk. Based on the cited studies, the study of alternative plans of revitalization is made, where the order of revitalization activities of lines is defined, and all that by combination of the estimated state and the importance of each line. There can be more alternative revitalization plans, because the time dynamics for revitalization performance is conditioned by available financial resources. This is simultaneously connected to possible loan arrangements, and all that is aimed to realize the best possible financial costs.*

**Key words:** HV Lines, revitalization, maintenance, condition diagnosis, study of importance

## 1. UVOD

Pod revitalizacijom nadzemnog voda [1] podrazumeva se niz mera, koje treba preduzeti na njemu, da bi mu se obnovila funkcija i produžio životni vek. Ovim je obuhvaćena zamena i obnavljanje njegovih ostarelih sastavnih elemenata, te na taj način odgađanje kraja životnog veka tog voda. U literaturi se često, pored pojma revitalizacija, u istom ili sličnom značenju koriste termini: reinženjering, redizajn, re-investiranje i investiciono održavanje.

Cilj ovoga članka je da se sagleda planiranje održavanja i revitalizacije visokonaponskih nadzemnih vodova. Namera autora članka je da se, na osnovu domaćih i inostranih iskustava razviju i unaprede primenjivane metode i postojeći softverski alati [2] za planiranje revitalizacije i ostalih vidova održavanja vodova. Razvijanje adekvatnih metoda i softverskih alata bi omogućilo bolju raspodelu novca za revitalizaciju vodova, imajući u vidu da je u bližoj budućnosti neophodno uložiti znatna novčana sredstva za izvođenje revitalizacije vodova, zbog njihove dugotrajne eksploatacije.

U periodu intenzivnog razvoja privrede, u pedesetim i šezdesetim godinama prošlog veka došlo je do značajnog rasta potrošnje električne energije i shodno tome do intenziviranja izgradnje elektroprivrednih objekata. Ti objekti, nakon više od 40 godina eksploatacije u celini ili u pojedinim delovima, su pod uticajem uslova korišćenja ostarili, tj. izgubili neke od svojih tehničkih karakteristika, sa početka eksploatacije. Navedeno se može iskazati prostom činjenicom da se oni češće kvare i da je vreme njihove opravke duže. Sa aspekta pouzdanosti, može se reći da su im merodavni parametri pouzdanosti pogoršani. Istovremeno, novoizgrađeni vodovi, usled razvoja tehnologije i tehnike projektovanja imaju bolje karakteristike nego vodovi koji su izgrađeni pre 40 godina.

Elektroprivrede, kako naša tako i drugih zemalja, sa različitim stepenima ekonomskog razvoja, su prinuđene da se oslone na postojeće vodove. Zato vodovi, koji su već dugo u eksploataciji i imaju različite stepene starosti, moraju da se podvrgnu različitim vidovima intenzivnog održavanja. U [3] je

prikazan pregled dužina vodova po naponskim nivoima, u našoj zemlji, koji su već dugo u eksploataciji i potencijalni su kandidati za revitalizaciju, rekonstrukciju ili sanaciju. Dužina vodova starijih od 40 godina, naponskih nivoa 110 i 220 kV, u Srbiji i Crnoj Gori, iznosi oko 2 500 km. Za očekivati je da će u narednih 10-tak godina veći deo ovih vodova zahtevati radikalne zahvate u održavanju, a među njima će mnogi biti za revitalizaciju. Pošto je minimalna očekivana cena revitalizacije oko 40 000 \$/km, može se proceniti da je potrebna vrednost budžeta, za nastupajuće potrebe revitalizacije, bar 100 miliona dolara. Imajući u vidu da je minimalna cena izgradnje novog voda na naponskom nivou 110 kV oko 80 000 \$/km, vidi se da revitalizacija ima izuzetan značaj, zato što se njome smanjuju potrebe za izgradnjom novih vodova. Pošto je teško doći do tako velikog iznosa budžeta za revitalizaciju, potrebno je detaljno opravdati utrošak stvarno raspoloživog novca i izvršiti njegovu raspodelu za revitalizaciju, tako da se postignu što veći pozitivni efekti u odnosu na investirana novčana sredstva. Od posebnog značaja je ostvarivanje jedinstvenog metodološkog pristupa za ocenu prioriteta i načina održavanja, tj. mesta i iznosa novca koji treba da se utroši na datom nadzemnom vodu, kao i vremena do kada je eventualna revitalizacija neophodna.

Na osnovu članaka, navedenih u spisku literature, može se reći da svaki dolar uloženi u održavanje zasnovano na pouzdanosti donosi višestruku korist.

## 2. MATEMATIČKI OPIS UZROKA I POSLEDICA KVAROVA VODOVA

U elektroprivredama, u kojima su primenjene mere deregulacije, pod pritiskom regulatornih tela, kompanije za distribuciju električne energije se sve više suočavaju sa potrebom da redukuju troškove održavanja i investicije za zamenu elemenata, uz održavanje zahtevane pouzdanosti.

Za matematički opis pouzdanosti elemenata i sistema koriste se modeli zasnovani na verovatnoći i statistici. Pojave otkaza (iznenadnih i planiranih) elemenata sistema modeluju se odgovarajućim brojem godišnjih otkaza što se često sreće pod imenom



intenzitet otkaza (failure rate). Intenzitet otkaza voda ( $I$ ), iskazuje se kao proizvod poduznog intenziteta otkaza i dužine posmatranog voda. Osnovne *posledice otkaza* se opisuju trajanjem otkaza ( $r$ ).

Poseban značaj kod održavanja imaju sistemski indeksi pouzdanosti, koji pored osnovnih pokazatelja uzroka i posledica kvarova  $I$  i  $r$ ; uvažavaju i težinu uticaja otkaza na potrošačke čvorove. U ove indekse pouzdanosti se najčešće ubrajaju:

- očekivano godišnje trajanje prekida napajanja potrošačkih čvorova (unavailability),
- indeks neisporučene energije tokom godine (energy not supplied), i
- novčani iznosi štete, usled neisporučene energije tokom godine (damage).

Štete koje su posledica otkaza mogu se svrstati u dve kategorije i to štete koje trpe korisnici a proporcionalne su neisporučenoj električnoj energiji, i štete koje trpe distributeri električne energije.

Postoje i druge definicije neekonomskih i ekonomskih indeksa pouzdanosti i znatno kompleksniji pristupi proračuna godišnjih troškova otkaza od kojih je jedan dat u [4].

### 3. STRATEGIJE PRI PLANIRANJU REVITALIZACIJE VODOVA

Prema literaturi rangiranje elemenata za zamenu ili revitalizaciju kao i određivanje plana vremenske dinamike njihovog izvođenja sprovodi se kombinacijom dva aspekta, i to :

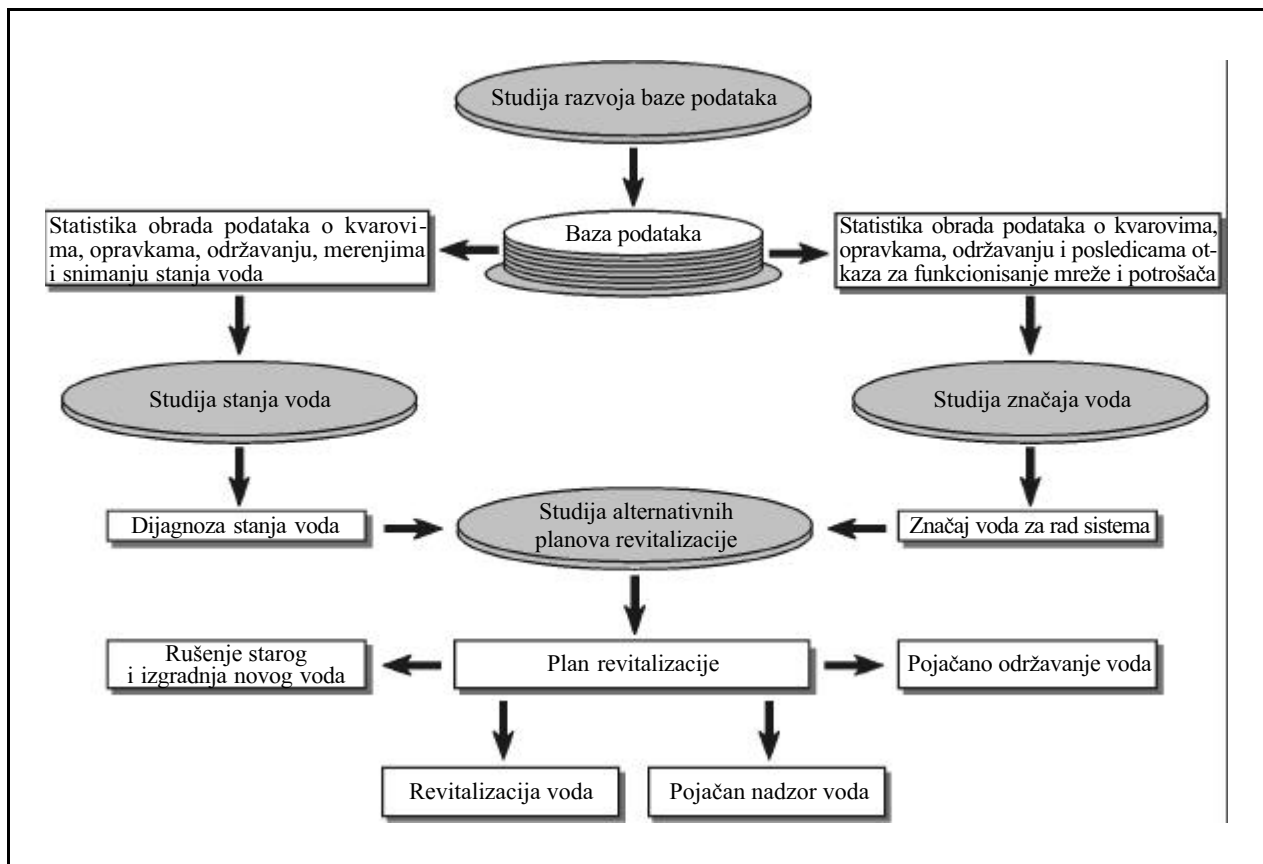
- stanja komponenti ili elemenata, i
- značaja elemenata za prenosnu mrežu, kao celinu, ili uticaja otkaza na raspoloživost snabdevanja potrošača.

Na bazi ovoga se za svaki vod izvodi zaključak o potrebi njihove revitalizacije u skladu sa blok dijagramom prikazanim na slici 1.

#### 3.1. Održavanje vodova

Poznato je da način održavanja elemenata značajno može doprineti poboljšanju (pogoršanju) dva najuticajnija parametra pouzdanosti tj. intenziteta otkaza i trajanja otkaza, što za posledicu ima smanjenje nerasploživosti, neisporučene energije, kao i štete usled neisporučene energije.

Troškovi održavanja [5] spadaju u najveće troškove u elektroprivrednim preduzećima. Potreba za



Slika 1. Strategija planiranje revitalizacije i drugih akcija održavanja

smanjenjem troškova je porasla, zbog regulativnih zahteva za nižim cenama za potrošače i plaćanjem penala za neisporučenu energiju. Razlog za to je sve veća osetljivost potrošača (naročito industrijskih) na prekide napajanja.

Prema članku [6] generalna klasifikacija strategija održavanja ima dve osnovne kategorije: 1. Održavanje kod koga se obnavljaju elementi nakon otkaza - tzv. korektivno održavanje (*CM*), 2. Održavanje kojim se izbegava otkaz - tzv. preventivno održavanje (*PM*). Kombinovanjem dve navedene metode dobija se tzv. kombinovano održavanje (*MM*).

Korektivno održavanje ima za zadatak da otkloni uzroke i posledice kvara i povrati radnu funkciju elementu. Organizacija i tehnika ovog održavanja utiče na vreme trajanja otkaza, a time i na raspoloživost nadzemnog voda, odnosno sistema u celini.

Preventivni remontu imaju zadatak da poprave karakteristike elemenata, koje su tokom vremena, radi starenja i spoljnih uticaja, postale lošije. Na taj način se deluje preventivno, pre otkaza, i time se otkazi odgađaju ili im se smanjuje učestanost pojavljivanja. Dakle, smanjuje se intenzitet iznenadnih otkaza.

U najnovije razvijene metodologije održavanja spadaju :

- održavanje koje je fokusirano na pouzdanosti elemenata (reliability centered maintenance - *RCM*), i
- održavanje koje je bazirano na riziku usled otkaza elemenata (risk based maintenance - *RBM*).

*Strategija koja u centru pažnje ima pouzdanost (RCM)* predstavlja neekonomski pristup donošenju odluka, pri čemu se u razmatranje uzimaju stanje (*CO*) i značaj voda (*IM*) iskazan preko neekonomskih pokazatelja pouzdanosti. Kao rezultat analize se dobija „kritičnost”, a na osnovu toga i redosled održavanja voda. Prvo se revitalizuju oni vodovi koji imaju najveću kritičnost (*K*) koja se određuje prema izrazu:

$$K = CO \cdot IM \quad (1)$$

Do sada se održavanje tradicionalno usmeravalo na očuvanje opreme, dok je *RCM* strategija svoj fokus pomerila na očuvanje funkcije opreme. Fokusiranje na funkciju kao krajnji rezultat ima očuvanje opreme koja ima najveći uticaj na izvršenje razmatrane funkcije. Dakle, pri tome se ne usvaja pretpostavka da je sva oprema od istog značaja, što je bila tendencija koja je prožimala tradicionalne pristupe planiranja preventivnog održavanja.

*Strategija bazirana na riziku (RBM)* zahteva ocenu rizika od kvarova (matematičkog očekivanja štete usled otkaza analiziranog voda). Rizik od kvara (*R*) je probabilistička veličina i računa se kao:

$$R = P \cdot CA \quad (2)$$

gde su :

*P* - verovatnoća otkaza voda, i

*CA* - posledica otkaza iskazana novčano.

Studijski komitet CIGRE (SC22 WG13) zaključuje [7] da je jedan od radnih ciljeva održavanja svodenje na minimum novčanih troškova u okviru određenog investicionog perioda. Za jedno elektroprivredno preduzeće celokupni troškovi (*C*), tokom investicionog perioda se računaju kao:

$$C = E + R \quad (3)$$

Deterministički faktor troškova zove se i planirana potrošnja (*E*). On se sastoji od troškova redovnog rada i održavanja, kao i od investicionih troškova obračunatih za godinu ili u vreme kad su utrošeni. Rizik od kvara (*R*), u nekom vremenskom intervalu, ovde se definiše u ekonomskim terminima i predstavlja funkciju vremena zato što i mogućnost i posledice kvara variraju kao funkcija vremena. Iz jednačine (2) očigledno je da se rizik može kontrolisati ili:

- kontrolisanjem verovatnoće pojave nekog kvara, ili
- kontrolisanjem veličine posledica tog kvara.

### 3.2. Organizacija održavanja

Tehnički sistem održavanja obuhvata širok obim različitih poslova koji se mogu podeliti na:

1. Definisane kriterijuma na osnovu kojih se donose odluke pri planiranju održavanja.
2. Priprema baze podataka neophodne za održavanje.
3. Planiranje održavanja.
4. Priprema rezervnih delova za zamenu.
5. Organizacija ekipa izvršilaca poslova remonta na terenu, oprema adekvatnim tehničkim sredstvima i njihova unapređenja.
6. Poslovi razvoja tehnika planiranja, prevencije kvarova, detekcije kvarova i otklanjanje kvarova na ekonomski opravdan i tehnički zadovoljavajući način.

Kompanije za prenos i distribuciju potvrdile su da se profitabilnost, stabilnost i performanse kompanije čvrsto zasnivaju na izboru strategije ASSET menadžmenta (gazdovanja materijalnim dobrima). Ovo za posledicu ima trend da se operacije podele, zavisno o funkciji koju imaju u revitalizaciji, u tri različite celine:

*Vlasnik ASSET-a* zadaje instrukcije menadžeru ASSET-a i obezbeđuje da dogovor sa serviserima (service provider) bude usklađen i vođen od strane menadžera *ASSET-a*.

*Menadžer ASSET-a* koncentrisan je prema strategiji *ASSET-a* i utvrđenoj politici, rizicima menadžmenta, ulaganjima i planiranju održavanja, te sklapanju ugovora sa serviserima. On takođe, sprovodi ili koordinira izradu neophodnih studija i na osnovu njihovih rezultata odlučuje kako i gde se troši novac, zadaje pravila i procedure za servisere.

Uloga *servisera (service providers)* je sprovođenje planova menadžera *ASSET-a*, pronalaženje načina kojim će raspoređivati radnu snagu u cilju postizanja efikasnog nivoa usluga održavanja.

#### **4. FUNDAMENTALNE STUDIJE ZA PLANIRANJE REVITALIZACIJE**

Formiranje metodologije i softverskog alata za planiranje i izvođenje revitalizacije obično se zasniva na sledećim studijama :

1. studija razvoja baze podataka,
2. studija za dijagnostiku stanja vodova,
3. studija za ocenu značaja vodova, i
4. studija za donošenje odluka (ekonomskim i/ili neekonomskim putem).

##### **4.1. Studija razvoja baze podataka**

Za potrebe održavanja vodova formira se baza podataka, čija struktura treba da je takva da se može koristiti za različite metodologije održavanja. Ona sadrži osnovne podatke o nadzemnim vodovima i pokazatelje koji opisuju višegodišnju istoriju događaja na njima. Podatke o događajima na vodovima unosi korisnik, tokom njegove eksploatacije.

##### **4.2. Studija za dijagnozu stanja voda**

Studija [8] u kojoj se dijagnosticira stanje voda sadrži niz koraka, od kojih će se ovde pomenuti samo neki od njih.

U okviru statističke analize informacija, iz baze podataka, ocenjuje se matematičko očekivanje godišnjeg broja otkaza, zamenjenih izolatora, podaci o remontovanju vodova, ekstremno teškim meteorološkim pojavama i meteorološkim pojavama u momentu nastanka kvarova. Na osnovu informacija o ponašanju vodova u prošlosti, sadržanih u bazi podataka, proverava se zadovoljenost potrebnih uslova. Ti podaci su: godišnji broj (intenzitet) svih otkaza; godišnji broj intervencija usled trajnih otkaza; godišnji broj zamenjenih izolatora; godišnji broj dana utrošenih na planske remonte (neraspoloživost usled planskih otkaza) itd. Svi ovi podaci kao i kompletna istorija događaja se dobijaju iz baze podataka, a neophodni su za planiranje revitalizacije. Na osnovu detaljnog pregleda nadzemnog voda, pregledom

na terenu i ispitivanjem elemenata u laboratoriji, ocenjuje se stvarno stanje nadzemnog voda.

##### **4.3. Studija značaja voda za mrežu**

Nakon studije, u kojoj se dijagnosticira stanje ostarelih vodova, formira se njihova rang lista u pogledu stanja. Nakon toga se formira rang lista vodova u pogledu njihovog značaja [9, 10, 11], odnosno određivanje negativnih uticaja njihovih otkaza na mrežu u celini. Rezultati studije su nizovi kako neekonomskih, tako i ekonomskih pokazatelja pouzdanosti.

Korišćenjem softverskog alata određuju se ekonomske posledice otkaza voda, koji je predmet studije značaja. Naravno, sa porastom težine posledica otkaza voda raste i njegov značaj na sistem u celini.

##### **4.4. Studija alternativnih planova revitalizacije**

Tokom postupka planiranja revitalizacije, moguće je generisati više, tehnički izvodljivih, alternativnih planova revitalizacije. Ti planovi se razlikuju u pogledu mesta, obima i godine revitalizacije. Ova studija treba da odgovori na pitanje koja je od alternativa revitalizacije najpovoljnija za vlasnika opreme. Pored toga ovim studijama treba obuhvatiti različite aspekte neizvesnosti, kao što su različite stope inflacije, aktuelizacije itd.

Na osnovu prethodnog, jasno je da se ovom metodologijom utrošak sredstava za revitalizaciju i održavanje locira na najugroženije (sa aspekta studije stanja) i najvažnije (sa aspekta studije značaja) nadzemne vodove.

#### **5. ISKUSTVA U PLANIRANJU REVITALIZACIJE I ODRŽAVANJA**

##### **5.1. Iskustva u vezi dijagnoze stanja**

U literaturi se često, pored izraza „stanje elementa” kojim se želi opisati stanje elementa u pogledu parametara otkaza i održavanja, koriste i izrazi performanse, sposobnost, status, indeks zdravlja.

U članku [12] autor smatra da je osnovni zadatak numerički opis stanja opreme i autor taj opis naziva „indeks zdravlja” opreme. Ocena veličine indeksa zdravlja može biti shvaćena kao proces utvrđivanja prioriteta unutar organizacije održavanja svih dobara. Indeksi zdravlja omogućuju:

1. Iskorišćenje dostupnih informacija o stanjima i faktorima rizika za definisanje blizine kraja životnog veka,
2. Strukturisanje procesa, kojim se definišu promene budućih stanja,

3. Iskorišćenje postojećih tehničkih saznanja i iskustava, za predviđanje buduće aktivnosti, i
4. Poređenje sa definisanim referentnim stanjem, radi pomoći u odlučivanju.

Indeks zdravlja omogućuje da se dobiju odgovori na pitanja kada postojeća oprema treba da bude zamenjena i koje su finansijske i operativne posledice, ukoliko se oprema ne zameni.

U [13] su prikazani neki od rezultata istraživanja stanja niza komponenti elektroenergetskog sistema u Finskoj, u okviru jedne obimne studije, koja je sprovedena u 2000. godini. Autor analizira probleme koje može izazvati loše stanje opreme, što može u krajnjem rezultovati povećanjem vremena potrebnog za održavanje, toliko da će prevazići postojeće ljudske, tehničke i finansijske resurse. Ovom studijom utvrđena je prosečna starost opreme od oko 20 godina, a stanje opreme je takvo da kako autor kaže oprema ne predstavlja „asset time bomb”.

## 5.2. Iskustva u vezi modela i alata za planiranje revitalizacije

Kada se utvrdi da je nadzemni vod došao do perioda u kome treba da bude revitalizovan, potrebno je analizirati strategije za revitalizaciju, rekonstrukciju, održavanje ili rušenje, da bi se procenila moguća rešenja i došlo u ekonomskom smislu do najboljeg. U svetu su zastupljeni različiti načini analize za određivanje strategije revitalizacije.

Španska IBERDROLA je razvila projekat [14] za reinženjering, u kome je redizajniran proces održavanja u distributivnim preduzećima. Cilj ovog projekta je da se ukloni ekonomska i tehnička neefikasnost i uvedu unapređenja koja su identifikovana od strane radne grupe stvorene za takve potrebe. Sistem GAMAD, razvijen ovim projektom, automatski procenjuje rizik korišćenja opreme i predlaže prikladnu vrstu revizije. Dobijeni predlog od strane sistema može se modifikovati od strane korisnika.

U [15] su izloženi glavni pravci istraživanja o procenama i povećanju životnog veka postojećih nadzemnih vodova koji su izvedeni od strane Electricite de France (spektar provodnika namenjenih za vodove koji se revitalizuju je unapređen i prezentovan na poslednjem međunarodnom savetovanju CIGRE). Ova istraživanja su vrlo značajna, jer će se „u 21. veku veliki deo investicija uložiti u obnavljanje postojeće mreže”.

Prema studiji 20 austrijskih kompanija [16] za snabdevanje energijom i austrijske asocijacije elektropreduzeća, odsek za tehnologiju visokog napona odredio je metodologiju koja omogućava planiranje održavanja (remonta). Radi ispravnog funkcionisanja ove metodologije i alata procenjuje se: tehničko

stanje, prioritet ispitanih mreža, kao i troškovi održavanja.

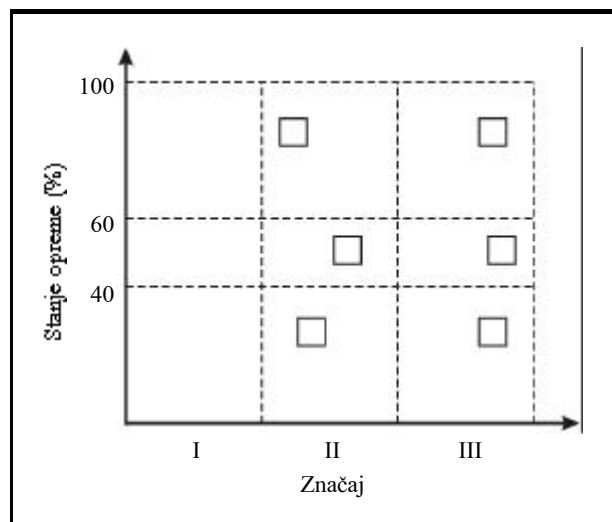
Stanje opreme se numerički opisuje od 0 (sasvim dobro) do 100 % (sasvim loše). Ovom metodologijom oprema se rangira prema potrebama za održavanjem [17] zavisno od stanja u sledeće grupe :

1. Stanje (0-40 %): Postoji potreba za pojačanom inspekcijom (nadzorom) opreme.
2. Stanje (40-60 %): Postoji potreba za preventivnim održavanjem opreme, i
3. Stanje (60-100 %): Postoji potreba za zamenom delova opreme.

Ako se uvaži samo značaj opreme opisan od 0 (sasvim mali) do 100 % (veoma veliki), oprema se može klasifikovati u sledeće grupe po značaju :

- I. Bez održavanja.
- II. Održavanje svakih 10 godina.
- III. Održavanje svakih 5 godina.

Treba naglasiti da je održavanje svakih 5 ili 10 godina predlog autora članka [17] i da je takođe podložno dodatnom razmatranju. Na slici 2 data je ilustracija navedenog pristupa. U zavisnosti od stanja i značaja nadzemnog voda vrši se izbor načina održavanja i vremenskog perioda u kome to treba izvršiti.



Slika 2. RCM metod odlučivanja

Pri numeričkom određivanju stanja opreme, potrebno je koristiti različite težinske faktore, da bi se uvažio uticaj više različitih kriterijuma na vrednost ove veličine. Stanje celog voda je računato na osnovu stanja i količine pojedine opreme na nadzemnom vodu.

## 5.3. Rezultati primene alata za planiranje revitalizacije

Može se reći [18] da je teško dati tehno-ekonomsku procenu da li staru komponentu treba zameniti ili nastaviti sa njenim održavanjem. Zbog toga je neop-

hodno posvetiti posebnu pažnju razvoju modela koji će dati strategiju po kojoj će se ona sprovoditi.

Opšti model sadrži niz drugih modela koji su testirani u praksi. To su:

- model sadašnje vrednosti troškova,
- model starenja,
- model budžeta,
- model kritičnosti, i
- model zamene i opravke.

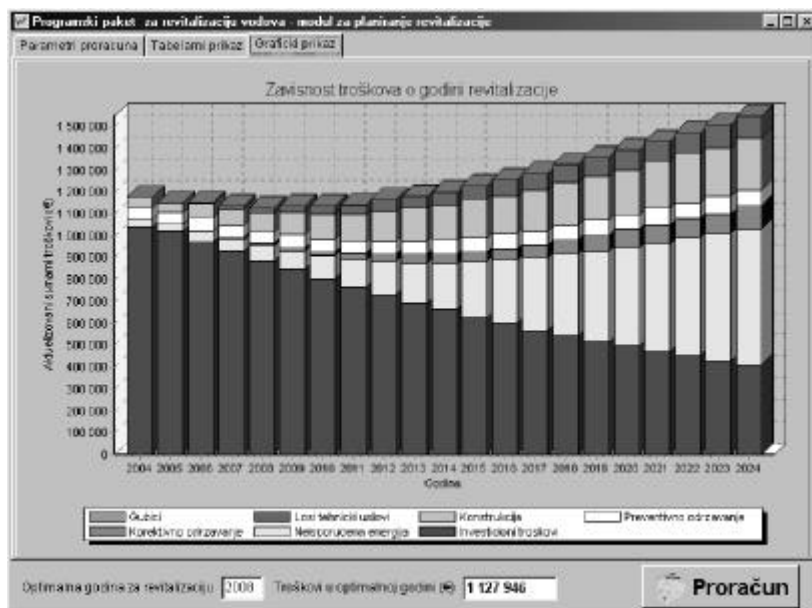
*Model sadašnje vrednosti troškova* se obično primenjuje za obimnije poslove. Modelom se sračunava aktuelizovana suma troškova za određeni period od na primer 20 godina.

Revitalizacija se može sprovesti u bilo kojoj godini planskog perioda čija horizont godina je na primer 20-ta godina u budućnosti. Za svaku godinu u kojoj bi se mogla sprovesti revitalizacija, računaju se sumarni svedeni troškovi, kao što je to ilustrovano slikom 3. Na ovaj način određuje se i optimalna godina, u kojoj su sumarni svedeni troškovi minimalni. Na slici 3 je to četvrta godina od trenutka u kome se analiza vrši. Sumarni svedeni troškovi se sastoje od nekoliko komponenti koje su na ovoj slici prikazane različitim bojama.

Svrha *modela starenja* je da se sagleda period kada se vrši veliki broj zamena komponenti. Krajnji cilj ovog modela je da utvrdi skupove komponenti koje treba zameniti u nekoj godini, prosečnu i maksimalnu starost i ukupne troškove tokom godine.

*Model budžeta* proračunava očekivane godišnje troškove za sve elemente tokom godine u periodu analize. Proračuni su bazirani na preporučenim godinama za zamenu. Na primer, kada bi se zamena radila u optimalno vreme, ukupni troškovi mogu varirati od godine do godine. Prilagođavanjem vremena zamene mogu se ujednačiti troškovi u toku perioda analize. Zbog toga, model budžeta treba upotrebiti nakon primene svih drugih modela.

Kod *modela kritičnosti* komponente se rangiraju po kritičnosti i u modelu treba odrediti one koje treba zameniti, ili za koje postoji povećana potreba za održavanjem u narednim godinama. Za komponentu se kaže da je kritičnija što joj je nivo značaja veći i što joj je stanje lošije. Kritičnost komponente definisana je s obzirom na posledice koje prouzrokuje njen kvar (uvažavajući prekid napajanja potrošača). Što je očekivano vreme prekida napajanja duže i neisporučena energija je veća, a time su i novčane štete veće.



Slika 3. Sadašnja vrednost troškova za revitalizaciju voda u različitim godinama planskog perioda

Kod modela zamene i opravke u slučaju da se desi neočekivani kvar komponente koja je planirana za zamenu u narednih nekoliko godina, ekonomičnije ju je zameniti po prethodnom planu, umesto opravljati. Na osnovu investicionih troškova i očekivanog porasta operativnih troškova, troškova održavanja i prekida, model proračunava koliko može da bude skupa opravka, i da li je ekonomično da se uradi zamena pre nego što je to planirano.

U člancima [19] i [20], su dokumentovano prikazana neka od domaćih iskustava, u revitalizaciji visokonaponskih vodova. Težište je na oceni stanja kroz analizu statističkih podataka, a zatim i kroz sagledavanje trenutnog stanja nadzorom eksperata na terenu i merenjem tehničkih karakteristika uzoraka voda. Prikazani su kriterijumi za revitalizaciju visokonaponskih vodova.

## 6. ZAKLJUČAK

*Upravljanje velikim novčanim fondovima za održavanje nadzemnih vodova zahteva sofisticirani pristup i uvažavanje velikog skupa podataka i tehničkih znanja, značajnih za adekvatno donošenje odluka. Jasno je da se pouzdanost unapređuje, što znači da neraspoloživost, godišnja neisporučena energija i godišnje štete kod potrošača, ali i kod elektroprivrednog preduzeća, opadaju ako se dobro planiranim održavanjem smanjuje broj otkaza i skraćuje trajanje pojedinih otkaza. Iz skupa članaka, koji su ovim radom prezentirani, nedvosmisleno se zaključuje da je neophodno razvijanje jedinstvene metodologije za revitalizaciju ostarelih vodova.*

Iz ove metodologije je neophodno napraviti softverski alat za donošenje odluka o održavanju, koji treba permanentno primenjivati. Od suštinskog značaja je da se revitalizacija pojedinih nadzemnih vodova obavi pre nego što se nagomilaju problemi, nastali zbog njihovog starenja.

Metodologija treba da se zasniva na dva skupa globalnih informacija a to su, sa jedne strane, informacije o stanju ispravnosti (stanju zdravlja) i sa druge strane, značaj posmatranog voda, koji se iskazuje neekonomskim ili ekonomskim pokazateljima. Na osnovu ovih informacija, primenom neekonomskih ili ekonomskih metoda, minimizacijom aktuelizovanih godišnjih troškova, određuju se prioriteti održavanja, obim održavanja, pa čak i godina u kojoj je optimalno primeniti određene mere održavanja.

Prednosti primenjenih metodologija su takve da se svi vodovi analiziraju na isti način, pa su i rezultati uzajamno uporedivi. Kao rezultat primene ovih metodologija dobija se revitalizovan vod, sposoban za izvršenje zadatih funkcija u narednih 40-tak godina. Pri tome, revitalizovani vodovi imaju povećanu pouzdanost i veću trajno dozvoljenu struju od onog pre revitalizacije, pri čemu su kapitalni troškovi 40 do 60 % od onih za novi vod istog tipa.

Postupak formiranja navedene metodologije i softverskog alata treba da se istraži putem izrade sledećih studija: 1. studije za dijagnostiku stanja vodova, 2. studije za ocenu značaja vodova, 3. studije za donošenje odluka (ekonomskim i neekonomskim putem) i 4. studije za izradu baze podataka neophodne za ispravno funkcionisanje metodologije.

Nakon izrade navedenih studija, potrebno je pristupiti izradi softverskog alata.

## 7. LITERATURA

- [1] G. Spaić: COMMON LANGUAGE OF EXPERTS IN THE FIELD OF OVERHEAD LINES, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, Paper R1-02, pp.1-5.
- [2] G. Radanović, Z. Slijepčević, M. Dutina: RAČUNARSKI PROGRAM ZA REVITALIZACIJU DALEKOVODA, XXII Savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, Maj, 1997.
- [3] N. Vučinić, Ž. Torlak: ABOUT OVERHEAD LINE REVITALIZATION PLANNING IN SERBIA, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, Paper R7-02, pp.1-6.
- [4] M. Nimrihter, R. Ćirić, D. Popović: DISTRIBUTION NETWORKS RELIABILITY ANALYSIS BY MONTE CARLO SIMULATIONS, 15th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Nice, France, June 1-4, 1999, Paper C.2.2.2, pp.50-52.
- [5] M. Tapper, S. Jansson, K. Oberger: RCM FOR ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS-THE SWEDISH SOLUTION, 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2003, Barcelona, May 12-15, 2003, Session 5, Paper No 3, pp.1-3.
- [6] I. Felea, N. Croiu, I. Boja: CONSIDERATION REGARDING THE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE OF ELECTRIC POWER TRANSFORMERS, 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2003, Barcelona, May 12-15, 2003, Session 1, Paper No 37, pp.1-5.
- [7] Working Group by SC22 WG13: PRELIMINARY REPORT: MANAGEMENT OF EXISTING OVERHEAD TRANSMISSION LINES, 38th CIGRE Session 2000, Paris, 2000, Paper 22-107, pp.1-6.
- [8] M. Dutina, M. Nimrihter: OVERHEAD LINES REVITALIZATION - METHODOLOGY AND SOFTWARE TOOLS, DistribuTech Europe 2001, Berlin, November 6-8, 2001, Session 2, Paper 3, pp.1-17.
- [9] M. Nimrihter, S. Gušavac, S. Novaković: OVERHEAD LINE RELIABILITY AS A BASE FOR ASSESSMENT OF LINE IMPORTANCE IN THE PLANNING OF REVITALIZATION, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, Paper R2-03, pp.1-5.
- [10] M. Nimrihter, M. Dutina, D. Radojčić, S. Gušavac, S. Novaković: OVERHEAD LINES IMPORTANCE-DECISION MAKING BASIS FOR THEIR REVITALIZATION NECESSITY, 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2003, Barcelona, May 12-15, 2003, Session 5, Paper No 17, pp.1-5.
- [11] S. Gušavac, M. Nimrihter, S. Novaković, Ž. Savanović: OVERHEAD LINES MAINTENANCE INFORMATION SYSTEM, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, Paper R3-01, pp.1-7.
- [12] D. Hughes: THE USE OF „HEALTH INDICES” TO DETERMINE END OF LIFE AND ESTIMATE REMANENT LIFE FOR DISTRIBUTION ASSETS, 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2003, Barcelona, May 12-15, 2003, Session 5, Paper No 15, pp.1-5.
- [13] T. Kiiveri: ASSET TIME BOMB-GRID AGEING MANAGEMENT FINGRID APPROACH, DistribuTech Europe 2001, Berlin, November 6-8, 2001, Session 2, Paper 2, pp.1-11.
- [14] I. Olarreaga: GAMAD PROJECT, 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2003, Barcelona, May 12-15, 2003, Session 5, Paper No 11, pp.1-6.
- [15] F. Chone, M. Gaudry, J. Parrotta, L. Gourtib: ASSESSMENT OF EXISTING OVERHEAD TRANSMISSION LINES AND SOLUTIONS FOR EX-

- TENDING THEIR RESIDUAL LIFETIMES, 38th CIGRE Session 2000, Paris, 2000, Paper 22-201, pp.1-6.
- [16] O. Groen: ASSET MANAGEMENT FOR UTILITIES - OPTIMISING THE BUSINESS OF ELECTRICITY TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, 17th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2003, Barcelona, May 12-15, 2003, Session 6, Paper No 45, pp.1-4.
- [17] G. Balzer, O. Schmitt; A. Schneisde S. Gal, F. Balasiu, K. Bakic: LIFE CICLE ASSESSMENT OF SUBSTATIONS: A PROCEDURE FOR AN OPTIMIZED ASSET MANAGEMENT, 39th CIGRE Session 2002, Paris, August 25-30, 2002, Paper 23-302, pp.1-6.
- [18] F. Wester, J. Smit, J. Oestergaard, J. Corbett: DEVELOPMENT OF ASSET MANAGEMENT SERVICES, 39th CIGRE Session 2002, Paris, August 25-30, 2002, Paper 23-308, pp.1-6.
- [19] M. Dutina, S. Novaković: EXPERIENCE DURING THE REHABILITATION OF HIGH VOLTAGE OVRHEAD LINES, COLLOQUIUM ON OVERHEAD LINES REVITALIZATION, Beograd, May 06-10, 2003, Paper R5-02.
- [20] M. Nimrihter, S. Gušavac, S. Novaković, M. Dutina: TECHNO-ECONOMICAL ANALYSIS OF OVERHEAD LINES REVITALIZATION CANDIDATES, Colloquium on Overhead Lines Revitalization, Beograd, May 06-10, 2003, Paper R7-01, pp.1-8.

Rad je primljen u uredništvo 31. 12. 2003. godine



**Miroslav D. Nimrihter** je vanredni profesor na Univerzitetu u Novom Sadu. Diplomirao, magistrirao i doktorirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Drži predavanja na Institutu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, iz predmeta: „Distributivni sistemi”, „Tehnika visokog napona” na dodiplomskim studijama i „Distributivni električni sistemi” i „Pouzdanost elektroenergetskih sistema” na poslediplomskim studijama. Kao honorarni profesor drži predavanja iz „Relejne zaštite i automatike EES” na Elektrotehničkom fakultetu u Srpskom Sarajevu. Radio je i radi na naučnim projektima iz oblasti dugoročnog planiranja i projektima vezanim za upravljanje opterećenjem. Objavljuje članke iz pouzdanosti, planiranja optimalne primene distributivne automatike i daljinskog merenja u distributivnim mrežama i menadžmenta materijalnim dobrima u elektroprivredi, a planiranjem posebno revitalizacije vodova.



**Strahil J. Gušavac** je zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu kao asistent na elektrotehničkom odseku. Diplomirao je na istom fakultetu, a magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Drži vežbe iz predmeta: „Planiranje, eksploatacija i upravljanje u EES”, „Distributivni sistemi” i „Električne instalacije i industrijska elektroenergetika”. Učestvovao je na više studija rađenih za potrebe privrede. Objavljuje članke iz pouzdanosti, upravljanja potrošnjom električne energije i menadžmenta materijalnim dobrima u elektroprivredi.



**Miomir M. Dutina** (1940) diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Prištini 1973.godine. Prva praktična iskustva stekao je u REH kombinatu „Kosovo”. Nakon diplomiranja radio je u Trepči i u Elektrosrbiji u Kraljevu. Od 1976. godine zaposlen je u Elektrostoku u Novom Sadu. Aktivno se bavi problematikom visokonaponskih nadzemnih vodova, sa posebnim interesom za njihovu revitalizaciju, kao i za izbor faznih provodnika i zaštitne uzađi (naročito za prelaze velikih reka). Analize ponašanja nadzemnih vodova 110 kV, 220 kV i 400 kV, kako u redovnom pogonu tako i za vreme havarijskih režima, takođe su predmet njegovog neprekidnog višegodišnjeg interesovanja.



**Snežana B. Novaković** je zaposlena na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu kao stručni saradnik. Diplomirala je na istom fakultetu, a trenutno je na poslediplomskim studijama. Drži vežbe iz predmeta „Distributivni sistemi” i „Tehnika visokog napona”. Objavljuje članke iz pouzdanosti i menadžmenta materijalnim dobrima u elektroprivredi (revitalizacija vazdušnih vodova).

---

Snežana Mijailović,  
Zoran Vujasinović i Mladen Apostolović

# Pregled aktuelnih metoda za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži u Evropi

Pregledni rad  
UDK: 621.31

---

## Rezime:

*U radu su izložene postojeće metode za upravljanje zagušenjima koje se primenjuju ili su u fazi razrade u zemljama Evrope. Prikazane su metode kao što su različiti vidovi alokacije NTC-a, te metode razdvajanja/spajanja tržišta, redispečinga i koordinisanih aukcija. Pored izloženih najvažnijih osobina, organizaciono-tehničkih zahteva i načina primene svake metode, na nov i kritički način je data i uporedna analiza svih prezentovanih metoda kojom je prikazana procena njihove efikasnosti, imajući u vidu postavljene kriterijume koje te metode treba da zadovolje.*

**Ključne reči:** tržište električne energije, liberalizacija, zagušenje, alokacija kapaciteta, aukcija, NTC

---

## Abstract:

### OVERVIEW OF PRESENT CONGESTION MANAGEMENT METHODS IN TRANSMISSION NETWORK IN EUROPE

*This paper deals with the existing methods of congestion management that are in force or in phase of elaboration in European countries. Methods such as various forms of NTC allocation, market splitting, re-dispatching and coordinated auctioning are presented. Apart from the main characteristics, organizational and technical requirements and implementation aspects of each method, comparative analysis between them is given, in order to evaluate their efficiency according to the respected criteria, in a new and objective manner.*

**Key words:** electricity market, liberalization, congestion, capacity allocation, auction, NTC

---

## 1. UVOD

Aktuelni proces kreiranja evropskog tržišta električne energije i njegove liberalizacije je otvorio mnogobrojna pitanja vezana za obezbeđenje sigurnosti napajanja potrošača i upravljanje zagušenjima u mreži. Među njima su najvažnija ona koja regulišu međunarodnu trgovinu, eliminišu zagušenja u prenosnoj mreži i obezbeđuju brzu i pouzdanu raz-

menu informacija. Za mnoge probleme daju se privremena rešenja, a za većinu njih se još uvek traži adekvatan odgovor. Obezbeđenje sigurnosti rada elektroenergetske interkonekcije, uzimajući u obzir karakteristike petljastih prenosnih mreža na prostoru zemalja Evrope, zahteva koordinisan rad evropskih operatora prenosne mreže i zajedničko rešavanje problema u okviru postojećih elektroenergetskih organizacija.

---

*Snežana Mijailović dipl. el. ing, Zoran Vujasinović dipl. el. ing, Mladen Apostolović dipl. el. ing.  
– Elektroenergetski koordinacioni centar, Beograd, 11 040 Beograd, Vojvode Stepe 412*



Upravljanje zagušenjima u visokonaponskoj elektroenergetskoj mreži dobija sve više na značaju razvojem liberalizovanog tržišta električne energije i restrukturiranjem elektroenergetskog sektora. U otvorenom tržištu električne energije, tokovi snaga nisu uzrokovani samo proizvodnjom i potrošnjom u okviru jednog elektroenergetskog sistema (EES) ili interkonekcije u celini, već su posledica različitih cena električne energije u okviru pojedinih regiona, a time i ugovorenih transakcija električne energije na međusistemskom, odnosno međuregionalnom nivou. Postojeće elektroenergetske mreže nisu prvobitno bile građene za današnju, novonastalu situaciju u elektroenergetskom sektoru. Ranije razvijene metodologije za planiranje i upravljanje električnim mrežama u okviru vertikalno organizovanih elektroprivreda zahtevaju ponovo preispitivanje u svetlu novih mehanizama današnje organizacije tržišta električne energije.

Interkonektivni dalekovodi su u ranijem periodu prvenstveno služili za povezivanje elektroenergetskih sistema, sa ciljem da se obezbedi veća sigurnost, pouzdanost i bolja regulacija tako formirane interkonekcije. Osnovni cilj svakog elektroenergetskog sistema je bio da bude što je moguće duže samoizbalansiran, a međusobna trgovina električnom energijom je bila bazirana na jasno definisanim ugovorima o kupoprodaji električne energije. Na liberalizovanom tržištu su se pojavili brojni novi učesnici (nezavisni proizvođači, trgovci, kvalifikovani potrošači), koji učestvuju kako na nacionalnim tržištima električne energije, tako i na regionalnim, odnosno evropskom tržištu, što ima za posledicu značajno povećanje broja transakcija električne energije, koje je teško u svakom trenutku fizički koordinisati i tehnički ispitati, kako bi se obezbedila zahtevana sigurnost prenosne mreže.

Obezbeđenje sigurnosti rada elektroenergetske interkonekcije i upravljanje zagušenjima u otvorenom tržištu električne energije sadrži u sebi nekoliko kompleksnih zadataka i uzimajući u obzir karakteristike petljastih visokonaponskih mreža razvijenih, u poslednjih nekoliko decenija na prostorima zemalja Evrope, ovaj problem ne može biti rešen na nivou jednog operatora prenosne mreže (TSO - Transmission System Operator). To je kompleksan zadatak koji se treba rešiti u okviru postojećih elektroenergetskih organizacija (kao što su UCTE<sup>1)</sup>, ETSO<sup>2)</sup> i dr.) i na nivou kompletne interkonekcije, uzimajući u obzir:

– tehničke probleme,

<sup>1)</sup> UCTE - Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (Unija za koordinaciju prenosa električne energije)

<sup>2)</sup> ETSO - European Transmission System Operators (Evropski operatori prenosnog sistema)

- komercijalne aspekte,
- organizacione zadatke,
- pravni osnov.

Pitanje sigurnosti rada elektroenergetskog sistema postaje naročito aktuelno posle nekoliko raspada EES-a koji su se desili na području Sjedinjenih Američkih Država (Kalifornija, Njujork) i u Evropi (London, Italija) tokom 2002. i 2003. godine.

U poslednjih nekoliko godina, na području Evropske Unije, ETSO je načinio značajne napore u postavljanju principa upravljanja zagušenjima koji bi odgovarali postojećem stanju razvoja evropskog tržišta električne energije, kao i daljem razvoju internog tržišta električne energije Evropske unije. Neke od ETSO preporuka su već primenjene u evropskim zemljama, kao što su procena prenosnih kapaciteta, različiti tipovi mehanizama za alokaciju tih kapaciteta, procedure za prognozu zagušenja i dr.

Osnovni zadatak ovog rada je da sagleda postojeće metode za rešavanje problema zagušenja u visokonaponskim elektroenergetskim mrežama koje se primenjuju ili su u fazi izučavanja u zemljama i/ili regionima Evrope. U radu su opisane do sada razvijene metode za alokaciju NTC-a, metode razdvajanja/spajanja tržišta, redispesinga i koordinisanih aukcija. Na kraju rada, u cilju sagledavanja efikasnosti razvijenih metoda za alokaciju prenosnih kapaciteta, dat je uporedni prikaz postojećih metoda sa akcentom na njihovu primenljivost i uspešnost u realizaciji.

## **2. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE - DOSADAŠNJA ISKUSTVA ZEMALJA EVROPSKE UNIJE**

### **2.1. Razvoj tržišta električne energije u Evropi**

Liberalizacija elektroenergetskog sektora u svetu počinje 80-tih godina, a prve zemlje Evrope (Engleska, Vels, a zatim Norveška) su započele taj proces početkom 90-tih godina. Intenziviranje ovog procesa u zemljama članicama Evropske unije nastupilo je nakon usvajanja „Direktive o unutrašnjem tržištu električne energije u Evropskoj uniji” [1], krajem 1996. godine, a njena primena, posle procesa pripreme i harmonizacije između članica je započela od 19. februara 1999. godine. Dalji period je okarakterisan pripremnim aktivnostima u zemljama kandidatima za ulazak u Evropsku uniju (u prvom redu zemljama centralne Evrope).

U cilju preispitivanja tehničkih parametara rada elektroenergetskih sistema zemalja Evropske unije i kreiranja novih tehničkih metodologija koje prate posledice liberalizacije elektroenergetskog sektora, formirano je udruženje operatora prenosnog sistema

zemalja Evropske unije - ETSO. Ovo udruženje je do sada objavilo nekoliko dokumenata vezanih za razne tehničke aspekte funkcionisanja tržišta, među kojima su i oni koji se bave problemima zagušenja u visokonaponskoj prenosnoj mreži, i upravljanjem istima. Pošto je ceo proces liberalizacije i kreiranja tržišta električne energije u povelju, važno je napomenuti da razvoj neophodnih procedura i metoda nije završen, da je do sada uočeno mnogo nedostataka u njima, i da će se ovaj proces i dalje razvijati u cilju dobijanja jasnih i efikasnih rešenja.

## 2.2. Potreba za metodama otklanjanja zagušenja

Verovatno je da su inicijatori ideje o liberalizaciji tržišta električne energije i uvođenju tržišnih zakonitosti u elektroenergetiku stručnjaci s polja ekonomije, koji vrlo dobro poznaju prednosti koje racionalno i tržišno orijentisano upravljanje svakim dobrom može doneti. Pošto je u Evropi postojala interkonektivna mreža sastavljena od povezanih nacionalnih elektroprivreda, smatrali su da je infrastruktura manje-više spremna, a njihovo poznavanje složenih ekonomskih zakonitosti i pravila sa tržišta drugim robama trebalo je da bude dovoljno iskustvo za početak primene tržišnih mehanizama nad električnom energijom. Buduće evropsko tržište električne energije su verovatno zamislili kao jedinstvenu bakarnu ploču, površinu (teritoriju) beskonačne provodnosti, bez mogućnosti problema u transportu električne energije iz jedne tačke u drugu, gde će svaki učesnik (proizvođač, potrošač) moći da pristupi, tj. da nabavi ili plasira električnu energiju, vodeći računa samo o ekonomičnosti transakcija, a ne i o tehničkim ograničenjima, u prvom redu problemima prenosa. Teško je bilo povlačeći paralele sa primerima trgovine drugim dobrima nazreti probleme u prenosu, koji su kod ostalih dobara marginalni. Međutim, kako je izloženo u [2], tri glavne specifičnosti električne energije unose dodatnu dimenziju u problem projekta tržišta električne energije na do sada poznatim osnovama ekonomije:

- Za sada se električna energija ne može akumulirati u značajnijim količinama, pa je nužan trenutni balans potrošnja/proizvodnja.
- Električna energija je homogena na nivou svih povezanih EES-a, pa ne postoji način da se (egzaktno) razdvoji i „označi” ko je proizveo/potrošio koji kWh.
- Električna energija se prenosi i koristi kroz spregnutu interkonektivnu mrežu u kojoj svi učesnici svojim aktivnostima utiču na sve ostale učesnike.

Spoznavši ove „nove” činjenice, i time shvativši ograničenost mogućnosti prenosa preko interkonektovane mreže, projektanti tržišta su prihvatili ne-

minovnost suočavanja sa problemima u prenosu, pa su došli do zaključka da u funkcionisanje tržišta treba uneti još jednu promenljivu, a to je dozvoljeni nivo prenosa na pojedinim pravcima. Ta veličina se naslanjala na do tada uveliko korišćenu metodologiju određivanja prenosnog (tranzitnog) puta, a trebalo je da na potencijalno zagušenim pravcima razmena električne energije odredi limite u prenosu, koji bi se poštovali u radu tržišta. Neto prenosni kapacitet (NTC - Net Transfer Capacity) [3–9] je maksimalni program razmene koji može da se ostvari između dva susedna sistema bez ugrožavanja kriterijuma sigurnosti. Svedoci smo da su se poslednjih nekoliko godina razvile sofisticirane metode proračuna NTC-a, te da se ta veličina koristi kod većine metoda upravljanja zagušenjima u Evropi.

Dakle, jedinstvena bakarna ploča kao početna ideja je podeljena na manje zone, povezane provodnim kanalima tačno definisanog „preseka” odnosno NTC-a. Ovakav pristup je svakako bliži realnosti od prethodno zamišljenog, međutim, sve navedene specifičnosti električne energije ovim nisu ispoštovane. Teško je nešto tako kompleksno kao što je rad i sigurnost elektroenergetskog sistema, obuhvatiti jednom cifrom, ma kako „precizno” računatom.

Dalje, električna energija ima osobinu da prolazi prenosnim putem najmanje električne otpornosti, koja je uslovljena konfiguracijom prenosne mreže, a ne dogovorenim putevima prenosa između proizvođača i potrošača, koji često u praksi odstupaju od stvarnih fizičkih puteva prenosa. U uslovima velike međupovezanosti većine sistema u evropskoj interkonekciji, upotreba NTC-a kod metoda alokacije kapaciteta često ne dovodi do željenog cilja, tj. otklanjanja zagušenja u prenosnoj mreži, jer se često dešava da energija „zaobiđe” dogovorene prenosne puteve, a na nekim drugim putevima stvara zagušenja.

Sve ovo, od projekatnata evropskog tržišta električne energije iziskuje dodatne napore u pronalaženju metoda alokacije prenosnih kapaciteta koje bolje prate ponašanje električne energije, odnosno koje bi pratile njene stvarne tokove. Prvi problem je gore pomenuta nemogućnost preciznog „bojenja” puteva energije i međupovezanost svih učesnika. Međutim, postoje analitičke metode kojima bi se dovoljno tačno mogli ispratiti uticaji pojedinačnih aranžmana razmene energije na elemente prenosnog sistema, tako da je taj problem rešiv. Mnogo veći problem predstavlja otpor ekonomskih i organizacionih subjekata na tržištu, prema metodama koje su mnogo komplikovanije za primenu, a samim tim i manje transparentne za učesnike.

Verovatno je taj sukob tehnike i ekonomije/organizacije razlog što npr. ETSO metoda koordinisane aukcije, kao nadgradnja prethodno razvijenih i

uveliko korišćenih metoda alokacije kapaciteta zasnovanih na NTC-u, iako objavljena 2001. godine, još uvek predstavlja uglavnom teoretski pokušaj pronalazjenja metode koja će bolje uvažiti međupovezanost učesnika.

### 3. PREGLED POSTOJEĆIH ETSO METODA ZA ELIMINACIJU ZAGUŠENJA U VISOKONAPONSKOJ MREŽI

Kada se razgovara o primeni mehanizma upravljanja zagušenjima na vremenskom horizontu od najavljanja transakcije dan unapred pa do realizacije transakcije, kao vremenski redosled za globalni proces upravljanja zagušenjima najčešće se pominje primena trostepenog procesa opisanog u ETSO dokumentu [10]:

1. Alokacija prenosnih kapaciteta - uobičajeno najkasnije tokom jutra prethodnog dana u odnosu na dan za koji se planira. Tokom tog koraka, TSO procenjuju raspoložive kapacitete između oblasti i primenjuju alokacione mehanizme kada zahtevi za prenosom od strane učesnika na tržištu prekorace prenosne kapacitete.
2. Prognoza zagušenja (DACF - Day Ahead Congestion Forecast) - po podne tokom prethodnog dana. Precizno su poznate potrošnje-proizvodnje po čvorovima, tako da se proračunavaju tokovi snaga, kojima se određuju ranije neotkrivena mesta zagušenja u mreži.
3. Otklanjanje zagušenja u realnom vremenu - realno vreme. Kada se tokom odvijanja operativnog pogona sistema u realnom vremenu ipak pojavi neko zagušenje, kao nužnost se javlja potreba za brzom primenom mehanizama za eliminaciju zagušenja, pre nego što ono dovede do ugrožavanja sigurnosti rada.

Shodno ovom trostepenom procesu, odvija se i razvoj pojedinih modula procesa otklanjanja zagušenja u Evropi [11]. Pri tome se često kao pojam upravljanja zagušenjima u užem smislu, odnosno na planerskom nivou dan unapred, podrazumeva prvi korak gore opisanog procesa, odnosno alokacija kapaciteta dan unapred.

U okviru ETSO, razvijeno je nekoliko osnovnih metoda za rešavanje zagušenja u prenosnoj mreži [10]. Sve ove metode treba da osiguraju efikasno korišćenje prenosnih kapaciteta, da daju odgovarajuće ekonomske signale učesnicima na tržištu i da ne zavise od načina organizacije tržišta. Generalno gledano, sve predložene metode treba da zadovolje sledeće kriterijume:

– jednakost i nediskriminatorni pristup (za istu uslugu, dva korisnika treba da plate istu cenu i treba da budu podjednako tretirani),

- ekonomska efikasnost (odgovarajućim ekonomskim podsticajima obezbediti takvo ponašanje proizvođača, potrošača i operatora sistema koje vodi do najefikasnijeg rada čitavog sistema),
- transparentni i nedvosmisleni pristup (metoda i njena primena treba da bude jasna svakom učesniku i treba da bude onemogućeno višeznačno tumačenje u praksi),
- ostvarljivost (upravljanje zagušenjima mora uvek da bude tehnički izvodljivo, jer je to glavni preduslov za sigurnost i pouzdanost rada prenosnog sistema i interkonekcije u celini),
- usklađene sa različitim načinima organizovanja tržišta i ugovora (ponude na spot tržištu ili u realnom vremenu, kratkoročni bilateralni ugovori, dugoročni bilateralni ugovori i dr.).

Da bi se postigla ekonomska efikasnost, izabrana metoda mora da obezbedi podsticaj TSO da povećaju prenosne kapacitete bilo korišćenjem različitih mehanizama za povećanje mogućnosti trgovine ili investiranjem u novu opremu i/ili interkonektivne dalekovode.

#### 3.1. Klasifikacija metoda

Danas postoji značajan broj metoda alokacije kapaciteta koje se u praksi primenjuju ili se teorijski razrađuju i koje se međusobno razlikuju. U nekim slučajevima, prisutne su i kombinacije osnovnih metoda na pojedinim tržištima.

Potrebno je spomenuti da, što se zapadne Evrope tiče, na pojedinim granicama još uvek postoje mehanizmi alokacije kapaciteta kao u doba pre liberalizacije, što predstavlja svojevrsan, primitivni, „nulti” metod alokacije. Jedan od najzastupljenijih metoda je metod *rezervisanja* interkonektivnih kapaciteta, gde su kapaciteti rezervisani kao za vertikalno integrisanu kompaniju. Ovaj metod danas primenjuju švajcarske kompanije, a takođe je u upotrebi za većinu dugoročnih ugovora zaključenih pre početka liberalizacije, npr. između Francuske/Švajcarske/Austrije ka Italiji, između Nemačke/Francuske ka Holandiji, te na francusko-španskoj granici.

Novе metode dodele kapaciteta proistekle iz procesa liberalizacije, te time manje ili više tržišno orijentisane, moguće je razvrstati na nekoliko načina, a s obzirom na novija evropska iskustva, neformalno bi se mogle podeliti na:

1. Metode ograničavanja iznosa transakcija zasnovane na javno objavljenom NTC:

- a) Princip prve prijave („first come-first served”)
- b) Proporcionalno smanjivanje transakcija („pro-rata”)
- c) Eksplisitne aukcije (trguje se prenosnim pravom između dve susedne oblasti)

d) Implicitne aukcije (istovremena trgovina energijom i prenosnim kapacitetom)

#### 2. Metoda razdvajanja/spajanja tržišta

Prethodne metode se smatraju kao osnovne, pri čemu se kao tržišno orijentisane metode smatraju eksplicitne aukcije, implicitne aukcije i razdvajanje/spajanje tržišta.

Osim pomenutih osnovnih metoda, kao dodatne metode postoje i:

#### 3. Redispečing, u dva osnovna oblika:

- a) Interni redispečing
- b) Koordinisani prekogranični redispečing (uz neke izmene koje se tiču cena poznat i kao kontra-trgovanje)

I na kraju, kao nova metoda, za sada u Evropi uglavnom razrađivana kao teoretska mogućnost, s tim da o njenoj primeni počinje ozbiljno da se razmišlja u nekim regionima Evrope, je:

#### 4. Koordinisana aukcija

### 3.2. Opšti principi

Postoji nekoliko opštih principa koje metode za upravljanje zagušenjima treba da zadovolje:

1. TSO treba da bude u potpunosti nezavisan od svih aktera na tržištu (proizvođača, distributera, prodavaca i krajnjih korisnika).
2. Međusobno, TSO nisu u konkurenciji i oni treba da imaju blisku saradnju, svakodnevnu komunikaciju i jasne i efikasne mehanizme za obimnu razmenu podataka.
3. Organizacija tržišta je različita u pojedinim delovima Evrope, tako da neke od zemalja imaju berzu električne energije (Španija, skandinavske zemlje), neke su organizovane kao Pool, a neke su bazirane na bilateralnom tržištu (Nemačka, Francuska). Ipak, nezavisno od načina organizacije tržišta sve zemlje moraju imati blisku saradnju koja je osnovni preduslov za razmenu električne energije. Važno je napomenuti da ne mora da se primenjuje samo jedno rešenje zagušenja u okviru jedne oblasti/zemlje. Kombinacija različitih metoda može ponekad da pruži najbolje rešenje (na primer, u skandinavskim zemljama je u primeni kombinacija razdvajanja tržišta kod planiranja dan unapred sa kontra-trgovanjem u operativnoj fazi).
4. Metode za upravljanje zagušenjima moraju biti primenljive u operativnoj praksi. Nekada se dešava da predložena rešenja nisu uvek i ostvarljiva što uglavnom zavisi od strukture samog tržišta. Zbog toga treba izabrati ono rešenje, koje može da bude i kombinacija raznih metoda, a koje se može lako i efikasno primeniti (to je naročito važno u početnim fazama primene metoda za reša-

vanje zagušenja u prenosnoj mreži kada je poželjno primeniti jednostavnije metode koje zahtevaju manji obim harmonizacije i razmene informacija).

5. U rešavanju problema zagušenja treba da učestvuju i učesnici na tržištu a ne samo TSO. Učesnici na tržištu treba da dobiju adekvatne ekonomske podsticaje za realizaciju takvih transakcija pri kojima se povećanjem prenosa električne energije ne ugrožava sigurnost snabdevanja. Ovo podrazumeva da TSO blagovremeno dobije informacije o lokaciji, iznosu, vremenu i trajanju svake transakcije. Svi učesnici na tržištu, pored osnovnog cilja za povećanjem ekonomske dobiti, treba da rade na očuvanju sigurnosti prenosne mreže.
6. Nakon poremećaja u mreži UCTE (Belgija 1997. i 1999, Italija 2003) koji su između ostalog i posledica nekoordinacije tržišnih zahteva sa fizičkim mogućnostima prenosne mreže, postalo je jasno da treba odustati od metoda koje tretiraju ugovorene prenosne puteve i definitivno se mora okrenuti operativnim stanjima u elektroenergetskoj mreži i fizičkim prenosnim putevima, jer se samo tako mogu uzeti u obzir realni tokovi snaga i postojeća ograničenja.
7. TSO je zadužen za realizaciju i jedini ima pravo da (ne) prihvati prekograničnu razmenu najavljenom od strane nekog od učesnika na tržištu. U slučaju kontinentalne Evrope, gde su mreže složene, ove razmene mogu imati značajan uticaj na fizičke tokove između drugih oblasti. U tom slučaju zagušenje se ne može rešavati na bilateralnoj osnovi između dva TSO, već se mora sprovesti koordinirana procedura među svim uključenim TSO, što može da ima za posledicu odbijanje onih transakcija koje izazivaju preopterećenja i u nekoj trećoj oblasti.
8. Za trgovce je poželjno da se naknade za usluge tranzita (tokom primene CBT metodologije) ne baziraju na transakcijama. Naknade za upravljanje zagušenjima mogu da se baziraju na transakcijama, kada zahtevi za korišćenjem prevazilaze realne mogućnosti.
9. Posebnu pažnju treba posvetiti realizaciji postojećih dugoročnih ugovora, imajući u vidu da je opšti trend u Evropi da se dugoročni ugovori polako eliminišu.
10. Veoma je važno da rezervacija prenosnog kapaciteta koju je izvršio neki učesnik na tržištu za naredni dan bude potvrđena od strane tog učesnika, kako bi u slučaju odustajanja od iste taj prenosni kapacitet bio stavljen na raspolaganje ostalim zainteresovanim učesnicima.

Ove opšte principe koje treba da zadovolji svaka od metoda za upravljanje zagušenjima nije uvek lako primeniti u stvarnoj operativnoj praksi. Do sada razvijene metode više ili manje slede ove principe, a uspešnost njihovog ispunjenja je prikazana u tabeli sa uporednim pregledom do sada razvijenih metoda za alokaciju prenosnih kapaciteta.

### 3.3. Metode ograničavanja iznosa transakcija zasnovane na javno objavljenom kapacitetu prenosa NTC

Rad pojedinog elektroenergetskog sistema i interkonekcije u celini zahteva razmenu velikog broja informacija o planovima rada proizvodnje i nivou potrošnje u okviru svake oblasti/zemlje (vozni redovi), kao i informacije o realizaciji i programima razmene električne energije između njih (ovi podaci se odnose na realno vreme i za naredni dan). Bez tih informacija, TSO nisu u mogućnosti da obaveste učesnike na tržištu o (ne)sigurnosti i mogućim ograničenjima i da eliminišu ta ograničenja primenjujući odgovarajuće mere upravljanja zagušenjima.

Iz tih razloga, preporučuje se nekoliko nivoa razmena informacija između učesnika na tržištu. Objavljivanje NTC kojim se određuje nivo kapaciteta razmene između dve oblasti, jedan je od zahteva koji predstavlja minimum informacija neophodan učesnicima na tržištu, da bi sagledali mogućnosti realizovanja različitih transakcija.

NTC predstavlja procenjenu vrednost razmene između dve oblasti, respektujući ograničenja za fizički prenos električne energije. NTC je definisan kao razlika totalnog prenosnog kapaciteta (TTC - Total Transfer Capacity) i margine sigurnosti (TRM - Transmission Reliability Margin).

$$NTC = TTC - TRM$$

Bez obzira na metod koji se primenjuje za upravljanje zagušenjima, NTC na granici između dva TSO (u nekim slučajevima i više) se prepoznaje kao praktični indikator mogućnosti trgovine na nekom vremenskom horizontu. NTC usvojen od strane TSO je javna informacija koja mora slobodno i periodično da se objavljuje na tržištu i ona omogućava učesnicima na tržištu da sagledaju mogućnosti trgovanja u okviru prenosne mreže cele Evrope. To ponovo zahteva blisku saradnju TSO, imajući u vidu da procena NTC-a nije jednostavna i da je na kraju neophodna harmonizacija ovih vrednosti.

NTC vrednosti sadrže u sebi statističku neizvesnost i zavise od mnogih faktora kao što su razmena električne energije u različitim pravcima, plan angažovanja proizvodnih kapaciteta, očekivani nivo potrošnje, stanje prenosne mreže i dr. Na kraju, jasno je da

proračun NTC-a zahteva razmenu informacija između TSO i učesnika na tržištu, kao i među samim TSO.

Kada je zahtev za prenos određenim kapacitetima ispod nivoa vrednosti NTC-a, ne pojavljuju se dodatni troškovi prenosa i samim tim se ne aktivira mehanizam za raspodelu troškova, odnosno prenosni kapaciteti se besplatno koriste od strane učesnika na tržištu („No congestion-no payment”). U suprotnom slučaju, kada su zahtevi za korišćenjem određenog prenosnog kapaciteta iznad proračunate vrednosti NTC-a, potrebno je imati neki algoritam po kome će se odrediti prioritet za korišćenje prenosnog kapaciteta do vrednosti NTC-a. Pošto su vrednosti za NTC publikovane i javne, učesnici na tržištu dostavljaju svoje zahteve TSO za korišćenje istih i transakcije koje prouzrokuju preopterećenja se odbijaju u skladu sa unapred definisanim pravilima prioriteta.

Mehanizmi za odbijanje transakcija u slučaju da su zahtevi za prenosnim kapacitetima iznad proračunate vrednosti NTC-a, u okviru ove metode su slični kao i kod metoda redispečinga ili koordinisanog prekograničnog redispečinga.

Najveći nedostatak ovakvog pristupa je nemogućnost procene tačnijih vrednosti NTC-a. Publikovanje obavezujućih vrednosti NTC-a za naredni dan je veoma teško zbog potrebe za visokom koordinacijom između TSO, nedostatka informacija usled dinamičnih promena u prenosnoj mreži, velikog uticaja kružnih tokova snaga, neizvesnosti usled ispada proizvodnih jedinica ili elemenata mreže. Zbog svih ovih razloga, učesnici na tržištu treba da uključe u svoje transakcije i rizik njihovog smanjenja usled nedovoljnih kapaciteta. Ovim se otvara pitanje „čvrstog” pristupa mreži, jer neki od učesnika žele da imaju pouzdan pristup garantovan od strane TSO, što nije u skladu sa nekim metodama „odsecanja”, kao ni sa nekim drugim metodama za upravljanje zagušenjima.

#### 3.3.1. Princip prve prijave („first come-first served”)

Princip prve prijave je jednostavan mehanizam koji je baziran na redosledu rezervacija za prenosni kapacitet. Svaka prethodna rezervacija ima prioritet u odnosu na narednu i kada se dostigne vrednost NTC-a, TSO prestaje da prima zahteve za prenosnim kapacitetom. Rezervacije se potvrđuju dan ranije i bilo kakva promena plana se mora proslediti TSO, a promene u poslednjem trenutku se mogu čak i penalizovati. Ovaj mehanizam podstiče učesnike na dugoročno planiranje, što ima za posledicu preciznije informisanje TSO o ukupnim količinama električne energije koja će se razmenjivati.

Nedostatak ovog mehanizma je da u nekim slučajevima ne ostavlja dovoljno vremena za rad tržišta

u realnom vremenu što smanjuje dinamiku funkcionisanja tržišta. Takođe, dugoročno rezervisanje prenosnih kapaciteta dovodi do blokiranja tržišta i ne dozvoljava novim učesnicima da dobiju deo kapaciteta. Da bi se ovi nedostaci eliminisali, primenjuju se razne mere plaćanja penala za učesnike koji ne iskoriste rezervisane kapacitete, kao i odvajanje dela kapaciteta za kratkoročno tržište, te primena principa „uzmi ili ostavi” (use it or lose it). Mehanizam je pogodan za bilateralnu organizaciju tržišta (ugovori), ali ne može efikasno da funkcioniše na tržištu za naredni dan ili na tržištu realnog vremena koje je bazirano na berzi električne energije, jer se na ovim tržištima zahtevi za prenosnim uslugama podnose istovremeno od strane raznih potencijalnih korisnika, neposredno pred zatvaranje tržišta.

Ovaj metod se primenjuje na francusko-nemačkoj i francusko-belgijskoj granici.

### 3.3.2. Proporcionalno smanjivanje transakcija („pro-rata”)

Za razliku od prethodnog principa, u okviru ove metode svi učesnici na tržištu potražuju prenosna prava na određenoj granici, a u slučaju da ukupan zahtevani kapacitet premašuje iznos raspoloživog kapaciteta, sva potraživanja se proporcionalno umanjuju, dok se ne dostigne iznos raspoloživog kapaciteta. U okviru ovog mehanizma ne formira se lista prioriteta. Sve transakcije se realizuju, a TSO ih smanjuje ukoliko se dogodi zagušenje po principu odnosa raspoloživog i zahtevanog kapaciteta. Mehanizam je jasan za sve učesnike, ali vodi ka neefikasnoj upotrebi prenosnih kapaciteta i ne postoji podsticaj ni prema TSO ni prema učesnicima da se smanji zagušenje. U nedostatku regulatornih mehanizama, ovaj mehanizam može da vodi ka špekulacijama kod zauzimanja kapaciteta, odnosno pojedini učesnik može povećati svoj udeo u ukupnom zbiru potraživanja tražeći veći kapacitet nego što mu je potreban i time na kraju dobiti veći udeo u raspodeli raspoloživog kapaciteta. Bilateralne transakcije se samo delom mogu opslužiti što ima za posledicu potrebu za povećanjem iznosa finansijskog osiguranja transakcije.

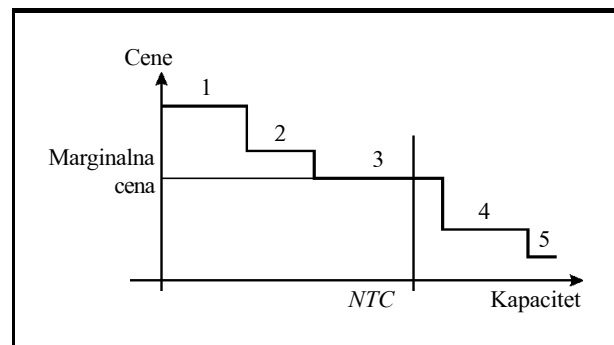
Primer ovoga metoda imamo na slovenačko-austrijskoj granici, na granici Italije i njenih suseda, a shodno razvoju tržišta i potrebi za više tržišno orijentisanim metodama, u budućnosti treba da se zameni nekom od narednih metoda.

### 3.3.3. Eksplicitne aukcije

Aukcije su osnovni mehanizam koji se koristi u okviru nekoliko metoda za upravljanje zagušenjima.

TSO proračunava i objavljuje NTC, a učesnik na tržištu nudi svoju cenu za korišćenje NTC-a. U narednom koraku, ponude svih učesnika se sakupljaju, rangiraju respektujući kriterijum ponude sa većom cenom sve dotle dok se NTC kompletno ne iskoristi (slika 1).

Aukcije se mogu izvoditi na godišnjem, mesečnom, nedeljnom i dnevnom nivou. U okviru ovog mehanizma, odvojeno se trguje kapacitetom i električnom energijom.



Slika 1. Rangiranje ponuda za zakup prenosnog kapaciteta i određivanje marginalne cene

Osnovni problem je u uspostavljanju efikasnog mehanizma za adekvatno naplaćivanje korišćenog prenosnog kapaciteta. Postoji nekoliko metoda za određivanje cene poravnanja i raspodelu vrednosti kapaciteta:

- Svako plaća onoliko koliko je ponudio za pravo prenosa (pay as bid)
- Određuje se marginalna cena tako što cena ponude koja je „poslednja” ušla u trku, odnosno najniža cena među prihvaćenim transakcijama, postaje marginalna cena koju plaćaju svi učesnici čije su ponude prihvaćene (marginal pricing)

Kada se iskoristi kompletna vrednost NTC, proces se zaustavlja. U nekim slučajevima u cilju povećanja prenosnih mogućnosti radi se redispetching, i u skladu sa nivoom marginalne cene proces se nastavlja u okviru dodatnih mogućnosti trgovine.

I kod ove metode važi princip „uzmi ili ostavi” (use it or lose it), odnosno neiskorišćen alocirani kapacitet se dodeljuje drugim učesnicima (narednim na listi ponuda).

Metod aukcija je efikasan i nediskriminatoran što se tiče nadmetanja i on odražava prave vrednosti tržišta i dozvoljava TSO da upravljaju zagušenjima bez objavljivanja bilo koje informacije o fizičkim tokovima izuzev proračunatog NTC-a. Takođe, metod omogućava obuhvatanje i dugoročnih ugovora zajedno sa kratkoročnim ugovorima i ugovorima sa spot tržišta. Aukcije povećavaju rizik u prenosu pri realizaciji srednjeročnih i dugoročnih bilateralnih ugovora, jer nema garancije da će oni biti prihvaćeni svakog dana.

Kao i druge metode, aukcije se dodatno usložnjavaju kad jedna transakcija uzrokuje više odvojenih zagušenja ili kada je velik uticaj kružnih tokova snaga. U takvim slučajevima, korisnici prenosnog kapaciteta treba da naprave odvojene ponude za svaku bilateralnu ili multilateralnu transakciju, a razvijene metode treba da razreše takve slučajeve. Ovo takođe zahteva i blisku saradnju između TSO koji su uključeni u realizaciju ovakve transakcije.

Aukcije bazirane na objavljenim NTC-ovima nemaju za cilj da obezbede sve troškove za održavanje i rad interkonektivnih dalekovoda, u slučaju da se ovi troškovi pokrivaju preko tarifa prenosa i naknada za pristup i korišćenje mreže. Pravila i propisi u okviru država treba da reše način raspodele sredstava dobijenih od aukcija tako da se uputi jasan signal za razvoj interkonektivne mreže.

Primenom ovog metoda, TSO obezbeđuje prihod naplatom prenosnih kapaciteta učesnicima aukcije samo u slučajevima kada postoji interes za kapacitetom koji je veći od ponuđenog kapaciteta, odnosno ako je potreba iznad vrednosti NTC-a. U obrnutom slučaju, ako su potrebe za prenosnim kapacitetima manje od vrednosti NTC-a važi princip „nema zagušenja-nema plaćanja”.

Iako u postojećoj praksi aukcije ne obezbeđuju odgovarajuće podsticaje TSO da povećaju svoje prenosne kapacitete, teorijski je moguće obezbediti takav mehanizam.

Ovaj metod je u upotrebi na nemačko/belgijskoj granici ka Holandiji (koordinisano), na francusko-britanskom DC kablju, na češko-austrijskoj granici, te na dansko-nemačkoj granici.

### 3.3.4. Implicitne aukcije

Osnovna karakteristika ove metode je što se preko jedinstvenog ugovora istovremeno trguje i kapaci-

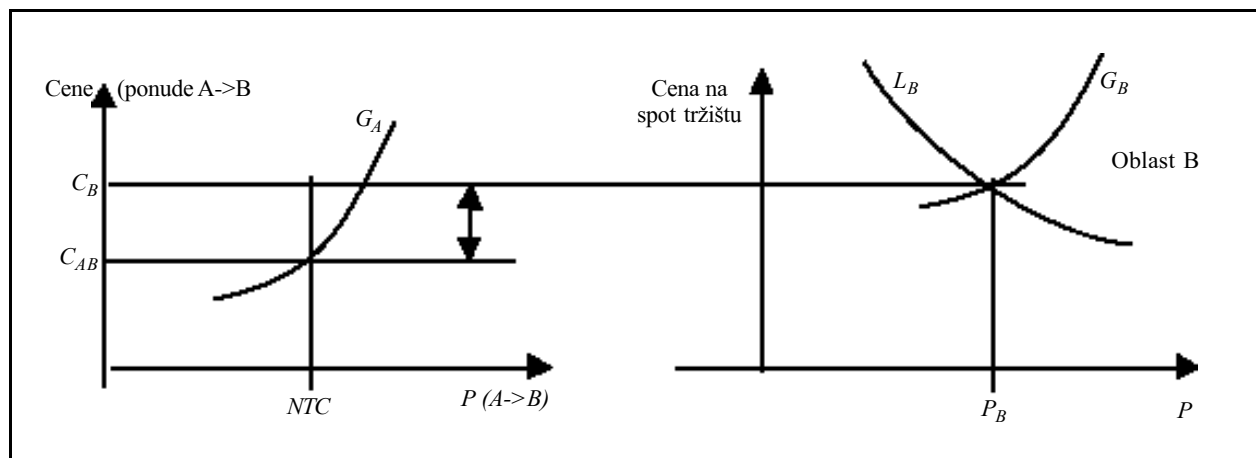
tetom i električnom energijom, a to je i osnovna razlika u odnosu na eksplicitne aukcije. Drugim rečima, prenosni kapacitet se među učesnicima alokira „implicitno”, na osnovu ponuđene cene električne energije.

Alokacija kapaciteta se zasniva na ponudama snabdevača (proizvođača, trgovaca) sa jedne strane granice (npr. TSO A), koje se rangiraju na spot tržištu koje se nalazi sa druge strane granice (npr. TSO B), za potrebe potraživanja lokalnih potrošača u TSO-u B. NTC se dodeljuje snabdevačima iz A rangiranjem njihovih ponuda jedinstvene cene za zakup kapaciteta i za električnu energiju od najmanje ka najvećoj, dok se kompletno ne alokira. Potrebno je naglasiti da berza učesnicima koji su „prošli” na aukciji ne isplaćuje cenu  $C_B$  formiranu na osnovu ponude i potražnje u B, nego cenu  $C_{AB}$  koja je u stvari cena poslednje prihvaćene transakcije (dakle najveća među cenama prihvaćenih transakcija). Moguća razlika u ceni između ovako formirane marginalne cene i cene koja se formira na preseku ponuda lokalnih snabdevača u B i potražnje u B, predstavlja profit za TSO:  $(C_B - C_{AB}) * NTC$ , kao posledica njegovih brokerskih aktivnosti.

Na slici 2, kriva  $G_A$  predstavlja ponude snabdevača iz A rangirane po ceni (od najmanje ka najvećoj), dok  $G_B$  i  $L_B$  predstavljaju krive ponude snabdevača i potražnje potrošača u B, respektivno.

Preduslov za implicitne aukcije je postojanje najmanje jedne berze električne energije u oblasti koja uvozi. Ova metoda je veoma tržišno orijentisana, nediskriminatorna za učesnike i vrlo efikasna, osim u slučajevima, već pomenutim kod eksplicitnih aukcija, kada postoje značajni kružni tokovi snaga na regionalnom nivou. Osim toga, ni ova metoda generalno ne obezbeđuje podsticaj TSO za povećanjem raspoloživog kapaciteta.

Varijanta ove metode primenjuje se na portugalsko-španskoj granici.



Slika 2. Formiranje cene na spot tržištu putem metode implicitnih aukcija

### 3.4. Metod razdvajanja/spajanja tržišta (Market splitting)

Metoda razdvajanja/spajanja tržišta predstavlja svojevrstnu nadgradnju metode implicitne aukcije [12, 13]. Ova je metoda zasnovana na postojanju ili berze električne energije u svakoj od oblasti/zona uključenoj u ovakav vid alokacije, ili jedinstvene berze nadležne za sve oblasti/zona, a taj primer organizovanja tržišta imamo u skandinavskim zemljama. Značajno je napomenuti da se u slučaju primene ove metode električna energija izvan vlastitog sistema može nabaviti samo preko berze. Druga osobina ove metode je podela tržišta na jasno definisane geografske zone (grupe zemalja, zemlje ili još manje jedinice), među kojima se proračunski definišu raspoloživi kapaciteti na isti način kako se određuje i NTC.

Proces alokacije za dan unapred se odvija u nekoliko koraka, koje ćemo grafički prikazati na pojednostavljenom primeru primene razdvajanja tržišta sa dve zone (slika 3).

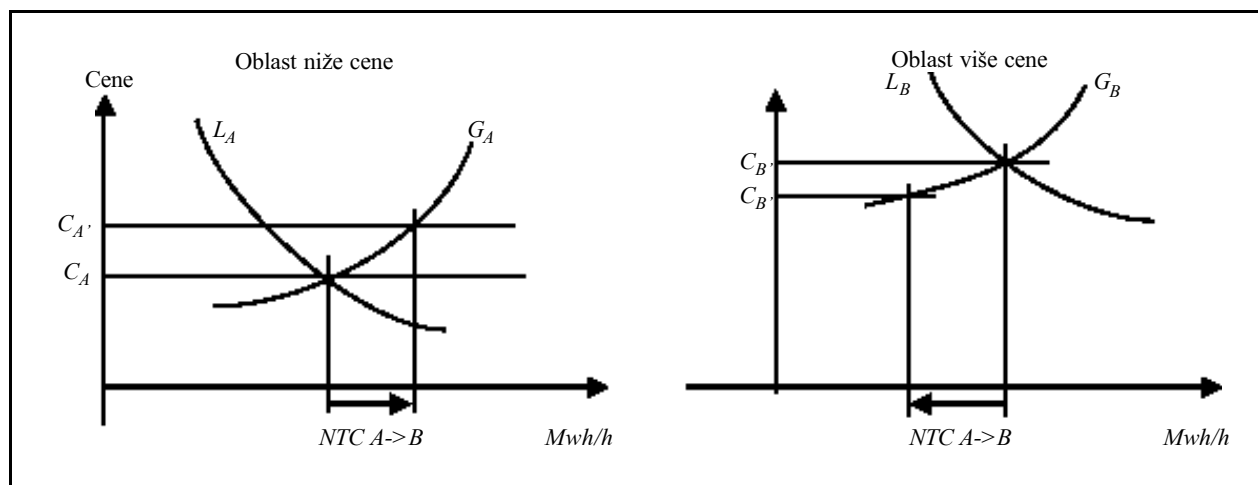
1. Nakon prikupljanja svih ponuda i potraživanja formira se jedinstvena cena na nivou čitavog tržišta. Tada TSO proračunava tokove snaga i identifikuje zagušenja na dalekovodima. Za ove proračune se koriste isti podaci potrebni i za proračun NTC-a. Ukoliko proračuni pokazuju da je raspored proizvodnje i potrošnje takav da nijedno usko grlo nije zagušeno, odnosno da nije premašen ni jedan NTC, na tržištu će važiti ova jedinstvena cena.
2. Ukoliko međutim proračun otkrije zagušenje na nekom uskom grlu, tržišta u pojedinim zonama se *razdvajaju*, odnosno formiraju se odvojene cene za svaku zonu odvojene uskim grlima (u našem primeru za dve zone). Te cene se formiraju neza-

visno, odnosno u ovom drugom koraku cena u pojedinoj zoni se formira na preseku krivih lokalne ponude i potražnje, kao da nema mogućnosti nabavke iz nekog od spoljnih sistema/zona. Ovo podrazumeva da u svakoj zoni postoji dovoljno ponuđenog kapaciteta da pokrije spostvene potrebe. Tržišni mehanizmi će neminovno usloviti da se u zoni sa viškovima (potencijalnom izvozniku) formira niža cena ( $C_A$ ), a u zoni sa manjkovima (potencijalnom uvozniku) formira viša cena ( $C_B$ ) električne energije. Takođe, redovno je zona sa nižom cenom „uzvodno” od zagušenja, a zona sa višom cenom „nizvodno” od zagušenja.

3. Nakon ovakvog formiranja nezavisnih cena, „otvori” se mogućnost trgovine sa drugom oblasti *do nivoa raspoloživog NTC-a*. Za generatore u oblasti niže cene (A) se otvara mogućnost izvoza u oblast više cene (B), što dovodi do porasta cene u A, sa  $C_A$  na  $C_{A'}$ . Istovremeno, generatori u B dobijaju „konkurenciju” u vidu uvoza iz A u visini NTC-a, tako da cena u B pada sa  $C_B$  na  $C_{B'}$ . Prihod TSO-a u ovom slučaju je:  $NTC^*(C_{B'} - C_{A'})$ .

Ovaj metod za upravljanje zagušenjima se uglavnom uspešno primenjuje u zemljama NORDEL-a već desetak godina (Norveška, Švedska, Finska i zapadna Danska) [14], gde postoji jedinstvena berza, odnosno firma Nordpool. Takođe, primenjuje se u Kaliforniji.

U ovoj metodi, relaksacija zagušenja zavisi delimično od ponuda na tržištu koje se zasnivaju na krivama prodaja-cena i kupovina-cena. Trgovina će se održavati ako cena u odgovarajućoj oblasti obezbeđuje profit za učesnike na tržištu. Koncept razdvajanja tržišta podstiče trgovinu sve dok učesnici na tržištu dobijaju unapred informacije o verovatnoći nastanka zagušenja između oblasti.



Slika 3. Formiranje cene na spot tržištu putem metode razdvajanja/spajanja tržišta



Prednost metode razdvajanja tržišta je što potrošači mogu da reaguju na cenu u oblasti koja ima zagušenja, tako što će zameniti jednu vrstu energije drugom. Nove generatorske jedinice mogu da se uključe u okviru zona koje imaju deficit energije i tako da utiču na visoku cenu čime povećavaju konkurenciju i utiču na njeno sniženje.

Sledeća prednost ove metode je u tome što je cenovni signal dostupan svim učesnicima na tržištu, naročito generatorima koji mogu zasnivati svoju proizvodnju na ovom signalu. U tom slučaju svi generatori sa marginalnim troškovima nižim od tržišne cene će proizvoditi, dok će ostali zaustaviti svoj rad.

Osnovni problemi ove metode kao kandidata za tržište kontinentalne Evrope, pa i regiona jugoistočne Evrope je pitanje njene izvodljivosti i efikasnosti na velikom sistemu kao što je UCTE interkonekcija. Metod se najbolje implementira u slučaju da postoji jedinstvena organizacija tržišta (jedna berza električne energije) na obe strane zagušenja, što je teško očekivati na današnjem nivou razvoja evropskih tržišta, sa toliko već postojećih raznolikosti.

Takođe, pozitivna skandinavska iskustva ne mogu da budu vodilja za kontinentalnu Evropu u pogledu primene ove metode, zbog značajnih raznolikosti ovih interkonekcija u tehničkom smislu. Naime, kao i prethodno opisane metode, i metod razdvajanja tržišta se zasniva na postojanju fiksnih zona sa jasno definisanim uskim grlima među njima, za koje se manje-više nedvosmisleno može proračunati NTC. To je primenljivo u slučaju Skandinavije, gde su te zone pretežno radijalno, takoreći „lančano” raspoređene, a NTC između njih su u velikoj meri međusobno nezavisni (postoji 6-8 definisanih oblasti). Sa druge strane, interkonekcija UCTE je mnogo složenija po strukturi, sa mnogo većim nivoom međuzavisnosti tokova snaga na interkonektivnim dalekovodima, odnosno mnogo većim prisustvom kružnih tokova snaga, gde je gotovo nemoguće definisati raspregnute i nezavisne NTC između pojedinih oblasti.

### 3.5. Redispečing

#### 3.5.1. Interni redispečing

Kada transakcije pređu vrednost NTC, zahteva se umanjeње transakcija električne energije. U tom slučaju, redispečing proizvodnje u okviru oblasti sa internim zagušenjima može da pomogne da se oslobodi deo zagušenja. Da bi se realizovao redispečing, TSO mora da ima informacije o cenama da bi mogao da utiče na podizanje i spuštanje proizvodnje generatorskih jedinica. Generalno, redispečing uzrokuje dodatne troškove za TSO, a ti dodatni troškovi

mogu biti preneseni na tržišne učesnike odgovorne za nastanak zagušenja u skladu sa njihovim doprinosom tom zagušenju (ekonomski signal). Drugi način pokrivanja troškova redispečinga je da se ovi dodatni troškovi raspodeljuju na sve trgovce. Međutim, to može prouzrokovati dodatne probleme u zagušenju zbog nedostatka adekvatnog cenovnog signala.

Tokom primene ove metode, poželjno je da TSO izračunaju i objavljuju unapred neobavezujuće vrednosti troškova zagušenja zajedno sa vrednostima NTC na svakoj granici, što usložnjava ceo proces jer ove informacije zahtevaju više podataka od učesnika na tržištu nego proračun procene NTC.

Bazirano na fizičkim tokovima snaga, upravljanje zagušenjima preko internog redispečinga potencijalno pospešuje trgovinu u poređenju sa trgovinom koja se odnosi samo na respektovanje ograničenja prenosa do NTC granice. Redispečing dozvoljava povećanje trgovine ponovnom optimizacijom uprkos fizičkim granicama, sve dok ne nestane generatorskih mogućnosti za redispečing, tj. dok se ne dostigne LRP (Limit of Redispatching Possibility).

U skandinavskim zemljama, troškovi za redispečing tj. kontra-trgovanje kako oni to nazivaju se u prvom redu plaćaju od strane TSO koje oni obezbeđuju kroz tarifu za prenos. Drugim rečima, svi potrošači učestvuju u nadoknadi dela troškova za redispečing. Koristeći termin kontra-trgovanje oni žele da naglase da se promena planova angažovanja elektrana vrši na osnovu njihovih ponuđenih cena, a ne na osnovu marginalnih troškova proizvodnje.

Kao što je rečeno, troškovi redispečinga mogu se raspodeliti direktno odgovarajućim učesnicima na tržištu, da bi se očuvao ekonomski podsticaj. To znači da mehanizam prioriteta uvek dozvoljava rangiranje transakcija. Naravno, učesnici na tržištu treba da znaju potencijalne troškove redispečinga i moraju da imaju mogućnost, ili da izmene svoje planove ako smatraju da je trošak visok, ili da nastave sa transakcijom. Ako se troškovi redispečinga raspodeljuju na ovakav način, redispečing metod je nediskriminatoran za sve učesnike na tržištu. Dalje, izuzev u oblasti gde je dominantna tržišna organizacija, prednost objavljivanja ovih troškova zagušenja unapred je ta da svim učesnicima dozvoljava dobru preglednost stanja na tržištu i u potpunosti je u skladu sa njihovim analizama koje se odnose na osiguranje transakcija i upravljanje rizikom. Na drugoj strani, priprema krive troškova stvara značajne proračunske poteškoće za TSO i zahteva detaljno poznavanje dodatnih proizvodnih mogućnosti na različitim generatorskim jedinicama, uključujući odgovarajuću očekivanu cenu kada je dodatni generator raspoloživ, što je za TSO dodatni posao.

Metoda redispečinga ima prednosti u odnosu na ostale metode, ali ostaje ograničenje njenog korišćenja samo u okviru jedne oblasti sa njenim internim generatorima.

### 3.5.2. Koordinisani prekogranični redispečing

Princip metode koordinisanog prekograničnog redispečinga (CCR) je u proširenju oblasti redispečinga na nekoliko TSO-ova. U slučaju zagušenja, TSO koordinišu svoj redispečing i mogu se obratiti generatorima koji se nalaze izvan njihove kontrolne oblasti angažovanjem susednih TSO (onoliko dugo koliko su ti generatori u mogućnosti da sa svoje lokacije utiču na eliminisanje ograničenja u interkonekciji). Generatori koji su kandidati za redispečing mogu da predaju svoje ponude na posebnom delu tržišta posvećenom rešavanju problema redispečinga ili mogu potpisati dugoročni ugovor za rezervu sa svojim TSO.

Rešenje sa posebnim tržištem za eliminaciju zagušenja je transparentnije, ali ono može da omogućiti generatorima koji se nalaze „nizvodno” od uskog grla da ostvare veliki profit koristeći svoj položaj u sistemu i na tržištu. Rešenje sa dugoročnim ugovorima daje više garancije TSO-ovima, ali može postati komplikovano kada novi generatori sa nižim cenama energije uđu na tržište u oblasti koja uvozi ili u slučaju da je zagušenje oslobođeno usled razvoja mreže u okolnim zemljama.

Troškovi ovakvog redispečinga mogu da se raspodele na učesnike na tržištu u skladu sa njihovom odgovornošću za nastala zagušenja. Kao i kod metode internog redispečinga, korisnici moraju da imaju izbor između promene svog ponašanja ili plaćanja tržišne cene redispečinga.

Primena CCR metode nije profitni posao za TSO, već unapređeni servis organizovan od strane TSO da bi se obezbedila veća „prohodnost” na tržištu.

Ovaj metod zahteva pored tesne koordinacije između TSO i obezbeđenje poverljivosti informacija o ponuđenim cenama proizvodnje za generatore koji se nalaze u okviru susednih regulacionih oblasti, što je i glavni izazov ove metode.

CCR metod ima mnogo prednosti, od kojih je najznačajnija ta da omogućava lakšu trgovinu električnom energijom povećanjem „protočnosti” tržišta uz efikasniju eksploataciju EES-a. TSO ne kupuju potrebnu proizvodnju od tržišnih učesnika van svog sistema, već kada im je potrebna energija za redispečiranje oni je nabavljaju iz susednih sistema preko susednih TSO. Ova „protočnost” tržišta je moguća sve dok su obezbeđeni odgovarajući ekonomski signali za učesnike na tržištu. Ipak, dalje povećanje

mogućnosti trgovine je ograničeno adekvatnim proizvodnim resursima TSO.

U poređenju sa internim redispečingom, preko ovog metoda se značajno proširuje oblast redispečiranja, što daje veći izbor i veće ukupne količine energije i smanjuje troškove rešavanja zagušenja.

CCR metoda se može porediti sa metodom razdvajanja tržišta, jer obe metode pokušavaju da prevaziđu fizička ograničenja koja umanjuju trgovinu električnom energijom. Takođe, obe metode koriste prednosti angažovanja „nizvodnih” generatora. Principi ovih metoda su slični, ali razdvajanje tržišta zahteva jedinstvenu organizaciju tržišta cele interkonekcije, dok je CCR metoda bazirana na koordinaciji rada susednih TSO, što je kompatibilno sa bilo kojom internom organizacijom izabranom od strane država.

Efikasnost primene metode CCR zavisi od karakteristika i strukture samog EES-a i postoje dva načina na koja se može postupiti:

1. Ako dalekovod sa ograničenjima povezuje dve oblasti koje su jasno odvojene jedne od druge, tada je lako relaksirati nastalo zagušenje kroz koordinisani redispečing u skladu sa rangiranim cenama koje dostavljaju generatori,
2. Ako je mreža složena sa mnogo petlji, to uslošnjava problem, koji tada ne može biti lako rešen, već zahteva razvoj dodatnih pravila i procedura.

Kao i kod internog redispečinga, priprema kriva troškova zadaje složene proračunske i koordinacione zahteve TSO, kao i detaljne informacije o dodatnim generatorskim mogućnostima uključujući i očekivane cene.

Redispečing se primenjuje na francusko-španskoj granici. Takođe, metoda redispečinga se kombinuje sa metodom razdvajanja tržišta u skandinavskim zemljama (pod imenom kontra-trgovanje), pri čemu se kao metoda alokacije dan unapred koristi razdvajanje tržišta, a kod operativnih problema u realnom vremenu se koristi kontra-trgovanje.

Često se redispečing pominje kao efikasna metoda za otklanjanje zagušenja u realnom vremenu.

### 3.6. Koordinisane aukcije

Ova metoda je prilično favorizovana u poslednjim ETSO dokumentima [15, 13], a za sada nema praktičnu primenu u Evropi, makar ne u osnovnom obliku opisanom u [15].

Prepoznavajući nedostatke raspregnute alokacije kapaciteta na pojedinim granicama na osnovu NTC, u interkonekcijama gde sistemi imaju veliki međusobni uticaj, ETSO je pristupio nadgradnji postojeće metode eksplicitne aukcije, odnosno razvoju metode koordinisane aukcije. Osnovna razlika ove i

drugih do sada pominjanih metoda je što se ne ograničavaju programi razmena nego fizički tokovi snaga preko zagušenih elemenata. Pri tome mera raspoloživog kapaciteta na pojedinom uskom grlu nije više NTC kao programska veličina, nego kapacitet uskog grla BC (Bottleneck Capacity, u nekim dokumentima zvan i Border Capacity) kao fizička veličina.

Distributivni faktori transfera snage (PTDF - Power Transfer Distribution Factor) se proračunavaju kao uticaji pojedinih transakcija na pojedinu granicu.

Alokacija kapaciteta se vrši za sve granice i sve transakcije odjednom. Pri tom se mreža linearizuje, odnosno množenjem matrice PTDF i iznosa pojedinih transakcija dobija se udeo svake transakcije u toku snage po pojedinom elementu (granici) u MW, pa se ti udeli sabiraju. Ukoliko na nekoj granici proračunati zbir premaši vrednost BC, transakcije se alociraju, pri čemu imaju prednost one sa većim odnosom ponuđene cene/PTDF na posmatranoj granici.

Poslednja prihvaćena (delimično ili potpuno) transakcija diktira cenu koja će biti naplaćena ostalima koje su prošle na aukciji.

Ova metoda dobro uvažava međuzavisnosti povezanih sistema i boljim uvažavanjem fizičkog ponašanja elektroenergetskog sistema dovodi do većeg iskorišćenja prenosnih kapaciteta, jer su međusobni uticaji svih sistema i svih razmena energije uvaženi. Pored tih dobrih osobina, ona predstavlja veliki izazov za primenu u praksi jer zahteva visok nivo saradnje među svim učesnicima u interkonekciji, kao i prilično centralizovan sistem odlučivanja o prihvatanju ili odbijanju pojedinih transakcija.

Prvi primer korišćenja principa koordinisane aukcije u Evropi, u pogledu analize osetljivosti elemenata mreže na pojedine transakcije, je aukcija kapaciteta na granicama Holandije, u koordinaciji sa susednim TSO.

Koordinisana aukcija se sve više proučava u zemljama jugoistočne Evrope, kao kandidat za metodu alokacije kapaciteta koja bi se mogla primeniti na regionalnom tržištu električne energije. Prve teorijske postavke su već izložene i razmatrane među TSO i regulatorima.

Postoje i naponi da se metoda koordinisane aukcije objedini sa metodom razdvajanja tržišta, koja ima višegodišnju uspešnu primenu u skandinavskim zemljama, te da se kao takva primeni u kontinentalnoj Evropi [13]. Prepoznata je mogućnost objedinjavanja dobrih osobina ove metode u pogledu njene tržišne orijentisanosti, sa prednostima metode koordinisane aukcije u pogledu bolje fizičke predstave sistema i njegovih ograničenja.

#### 4. UPOREDNA ANALIZA POSTOJEĆIH METODA ZA UPRAVLJANJE ZAGUŠENJIMA U PRENOSNOJ MREŽI

U tabeli 1 prikazana je procena efikasnosti svake od navedenih metoda za rešavanje zagušenja u prenosnoj mreži, imajući u vidu postavljene kriterijume koje te metode treba da zadovolje. U tabeli 2, dat je obim informacija koje treba da se razmene između učesnika na tržištu i TSO međusobno u cilju prepoznavanja i eliminacije zagušenja u prenosnoj mreži.

Metode su poređene prema načinu alokacije, tržišnoj orijentisanosti, praktičnoj ostvarljivosti, potrebnom nivou saradnje među TSO i nivou razmene informacija.

Treba napomenuti da je tabela uglavnom prilagođena za metode upravljanja zagušenjima „dan unapred”, pa na pojedina pitanja kod obe vrste redispetchinga (kao pretežno „real-time” metoda) nema potpuno adekvatnog odgovora.

Dakle, kad se uporede ove „dan unapred” metode (četiri metode alokacije NTC-a, razdvajanje tržišta i koordinisana aukcija), tržišno orijentisane su obe vrste aukcija kod alokacije NTC-a (eksplicitnih i implicitnih), metoda razdvajanja tržišta i koordinisana aukcija.

Kod svih metoda se alociraju programi, a ograničenje je NTC (ili NTC-ovi) kao programska veličina, osim kod koordinisane aukcije, gde se alociraju programi ali se oni „preračunavaju” u fizičke tokove snaga, a u skladu s tim, i ograničenja su fizička (BC).

Iz prethodnog sledi da je jedino koordinisana aukcija potpuno efikasna u interkonekcijama sa jakim međusobnim uticajem između pojedinih sistema, ali ostaje kao pitanje njena praktična izvodljivost, zbog zahtevanog vrlo visokog nivoa saradnje među TSO, razmene podataka i kompatibilnosti pravila upravljanja u pojedinim zemljama-učesnicima.

Pomenuti traženi nivo saradnje i kompatibilnosti je najveći kod metode razdvajanja tržišta (objedinjena trgovina energijom i kapacitetom, uz simultanu alokaciju svih kapaciteta), a zatim kod koordinisane aukcije (simultana alokacija kapaciteta). Time one predstavljaju i najveći izazov za praktičnu primenu, ali simultanost alokacije kapaciteta koju samo ove dve metode poseduju predstavlja značajnu prednost.

Izbor metode za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži zavisi od stepena razvijenosti tržišta, postojeće pravne regulative zemlje, tehničke opremljenosti TSO i razvoja informacione strukture u nje-mu. Takođe, prilikom izbora adekvatne metode potrebno je razmišljati i o neophodnom stepenu koordinacije sa susednim TSO, kao i o primeni ekonomskih signala u cilju daljeg razvoja prenosne mreže u zemljama u kojima se iskaže potreba za tim.

Uporedna tabela osnovnih karakteristika metoda za upravljanje zagušenjima

Poređenje metoda: Karakteristike	Metode smanjivanja zasnovane na NTC				Razdvajanje tržišta	Redispečing		Koordisana aukcija
	Princip prve prijave	Proporcionalno smanjivanje transakcija	Eksplisitne aukcije	Implicitne aukcije		Interni redispečing	Prekogranični i koordisani redispečing	
Alokacija na jednoj granici ili na više granica simultano?	1	1	1	1	Više granica simultano	/	/	Više granica simultano
Mere prenosnih mogućnosti	NTC	NTC	NTC	NTC	NTC-ovi	NTC/fizička ograničenja u mreži	NTC/fizička ograničenja u mreži	Grafični kapacitet tj. kapacitet uskog grla (BC)
Ograničavaju se...	Programi razmena	Programi razmena	Programi razmena	Programi razmena	Programi razmena	/	/	Programi razmena, prema njihovom uticaju na fizičke tokove snaga
Efikasna u jako međupovezanim sistemima?	Delimično	Delimično	Delimično	Delimično	Delimično, u kombinaciji sa drugim metodama	Delimično	Delimično	Da
Tržišno orijentisana?	Ne	Ne	Da	Da	Da	Da	Da	Da
Trguje se: kapacitetom (prenosnim pravom) ili kapacitetom+energijom?	Kapacitet	Kapacitet	Kapacitet	Kapacitet+energija	Kapacitet+energija	/	/	Kapacitet
Mogućnost postojanja bilateralnih ugovora za trgovinu energijom?	Da	Da	Da	Ne	Ne	Da	Da	Da
Dobit za TSO	Cena zakupa	Cena zakupa	Cena zakupa: 1. Cene ponuda ili 2. Marginalna cena	Razlika cene u uvoznj oblasti i marginalne cene izvoznika	Razlika marginalnih cena u uvoznj i izvoznj oblasti	Naplaćuju se troškovi redispečinga od učesnika	Naplaćuju se troškovi redispečinga od učesnika	Raspodeljena ukupna cena zakupa
Uvažavanje programa suprotnog smera (netting)?	Ne	Ne	Ne	Ne	Da	Da, to je i osnova metode	Da, to je i osnova metode	Da
Preduslov	/	/	/	Berza u TSO uvozniku	Zajednička regionalna berza	/	/	Zajednička aukcijska kuća
Učešće TSO u trgovini	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Da	Da	Ne
Obezbeđenje podsticaja ka TSO za uvećanje NTC	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Da	Da	Ne
Ostvarljiva?	Da	Da	Da	Potrebna čvrsta TSO koordinacija	Potrebna čvrsta TSO koordinacija i zajednička berza	Da	Potrebna čvrsta TSO koordinacija	Potrebna čvrsta TSO koordinacija i zajednička aukcija
Fer i nediskriminatoran	Ne	Da	Da	Da	Da	Da	Da	Da
Mogućnosti špekulacija	Traženje više kapaciteta nego što je potrebno, ako nema penalizacije za nekorisćenje	Traženje više kapaciteta nego što je potrebno, ako nema penalizacije za nekorisćenje	Nudjenje nerealnih cena	Nudjenje nerealnih cena	Nudjenje nerealnih cena	TSO je trgovac, sukob sa principom o nezavisnosti TSO	TSO je trgovac, sukob sa principom o nezavisnosti TSO	Nudjenje nerealnih cena

## Nivo informacija neophodan za rešavanje zagušenja u mreži

Poređenje metoda: Potrebna informacija	Metode smanjivanja zasnovane na NTC				Razdvajanje tržišta	Redispečing		Koordinisana aukcija
	Princip prve prijave	Proporcionalno smanjivanje transakcija	Eksplisite aukcije	Implicitne aukcije		Interni redispečing	Prekogrančni koordinisani redispečing	
Informacije koje obezbeđuju učesnici na tržištu	lokacija (granica), iznos [MW], trajanje, vreme prijave	lokacija (granica), iznos [MW], trajanje	lokacija (granica), iznos [MW], trajanje ponude cena zakupa	lokacija (granica), trajanje, iznosi [MW]+cene 1. ponude izvoznika 2. potražnje uvoznika	lokacija (oblast), trajanje, iznosi [MW]+cene: potražnje/ponude za svaku tržišnu oblast	lokacija i smer, iznos [MW], trajanje, cena	lokacija i smer, iznos [MW], trajanje, cena	lokacija (izvor/ ponor oblast ili čvor), iznos [MW], trajanje, cena
Informacije koje obezbeđuju TSO	NTC	NTC	NTC i rezultat aukcije, cene ponuda ili marginalna cena	NTC i rezultat aukcije, marginalna cena i cena debalansa	NTC i cene (obezbeđuje TSO i svi tržišni operatori)	Opšti planovi (nakon redispečinga) i ex-ante cene zagušenja	Opšti planovi (nakon redispečinga) i ex-ante cene zagušenja	Granični kapaciteti (BC), matrica PTDF, rezultati aukcije

## 5. ZAKLJUČAK

Zagušenja prenosne mreže, pored toga što ugrožavaju sigurnost rada elektroenergetskih sistema, predstavljaju i ograničenja za normalno odvijanje trgovine električnom energijom, pa se samim tim upravljanje zagušenjima javlja kao nužnost. Promenljivost proizvodnje i potrošnje tokom vremena, dinamička promena stanja prenosnih kapaciteta usled ispada ili remonata pojedinih elemenata, kao i niz transakcija koje su posledica liberalizovanja tržišta električne energije, dovode do pojave zagušenja na raznim mestima prenosne mreže i u raznim vremenskim periodima, te imaju za posledicu potrebu da se svaki proizvodni/potrošački čvor identifikuje na pojavu zagušenja, odnosno da se odredi uticaj svake transakcije u sistemu na pojavu zagušenja u mreži. Veoma je važno da metode za upravljanje zagušenjima budu tržišno orijentisane, tj. da šalju adekvatne ekonomske signale ka svakom učesniku na tržištu i TSO.

Postojeća mesta na kojima se zagušenja javljaju, tj. njihova važnost za trgovinu električnom energijom, učestanost nastanka zagušenja, tip i struktura, kao i dinamičnost i kompleksnost prenosne mreže, utiču na složenost i primenljivost metoda za rešavanje istih.

U uslovima velike međupovezanosti većine sistema u evropskoj interkonekciji, upotreba NTC-a kod metoda alokacije kapaciteta često ne dovodi do željenog cilja, tj. otklanjanja zagušenja u prenosnoj mreži, jer se bazira na proračunima zagušenja između dve zemlje/oblasti i ne obuhvata dovoljno široki deo evropske interkonekcije, tako da se često dešava da energija „zaobiđe“ dogovorene prenosne puteve, i na nekim drugim putevima stvara zagušenja.

Skandinavska iskustva sa razdvajanjem tržišta pokazuju tržišnu orijentisanost i efikasnost te meto-

de na interkonekcijama sa slabijim međusobnim uticajem, ali samim tim ne odgovaraju kompleksnim interkonekcijama kakva je UCTE.

Koordinisani redispečing je efikasan na povećanju trgovinskih mogućnosti, ali na problemima skromnijeg obima, a prikladan je uglavnom za otklanjanje zagušenja u realnom vremenu.

Postoje analitičke metode, kao što su koordinisane aukcije, kojima bi se dovoljno tačno mogli ispratiti uticaji pojedinih aranžmana razmene energije na elemente prenosnog sistema u uslovima velike međupovezanosti sistema Evrope, tako da je tehnički deo problema rešiv. Mnogo veći problem predstavlja otpor ekonomskih i organizacionih subjekata na tržištu prema metodama koje su komplikovanije za primenu, a samim tim i manje transparentne za učesnike na tržištu.

Generalno gledano, što je neka metoda upravljanja zagušenjima efikasnija u smislu:

- obezbeđenja sigurnosti rada interkonektovanih EES-a

- većeg iskorišćenja prenosnih kapaciteta i

- primene tržišnih pravila,

ona je istovremeno:

- kompleksnija sa aspekta njene primenljivosti

- traži bolju saradnju među TSO

- zahteva viši nivo razmene podataka i

- maksimalnu kompatibilnost organizacionih pravila među TSO i državama.

Metode za rešavanje zagušenja nisu postavljene jednom za uvek, već i u okviru jednog te istog sistema vremenom evoluiraju i menjaju se.

Udruženje operatora prenosnog sistema zemalja Evropske unije - ETSO je do sada postavilo nekoliko metoda koje se bave problemom zagušenja u visokonaponskoj prenosnoj mreži Evropske Unije. Pošto je ceo proces liberalizacije i kreiranja tržišta električne energije u povelju, razvoj neophodnih pro-

cedura i metoda nije završen i do sada je uočeno mnogo nedostataka u razvijenim metodama, tako da će se ovaj proces i dalje razvijati u cilju dobijanja jasnih i efikasnih rešenja, a sve u kontekstu formiranja valjanih i efikasnih tržišnih mehanizama i obezbeđenja sigurnog rada evropske interkonekcije.

## 6. LITERATURA

- [1] DIREKTIVA 96/92/EC O UNUTRAŠNJEM TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE U EVROPSKOJ UNIJI, Brisel, 1996. godine
- [2] Branko i Vesna Stojković, DEREGULACIJA TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE - TEHNIČKI I PRAVNI ASPEKTI, EPCG, A.D. Nikšić, 2002. godine
- [3] DEFINITIONS OF TRANSFER CAPACITIES IN LIBERALIZED ELECTRICITY MARKETS, Final Report, ETSO, April 2001
- [4] PROCEDURES FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, ETSO, October 2001
- [5] DOSADAŠNJA ISKUSTVA I NOVI ZAHTEVI KOD PROGNOZE ZAGUŠENJA I PRORAČUNA GRANIČNIH PRENOSNIH MOGUĆNOSTI U OKVIRU DRUGE UCTE SINHRONE ZONE, Z. Vujasinović, D.P. Popović, 11. simpozijum JUKO CIGRE, H. Novi, 2002
- [6] SIGURNOSNI KRITERIJUMI KOD PRORAČUNA PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, P. Stančević, Z. Vujasinović, D. Pupovac, 11. simpozijum JUKO CIGRE, H. Novi, 2002
- [7] AUTOMATIC CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENT IN THE OPEN ELECTRICITY MARKET ENVIRONMENT, Dragan P. Popović, Đorđe M. Dobrijević, (Nikola Tesla Institute), Snežana V. Mijailović, Zoran Ž. Vujasinović (Electricity Coordinating Center), CIGRE, Paris, France, 2004, rad prihvaćen za objavljivanje
- [8] D. Popović, Đ. Dobrijević, N. Mijušković, D. Vlaisavljević, S. Mijailović, JEDINSTVENA METODOLOGIJA ZA EVALUACIJU PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, 10. Simpozijum Upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, Herceg Novi, 22-25. maj 2000, referat III.V.1, Časopis Elektroprivreda, br. 3, 2000, str. 3-12
- [9] D. P. Popović, Đ. Dobrijević, N. Mijušković, D. Vlaisavljević, S. Mijailović, ANALITICAL TOOLS FOR THE TRANSFER CAPABILITY EVALUATION OF BALKAN INTERCONNECTION, Paper 39.206, CIGRE, Paris, France, august 2000
- [10] EVALUATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION, ETSO, November 1999
- [11] MODELOVANJE I ANALIZA PRENOSNE MREŽE JUGOISTOČNE EVROPE KAO MODULI PROCESA UPRAVLJANJA ZAGUŠENJIMA, Z. Vujasinović, N. Filipović, 26. savetovanje JUKO CIGRE Banja Vrućica - Teslić, maj 2003.
- [12] CO-ORDINATED USE OF POWER EXCHANGES FOR CONGESTION MANAGEMENT (MARKET SPLITTING&MARKET COUPLING), ETSO, April 2001
- [13] RECONCILIATION OF MARKET SPLITTING WITH CO-ORDINATED AUCTION CONCEPTS, ETSO, February 2002
- [14] ELIMINISANJE ZAGUŠENJA - ISKUSTVA NORDIJSKIH DRŽAVA, Mladen Apostolović, Nešo Mijušković, 26. Savetovanje JUKO CIGRE Banja Vrućica - Teslić 25.-30. maj 2003.
- [15] CO-ORDINATED AUCTIONING, A MARKED BASED METHOD FOR TRANSMISSION CAPACITY ALLOCATION IN MESHED NETWORKS, ETSO, Final Report, April 2001

Rad je primljen u uredništvo 06. 02. 2004. godine



**Snežana Mijailović** je rođena 1965. godine u Pančevu. Diplomirala je 1990. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, na smeru za Elektroenergetske sisteme. Pri završetku studija, započela je rad u Institutu Nikola Tesla, u Centru za elektroenergetske sisteme, gde je radila do sredine 1997. godine. Od sredine 1997. godine radi u Elektroenergetskom koordinacionom centru, kao rukovodilac Službe za studije i konsalting. Od februara 2002. godine radi na radnom mestu zamenika direktora EKC-a. Aktivno je radila na studijskim aktivnostima vezanim za planiranje i poboljšanje operativnog rada elektroenergetskog sektora zemalja jugoistočne Evrope, odnosno na problemima interkonektivnog rada, elektroenergetskog bilansa, sigurnosti i stabilnosti sistema, primarnoj i sekundarnoj regulaciji, proširenju UCTE interkonekcije i dr. Član je UCTE radne grupe Studijski alati (Study tool), Izvršnog tima za povezivanje UCTE interkonekcije, SUDEL izvršnog komiteta i SETSO radne grupe. Kopredsednik je SETSO podgrupe Pristup mreži, upravljanje zagušenjima i tokovi snaga (SETSO SG NACMPF), kao i ETSO podgrupe Pristup mreži i upravljanje zagušenjima (ETSO SG NACM) koje su osnovane sa ciljem da definišu i primene procedure za procenu prenosnih kapaciteta, procedure za upravljanje zagušenjima, kao i da poboljšaju raz-

menu podataka između operatera prenosnih sistema zemalja jugoistočne Evrope. Autor je ili koautor pedesetak radova objavljenih u domaćim i međunarodnim časopisima i konferencijama, kao i tridesetak studija urađenih za potrebe domaće i strane stručne javnosti.



**Zoran Vujasinović** je rođen 1974. godine u Kninu. Diplomirao je 1999. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, na smeru za Elektroenergetske sisteme. Od juna 2000. godine je zaposlen u Elektroenergetskom koordinacionom centru u Beogradu, gde je do septembra 2001. radio na radnom mestu smenskog inženjera, a posle na mestu inženjera za analizu. Osnovne oblasti, kako stručnog interesovanja tako i angažovanja u okviru EKC-a su mu razvoj i primena proračuna NTC, prognoze zagušenja (DACF) i metodologija za upravljanje zagušenjima. Član je SETSO/SUDEL radne grupe "Pristup mreži, upravljanje zagušenjima i tokovi snaga", čiji prvenstveni zadatak je razvoj pomenutih aktivnosti u regionu jugoistočne Evrope. Uključen je u analize vezane za rekonekciju dveju UCTE sinhronih zona i koautor je studije o efektima izgradnje 400 kV dalekovoda Niš-Skoplje. Kao autor ili koautor je objavio tri rada na domaćim savetovanjima i simpozijumima (JUKO CIGRE), a koautor je jednog rada na pariskoj CIGRE.



**Mladen Apostolović** je rođen 1975. godine u Beogradu. Diplomirao je 2000. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, na smeru za Energetske pretvarače i pogone. Od marta 2001. godine je zaposlen u Elektroenergetskom koordinacionom centru u Beogradu, na radnom mestu smenskog inženjera, na poslovima usaglašavanja programa razmena između elektroprivrednih subjekata u Drugoj UCTE sinhronoj zoni, izradi izveštaja o ostvarenim razmenama električne energije i neželjenim odstupanjima i izradi programa frekvencije. Poslovi dalje obuhvataju nadgledanje rada sekundarne regulacije učestalosti i snaga razmene elektroprivreda Srbije, Makedonije, Crne Gore i Republike Srpske, osnivača EKC-a, u realnom vremenu, izradu dnevnih izveštaja o radu njihovih elektroenergetskih sistema kao i pravljenje matematičkih modela za prognozu zagušenja za naredni dan.

Posebna oblast stručnog interesovanja je aspekt sigurnosti elektroenergetskog sistema u liberalizovanom okruženju, odnosno metode za otklanjanje zagušenja u prenosnoj mreži. Kao koautor, ili autor je objavio tri rada na domaćim savetovanjima i simpozijumima (JUKO CIGRE). Takođe je koautor dve studije od kojih je jedna vezana za planiranje razvoja srednjenaponske mreže Istočne Hercegovine a druga za uklanjanje hidroelektrana Buk Bijela i Srbinje u elektroenergetsku mrežu.

# Jedan postupak za proračun gubitaka u distributivnim mrežama

Stručni rad  
UDK: 621.3.017; 621.311.1; 621.316

---

## Rezime:

U radu je prikazan novi postupak za proračun gubitaka snage i energije u distributivnoj mreži koji je baziran na primeni distributivnog menadžment sistema. Dve su osnovne prednosti koje se dobijaju korišćenjem: 1) baza podataka što znači da praktično nema ograničenja na skup i kvantitet podataka kojim se opisuje distributivna mreža i 2) postojanje ekstremno efikasnih programskih paketa za proračun režima mreže (koji su prvenstveno namenjeni proračunima u realnom vremenu), primenjenih sada u svrhu proračuna gubitaka. Polazeći od ove dve pretpostavke, predložen je postupak u kojem se koriste podaci o realnim uklopnim stanjima mreže, parametrima konkretnih elemenata mreže, hronološkim dijagramima potrošnje i merenjima u mreži, pa se na taj način iz kvantiteta podataka dobija kvalitet rezultata koji se obično ne može obezbediti pri standardnim proračunima. Rezultati proračuna su ilustrovani na primeru mreže realnog grada sa preko 3,5 miliona stanovnika.

**Ključne reči:** proračun gubitaka, distributivna mreža, distributivni menadžment sistem

---

## Abstract:

### A PROCEDURE FOR DISTRIBUTION NETWORK LOSSES ANALYSIS

This paper deals with a new procedure for power/energy losses in distribution network. The procedure is based on usage of distribution management system. Two main advantages are provided in environment: 1) database; it means that distribution network can be described practically without limits on set and quantity of data and 2) existence of extremely efficient software packages for network state estimation (primarily used for real time), applied now for losses analysis. Based on the advantages, the suggested procedure uses data about real network structure, parameters of particular network elements, daily load curves and network measurements. Usage of this high amount of data produces quality of results that cannot be achieved by standard procedures. Results of calculation are given for one real network of a city with about 3,5 million inhabitants.

**Key words:** losses analysis, distribution network, distribution management system

---

## 1. UVOD

Analiza gubitaka u distributivnoj mreži je energijska funkcija [1, 2] koja se koristi za proračun gu-

bitaka aktivne i reaktivne snage/energije u mreži kao celini, kao i gubitka na elementima te mreže. Vrednost gubitaka je jedan od direktnih pokazatelja efikasnosti realizacije osnovne funkcionalnosti distri-

---

V. prof. dr Duško Bekut – Fakultet tehničkih nauka, 21 000 Novi Sad, Fruškogorska 11,  
Valentina Treskanica, dipl. ing. – DMS Grupa, 21 000 Novi Sad, Puškinova 9a



butivne mreže - prenosa energije od prenosne mreže do krajnjih potrošača.

Kada se analiza gubitaka odvija za neki proizvoljan trenutak, tada je u pitanju analiza gubitaka snage. Integral gubitaka snage u intervalu vremena od interesa predstavlja ukupnu vrednost gubitaka energije. U mrežama koje funkcionišu po zakonitosti deregulisanog tržišta cena električne energije se menja u toku vremena, pa je za sveobuhvatan uvid u gubitke potrebno pored analize gubitaka u apsolutnom iznosu izračunati i troškove korespondentne izračunatim gubicima. Za takav proračun je neophodno raspolagati i sa cenom električne energije u funkciji vremena za koje se proračunavaju gubici.

Ukupni ili ostvareni gubici električne energije u jednoj mreži predstavljaju razliku između isporučene i prodane električne energije, te je, za početak, kao potreban uslov za praćenje i analizu gubitaka neophodno raspolagati sa ovim vrednostima. Na osnovu izračunatih ukupnih gubitaka, može se proceniti da li treba unaprediti funkcionisanje distributivne mreže s obzirom na gubitke. Relativno veliki ukupni gubici, sa druge strane, predstavljaju siguran pokazatelj da to treba svakako uraditi. Međutim, tek dodatnim analizama koje za rezultat imaju razdvajanje gubitaka po naponskim nivoima ili pojedinim oblastima, mogu se ustanoviti kritična mesta, odrediti uzroci nastajanja i eventualno preduzeti mere za njihovo smanjenje. Zato je, za početak, potrebno ukratko predstaviti strukturu gubitaka. Gubici se prema načinu nastanka dele na: *tehničke* (normirane) i *komercijalne* gubitke.

Tehnički gubici nastaju pri uključenju elemenata pod napon i zbog proticanja električne energije kroz njih. Tehnički gubici se dele na fiksne (gubitke nezavisne od opterećenja i na koje se, u principu, teško može uticati) i varijabilne gubitke (koji su zavisni od opterećenja i koji u stvari predstavljaju gubitke koji se odgovarajućim upravljačkim akcijama eventualno mogu smanjiti).

Komercijalni gubici nastaju kao posledica kvara (kratkih spojeva) i nesimetrija u mreži, nesavršenosti uređaja za registraciju i merenje protoka električne energije, harmonika, nejednovremenog očitavanja potrošnje, a takođe i kao posledica neregistrovane potrošnje - krađe.

Za komercijalne gubitke može se konstatovati sledeće:

- ovi gubici su vrlo promenljive veličine,
- teško ih je precizno odrediti računskim putem,
- po iznosu su takvi da se u analizi gubitaka ne mogu zanemariti.

Zbog svega navedenog, neophodno je što tačnije proračunati komercijalne gubitke, ali je to, sa druge strane, vrlo složeno. Jedini mogući put da bi se

oni utvrdili je da se prvo, što tačnije odrede tehnički gubici, pa da se njihovim oduzimanjem od ukupnih gubitaka izračunaju komercijalni gubici.

U delu koji sledi ukratko su predstavljeni standardni postupci za proračun tehničkih gubitaka u distributivnoj mreži, dok je u trećem delu dat postupak za proračun gubitaka u distributivnom menadžment sistemu (DMS) okruženju, što je glavni predmet obrade ovog rada. Tim postupkom mogu se računati gubici u visoko/sredjenaponskim (VN/SN) i/ili niskonaponskim (NN) mrežama. Razmatranja u trećem delu se zaključuju sa algoritmom za proračune. U četvrtom delu je prikazan primer proračuna i dati su kratki komentari dobijenih rezultata. U poslednja dva dela dati su zaključak i literatura korišćena za pisanje ovog rada.

## 2. KRATAK PREGLED STANDARDNIH POSTUPAKA ZA ANALIZU GUBITAKA

Za analizu tehničkih gubitaka u distributivnim mrežama, u literaturi se mogu naći različiti postupci. Neki od tih postupaka su [3–8]:

- postupak baziran na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka snage,
- postupak baziran na struji glavne deonice,
- postupak ekvivalentne električne otpornosti,
- fuzzy postupak,
- postupak klasterovanja.

U ovim postupcima se, radi pojednostavljenja proračuna, uvode određena zanemarenja i pretpostavke. Uglavnom se koriste neke prosečne vrednosti parametara elemenata distributivne mreže i tipizirana struktura mreže (npr. neke prosečne dužine i broj deonica po izvodu). Pri tome se u svakom od postupaka koriste i pojednostavljeni opisi režima mreže, tako da se gubici energije procenjuju samo na osnovu određenih karakterističnih režima rada mreže (maksimalni, minimalni, srednji, itd.).

U nekim od postupaka se problem nedostatka podataka rešava primenom teorije verovatnoće i matematičke statistike ili fuzzy pristupom. Generalno, u svim ovim postupcima distributivna mreža (odnosno, njeni elementi) i njeni režimi se na neki način ekvivalentiraju, pa se u stvari posmatra uprošćen model mreže koja se sastoji od nekoliko elemenata koji su reprezentativni stvarne mreže. Što su ekvivalentiranje i tipizacija više korišćeni, to je manja mogućnost detaljnog klasifikovanja gubitaka po naponskim nivoima i elementima i lociranja kritičnih mesta po pitanju gubitaka. Međutim, upravo jedan od glavnih ciljeva u analizi gubitaka je da se oni odrede, a zatim i da se lociraju kritična mesta, kako bi se preduzele konkretne mere za smanjenje gubitaka.

Svako zanemarenje unosi izvesnu grešku kada je u pitanju konačan rezultat ovih proračuna. Pored

toga, u većini postupaka se, zbog pojednostavljenja proračuna, zanemaruju gubici u otočnim elementima, čime se automatski unosi greška u dobijeni rezultat.

Zato se prethodno navedenim postupcima dobija samo približna (procenjena) vrednost gubitaka. Da bi se gubici preciznije izračunali i locirali, neophodno je pri proračunima koristiti: konkretnu topologiju/uklopno stanje distributivne mreže, stvarne fizičke parametre svih elemenata i hronološke dijagrame potrošnje potrošača u toku razmatranog perioda proračuna<sup>1)</sup>. Hronološkim dijagramima se dosta precizno opisuje potrošnja, ali za kompletnu sliku o gubicima energije u nekom razmatranom periodu potrebno je dobro poznavati i realne režime mreže u periodu od interesa, za šta su neophodna merenja. Merenja se koriste kako bi se u postupku kalibracije potrošnje/estimacije stanja mreže usaglasila potrošnja određena sa hronoloških dijagrama (tzv. preestimirana potrošnja) i potrošnja koja odgovara datom režimu mreže. Očigledno je da je skup i obim podataka koji se koristi za jedan ovakav proračun daleko veći nego kod standardnih podataka, ali je zato moguće vrlo precizno izračunati gubitke po svakom konkretnom elementu mreže. Iz jednog takvog kvantiteta prirodno proizilazi i potpuno nov i bolji kvalitet rezultata.

Da bi se jedan ovakav cilj uspešno realizovao, neophodno je obezbediti potrebne podatke (kojih treba u daleko većem obimu) i efikasan alat za obradu takvog relativno obimnog skupa podataka. Upravo korišćenje DMS okruženja u potpunosti ispunjava ove zahteve i to je predmet razmatranja u sledećem delu rada.

### 3. NOV PRISTUP ZA ANALIZU GUBITAKA BAZIRAN NA PRIMENI DMS

U ovom radu se izlaže jedan nov postupak za proračun tehničkih gubitaka energije/snage baziran na korišćenju DMS.

Sve potrebne pretpostavke za kvalitetno rešavanje problema analize gubitaka obezbeđuje okruženje u okviru DMS. Predloženi postupak za proračun gubitaka snage/energije je organizovan tako da se bazični rezultati proračuna obezbeđuju korišćenjem funkcija kalibracija potrošnje, tokovi snaga i estimacija stanja<sup>2)</sup> [1, 2]). Kao jedan od rezultata tih proračuna, dobijaju se i gubici snage po svim ele-

<sup>1)</sup> U literaturi [8] se konstatuje da se najprecizniji rezultati proračuna gubitaka energije dobijaju korišćenjem hronoloških dijagrama potrošnje.

<sup>2)</sup> Još neke od funkcija se koriste u ovim proračunima (od kojih je najznačajniji matematički model), ali se neposredni rezultati dobijaju sa pomenute tri funkcije.

mentima distributivne mreže. Integraljenjem tih gubitaka u intervalu vremena od interesa, izračunavaju se gubici energije koji se zatim dalje obrađuju i klasifikuju.

Pomenute tri funkcije su prvenstveno razvijene za proračune režima mreža u realnom vremenu, pa se pomoću njih rezultati dobijaju maksimalno efikasno. Funkcija analize gubitaka nije po definiciji funkcija realnog vremena, tako da efikasnost prethodno pomenutih funkcija daleko premašuje zahteve funkcije analiza gubitaka. Pa ipak ta efikasnost je dobrodošla kako bi se u relativno kratkom vremenu procesiralo mnogo podataka, a pogotovo u velikim distributivnim mrežama (sa 30 i više hiljada čvorova).

Kvalitet rezultata proračuna pomenutih funkcija, pa samim tim i funkcije analiza gubitaka u najvećoj meri zavisi od podataka koji su na raspolaganju pri proračunu.

U okviru okruženja koje obezbeđuje DMS, pored pomenutih funkcija, na raspolaganju je i baza podataka o elementima mreže u okviru koje se nalazi i skup podataka o istorijskim režimima u razmatranoj mreži. Zahvaljujući bazi podataka, elementi mreže opisuju se vrlo precizno bez uvođenja bilo kakvih pretpostavki kao npr. o tipičnoj dužini i osobinama izvoda ili raspodeli potrošnje duž izvoda, itd. Potrošnja se opisuje ili pomoću tipskih/pojedinačnih hronoloških dijagrama potrošnje, a takođe korišćenjem jednog od sledećih pokazatelja potrošnje vezanih za transformatore preko kojih se napaja neposredna potrošnja: 1) instalisane snage, 2) vrednosti maksimalnih potrošnji i 3) protok energije. Ovi pokazatelji se koriste u postupku kalibracije potrošnje u okviru postupka estimacije stanja [1,2].

Predloženim postupkom se omogućuje detaljan proračun gubitaka u razmatranom periodu uz uvažavanje konkretnih uklopnih stanja i realnih režima koji postoje u toj distributivnoj mreži. Promena režima mreže se može opisati sa praktično neograničenim brojem uklopnih stanja sa ili bez odgovarajućih merenja. Iz prethodno navedenog, nije teško konstatovati da je skup podataka kojim se u predloženom postupku raspolaže znatno veći nego kod postupaka pomenutih u prethodnoj glavi.

Po pitanju proračuna režima, za uklopna stanja za koje merenja postoje ili ne, moguća su dva slučaja:

1. Kada su u pitanju proračuni režima za koje postoje merenja (to mogu biti proračuni nekog režima iz prošlosti ili sadašnjosti za koji se raspolaže merenjima), tada se koristi funkcija estimacija stanja (u okviru koje se koristi kalibracija potrošnje i proračun tokova snaga) za proračun režima mreže.

2. U slučaju kada nema merenja, koriste se pre-estimrane vrednosti potrošnje, a režim se izračunava samo pomoću proračuna tokova snaga. (Ovo je još uvek jako precizan opis potrošnje, pošto se vrednosti potrošnje koje se koriste iz hronoloških dijagrama u izvesnoj meri modifikuju sa vrednostima merenja; te modifikacije su, po pravilu male, dok bi u suprotnom to bio znak da korišćeni dijagrami nisu odgovarajući).

Dakle, u svim ovim proračunima se podrazumeva da su za proračune režima minimalno na raspolaganju pre-estimrane vrednosti potrošnje. Normalno je da se mogu očekivati kvalitetniji rezultati proračuna u slučajevima kada se raspolaze i sa odgovarajućim vrednostima merenja, pri čemu je neophodno raspolagati i sa odgovarajućim podacima o uklopnom stanju jer se samo tada mogu uzeti u obzir ta merenja. Ako podataka o uklopnom stanju u prošlosti nema, onda se očigledno pri proračunu mora koristiti tekuće (zatečeno) uklopno stanje, a za proračune režima se koriste tokovi snaga sa pre-estimranim potrošnjama. U savremenim DMS, uobičajeno je da se sa zapisom merenja u baze podataka automatski zapisuje i uklopno stanje (obično se tu zapisuju još neke dodatne veličine kao npr. pozicije regulacionih sklopki, itd. koje izlaze iz okvira razmatranja ovog rada), što znači da se u bazu podataka zapisuje tzv. „snap-shot” razmatrane mreže.

U uvodnom delu je navedeno da gubici energije predstavljaju integral gubitaka snage u vremenu. Postavlja se pitanje: koliko je često potrebno izračunavati režime u distributivnoj mreži, kako bi se dovoljno precizno izračunali gubici snage? Da bi se odgovorilo na ovo pitanje, neophodno je poznavati način na koji se menja režim distributivne mreže u vremenu. Režim u distributivnoj mreži se praktično neprekidno menja, ali te promene nisu skokovite, pa se vrlo preciznim smatra njegov opis pomoću 24 režima za jedan dan<sup>3)</sup>, što znači da se režim mreže menja sa satnom dinamikom. Postoje još neke zakonitosti u promeni režima u distributivnoj mreži koje se koriste da bi se obim potrebnih proračuna za analizu gubitka značajno redukovao. Jedna od tih pretpostavki je i da se režim distributivne mreže u okviru sezone ciklično ponavlja u periodu od sedam dana, što je u potpunoj saglasnosti sa uobičajenim zakonitostima u promeni režima distributivne mreže. Sezone koje se definišu u okviru DMS ne moraju da

<sup>3)</sup> Broj izabranih reprezentativnih režima zavisi obično od frekvencije kojom se SCADA sistemom obezbeđuju podaci o mreži. To je najčešće jednosatni period, ali isto tako to može biti i neki kraći period npr. 15 min ili čak i kraći, pa će shodno tome povećavati i broj reprezentativnih trenutaka. Nije obavezno, mada se najčešće uzima da reprezentativni režimi budu ekvidistantno raspoređeni u vremenu.

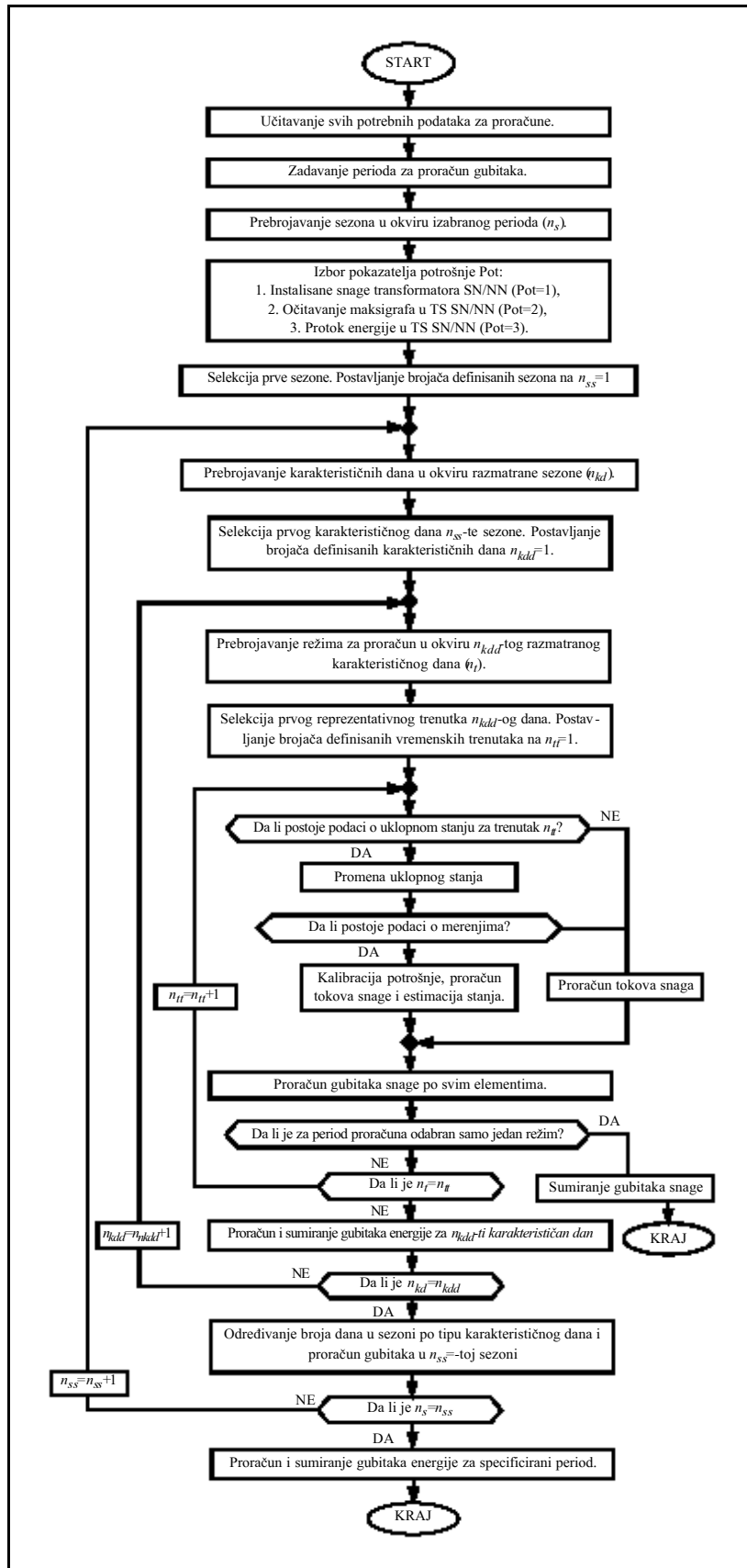
prate godišnja doba. Broj sezona u toku godine može biti minimalno jedan (cela godina jedna sezona), a maksimalno 12 (svaka sezona odgovara jednom mesecu)<sup>4)</sup>. Sezone i njihovo trajanje se, u opštem slučaju, biraju tako da prethodna pretpostavka o cikličnom ponavljanju potrošnje unutar sezone bude ispunjena. Prema tome, sezone ne moraju biti jednako trajanja.

Uvođenjem pretpostavke o cikličnoj potrošnji podrazumeva se da su režimi za vreme npr. radnih dana u sezoni identični, te da se njihov režim može opisati sa minimalno jednim reprezentom - karakterističnim danom za sve dane, a maksimalno sa pet karakterističnih dana - po jedan za svaki od radnih dana. Režimi za subote, odnosno nedelje i praznike su identični sa karakterističnim danom za subote, odnosno nedelje i praznike, respektivno.

Na ovaj način se broj proračuna značajno smanjuje, jer se u okviru sezone proračunavaju gubici energije samo za karakteristične dane (minimalno 4, a maksimalno 8 dana). Za svaki karakteristični dan se po 24 puta izračunavaju režimi. Za svaki od tih režima prvo se izračunavaju gubici snage, a zatim (uz prethodno uvedenu pretpostavku da je režim mreže nepromenljiv do sledećeg proračuna) i odgovarajući gubici energije. Sumiranjem gubitaka energije, dobijaju se gubici za svaki navedeni karakteristični dan. Raspoložujući sa gubicima energije za svaki od karakterističnih dana sezone, a zatim i sa brojem dana koji po tipu odgovaraju svakom od karakterističnih dana u okviru sezone, nije teško izračunati gubitke u okviru sezone. Analogni postupak se ponavlja i za ostale sezone od interesa, odakle se sumiranjem nalaze gubici za čitav interval od interesa. Naravno, ako interval od interesa zahvata samo jedan deo sezone, tada se gubici proračunavaju samo za taj deo sezone.

Proračun gubitaka može biti izveden za proizvoljan trenutak (proračun gubitaka snage) ili za proizvoljan period. Kada je u pitanju proračun za period tada je minimalna vrednost 1 sat, mada to može biti i neki kraći period, jer se režim u toku tog sata smatra nepromenljivim, pa se gubici energije menjaju linearno sa vremenom). Za periode koji su duži od jednog dana, uobičajeno je da se periodi zaokružuju na čitav dan, pa se tako početni i krajni trenutak perioda poklapaju sa prvim satom prvog dana i poslednjim satom poslednjeg dana intervala od interesa, respektivno. Zato se za takve proračune zadaju samo početni i krajnji datum perioda za koji se želi proračun. Izabrani period može u opštem slučaju da

<sup>4)</sup> Za naše mreže mogu se minimalno koristiti 2 sezone (sezona veće i sezona manje potrošnje), dok se korišćenjem 4 sezone (koje se poklapaju sa godišnjim dobima) mogu dobiti vrlo precizni rezultati u analizi gubitaka.



Slika 1. Algoritam proračuna gubitaka u distributivnoj mreži

obuhvata interval vremena iz prošlosti, tekući režim mreže, pa čak i interval vremena u budućnosti.

U zavisnosti od dostupnih podataka o merenjima i uklopnom stanju, proračuni u intervalu vremena iz prošlosti i sadašnjosti mogu biti manje ili više kvalitetni, dok se za proračune u intervalu iz budućnosti nailazi, u prvi mah, na ograničenje da ne postoje merenja, a često ni podaci o uklopnim stanjima koja bi bila važeća za taj interval.

Moguća su dva rešenja ovog problema. Prvo i jednostavnije je da se zadrži uklopno stanje iz trenutka sadašnjosti, a da se za proračune koriste tokovi snaga sa preestimanim vrednostima. Drugo rešenje je složenije i za period budućnosti je potrebno formirati uklopno stanje ili čak više uklopnih stanja, pri čemu se eventualno može modifikovati i potrošnja u nekim čvorovima. Tada se formalno može proračun izvesti kao da je čitav period bio u prošlosti. Ako je npr. aktuelni datum 01. jun tekuće godine, a period za koji se zahteva proračun npr. od 01. marta tekuće godine do 01. oktobra tekuće godine, onda bi period od 01. juna do 01. oktobra predstavljao interval vremena u budućnosti. Ako se, međutim, formalno početni datum izabere kao 01. mart prethodne godine, a krajnji kao 01. oktobar prethodne godine, pri čemu se obezbeđuju svi relevantni podaci za taj period, tada se bez ikakvih ograničenja mogu izračunati gubici. Očigledno je da za drugo rešenje neophodno obezbediti više podataka, pri čemu ti podaci (normalno) moraju biti konzistentni. Ovakav proračun bi mogao da bude korišćen u svrhe planiranja pogona mreže.

Na slici 1 dat je algoritam za proračun gubitaka u distributivnoj mreži.

Dakle, u najkraćem, analiza gubitaka se svodi na sledeće: izbor odgovarajućih podataka o mreži (njenim elementima, uklopnim  
ELEKTROPRIVREDA, br. 1, 2004.

stanjima, merenjima...), odgovarajući proračun režima te mreže sa funkcijama za proračun režima, da bi nakon toga sledila dalja obrada dobijenih rezultata i konačni proračun gubitaka energije i klasifikovanje rezultata.

Izvršenje algoritma započinje sa učitavanjem svih potrebnih podataka za proračune.

U sledećem koraku se bira period za proračun gubitaka. Da bi se lakše pratili koraci ovog algoritma, dat je primer za ilustraciju koji je prikazan na slici 2. Prikazan je primer perioda koji je definisan sa 2 datuma: 03. avgusta 2003. godine i 14. avgusta 2003. godine. U sledećem koraku se prebrojavaju sezone u okviru izabranog perioda. Neka je taj period izabran tako da u njemu postoje 2 sezone.

Nakon identifikacije sezona, bira se jedan od pokazatelja potrošnje Pot za proračune. U sledećem koraku, za izabranu sezonu identifikuju se tipovi karakterističnih dana koji će se koristiti za proračune u toj sezoni. Za odabrani period sa slike 2 u prvoj sezoni se koriste samo dva karakteristična dana: tip nedelja za prvi dan prve sezone i tip radni dan za ostala 3 dana (neka je, dakle, izabran samo jedan karakterističan dan za sve radne dane). Slično razmatranje važi i kod druge sezone gde se koriste sva tri tipa karakterističnih dana: nedelja, subota i radni dan. Ovim je završeno prebrojavanje karakterističnih dana to tipovima.

U sledećem koraku je neophodno identifikovati broj režima sa kojim se opisuje režim mreže za svaki od karakterističnih dana (toliko će biti proračuna sa funkcijama za proračun režima mreže). Kao što je ranije pomenuto, uobičajeno je da se koriste 24 takva ekvidistantna intervala, što znači da se koriste satni reprezenti režima mreže, kao što je to pomenuto na početku ove glave.

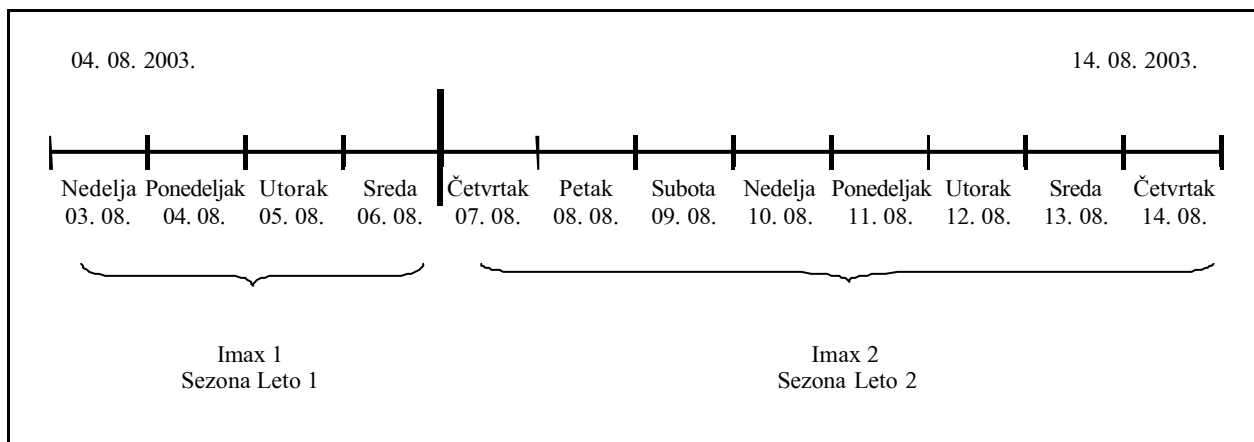
U zavisnosti od raspoloživih podataka, uklopno stanje mreže se zadržava, ili se menja, pri čemu se

uvažavaju ili ne uvažavaju merenja, da bi se na kraju proračunao režim mreže (u algoritmu postoje dve mogućnosti za ovaj proračun: jedna u kojoj se koriste samo tokovi snaga i druga u kojoj se koriste kalibracija opterećenja i tokovi snaga u okviru estimacije stanja). Nakon ovog koraka, poznat je režim u celoj mreži, i na osnovu poznatog režima proračunavaju se gubici snage za razmatrani trenutak. Ako su gubici snage i glavni cilj proračuna, onda je ovo kraj proračuna. U protivnom, izračunavaju se gubici energije, a proračun se ponavlja za sve režime tog karakterističnog dana. Ovaj postupak se ponavlja za sve karakteristične dane po sezoni, a pošto se odredi i broj dana koji po tipu odgovara datim karakterističnim danima (npr. u prvoj sezoni ima jedan karakterističan dan tipa nedelja i 3 dana tipa radni dan), nije teško izračunati gubitke za razmatranu sezonu. Proračun se zatim, analogno, ponavlja i za drugu sezonu.

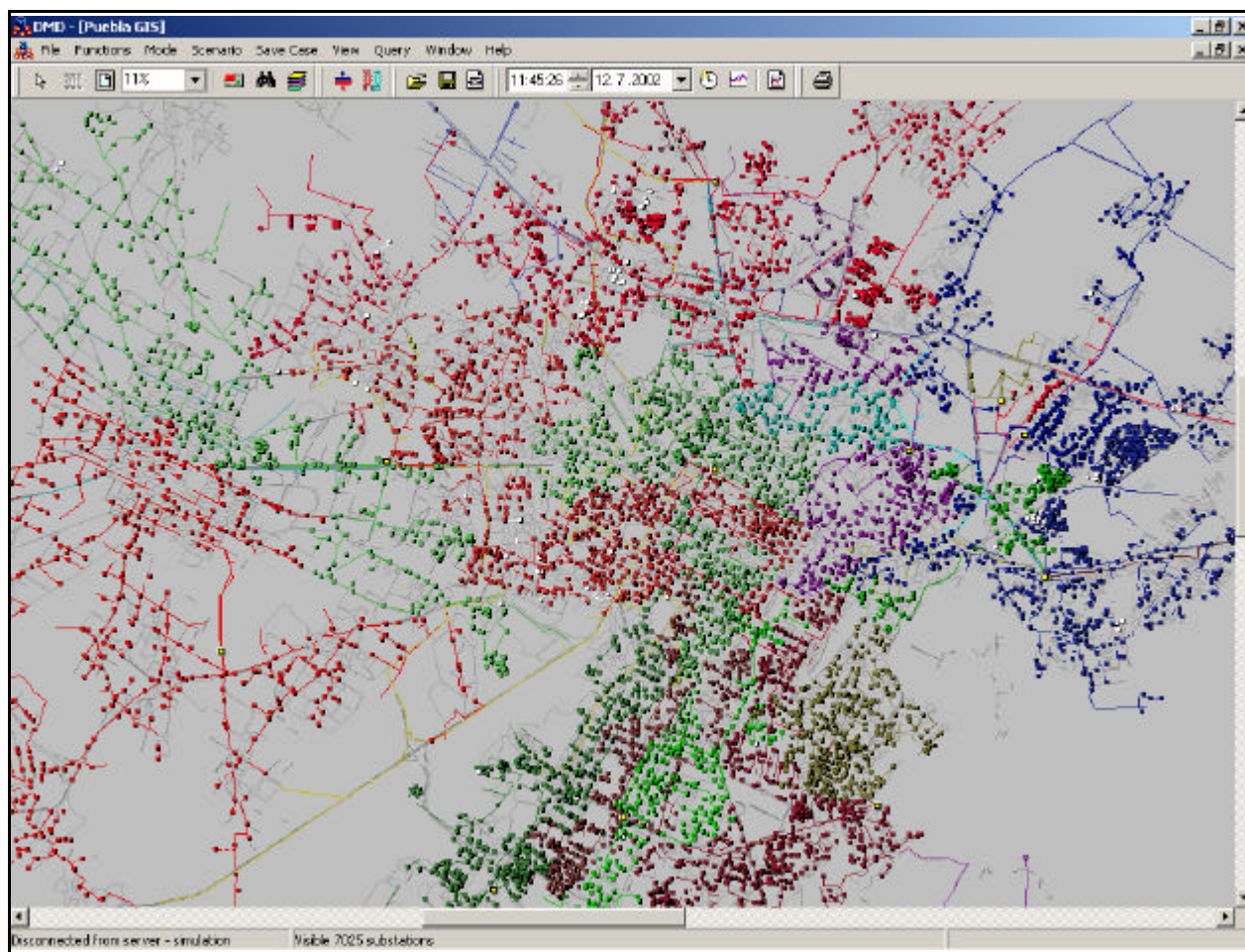
Na kraju proračuna, gubici snage/energije se klasifikuju po elementima, naponskim nivoima, delovima distributivne mreže (deo distributivne mreže napajan preko jednog VN/SN transformatora ili gubici po izvodima), kao i ukupni gubici u distributivnoj mreži. Ovi gubici se daju kao gubici aktivne i reaktivne energije, podeljeni na fiksne i varijabilne, odnosno ukupni, kao što je to specificirano u drugoj glavi rada.

#### 4. PRIMER PRORAČUNA

U ovom delu je prikazan primer proračuna na jednoj mreži, gde su kao podloga korišćeni podaci realne mreže grada od 3,5 miliona stanovnika (Pueblo/Meksiko). Na slici 3 je prikazana geografska šema mreže ovog grada. Ova mreža ima oko 14 000 SN/NN transformatora i oko 36 000 čvorova. Razmatrana mreža obuhvata VN/SN postrojenja, SN



Slika 2. Prikaz intervala za proračun gubitaka po sezonama



Slika 3. Distributivna mreža grada Puebla

Energy Losses

Beginning of the period: 1.11.2003 End of the period: 1.12.2003 Run

Summary Active Energy Losses Reactive Energy Losses Elements

Object	WP Injected [kWh]	WQ Injected [kVarh]	WPLoss [kWh]	WPLoss [%]	WQLoss [kVarh]	WQLoss [%]
PBU	1.667845E7	8656805	713493	4.278	879737	10.162
PBU T-1	8485200	4271412	327461	3.859	296514	6.942
PBU04110	1041750	469000	34085	3.272	-21677	-2.081
PBU04120	2171271	937117	83552	3.848	-80784	-3.721
PBU04130	1403027	555219	56047	3.995	-101544	-7.238
PBU04340	2263055	1015471	74674	3.300	-50272	-2.221
PBU04150	1581308	714600	54317	3.435	-29213	-1.847
PBU T-2	8008785	4268539	292200	3.648	510294	11.955
PBU Tr 3	106632	-271021	26635	24.979	-309786	114.303
PBU Tr 4	13472	5539	13472	100.000	5539	100.000
PBU Tr 5	22608	-6055	14582	64.502	-9942	164.207
PBU Tr 6	18713	-39631	16095	86.010	-40899	103.200
PBU T-4	23047	428019	23047	100.000	428019	100.000

Print Close

Slika 4. Izveštaj o proračunu gubitaka na mreži Puebla

mrežu i transformatorske stanice SN/NN zaključno do NN sabirnica. Mreža je neuravnotežena, što znači da ima monofaznih, dvofaznih i trofaznih elemenata (vodova, transformatora, ...), te su na ovoj mreži primenjeni proračuni za neuravnotežene mreže, koji su po svom obimu oko 3 puta veći nego da je u pitanju trofazna uravnotežena mreža.

Period od mesec dana (od 1. novembra 2003. godine do 1. decembra 2003. godine) je izabran kao period od interesa za proračune. Ovaj period se nalazi unutar iste sezone. Pri proračunima u tom periodu, korišćen je po jedan karakterističan dan za radne dane, subotu i nedelju, dok praznika nije bilo. Tako je proračun za ovaj period izveden za ukupno tri karakteristična dana, pri čemu je za svaki od dana rađen proračun po 24 puta. Pri tome nije bilo promene uklopnog stanja u ovoj mreži, pa je za analizu gubitaka urađeno ukupno 72 proračuna (3x24). Proračun traje oko 60 sekundi na računaru Pentium 4 od 1,7 GHz.

Na slici 4 su prikazani rezultati u formi izveštaja za ovu funkciju.

Dijalog izveštaja se sastoji od stabla na levoj strani, na kome se može selektovati objekat za koji se želi prikaz rezultata (cela mreža, određena transformatorska stanica VN/SN, ...) i panela sa tab kontrolama na desnoj strani.

Stablo sa leve strane dijaloga je organizovano u četiri hijerarhijska nivoa:

- Cela mreža.
- Sve VN/SN transformatorske stanice u mreži.
- VN/SN transformatori koji pripadaju ovim stanicama.
- Izvodi koji se napajaju sa ovih VN/SN transformatora.

Na desnom panelu, izveštaj je podeljen na četiri taba: Ukupni gubici, Gubici aktivne energije, Gubici reaktivne energije i Elementi.

- Prvi tab „Ukupni gubici” se koristi za prikaz ukupnih gubitaka preuzete i ukupnih gubitaka prodate energije, ukupne gubitke aktivne i reaktivne energije.
- Drugi tab „Gubici aktivne energije” se koristi za prikaz rezultata gubitaka aktivne energije. Ovi gubici se daju kako u apsolutnom iznosu, tako i u relativnom iznosu. Relativan iznos se proračunava u odnosu na preuzetu energiju na selektovanom elementu.
- Treći tab „Gubici reaktivne energije” se koristi za prikaz gubitaka reaktivne energije.
- Četvrti tab „Elementi” se koristi za prikaz gubitaka aktivne i reaktivne energije na određenom elementu.

Iz izveštaja sa slike 4 nije teško zaključiti da, kao jedan od rezultata proračuna, dobija iscrpna klasifikacija gubitaka po svim elementima distributivne

mreže. Na taj način se vrlo lako mogu identifikovati konkretni elementi koji su kritični po vrednostima tehničkih gubitaka i preduzeti mere za njihovo smanjenje. Interesantan je npr. detalj iz izveštaja o gubicima u mreži koja se napaja sa transformatora u TS PBU (PBU je skraćenica za Pueblo). Kod prvog transformatora PBU T-1 aktivni gubici u mreži koja se napaja sa tog transformatora iznose 4,278 % (tu su uključeni gubici u tom transformatoru, njegovim izvodima i transformatorima SN/NN koji se napajaju sa tih izvoda), što su relativno mali gubici. Za razliku od toga kod nekih transformatora npr. PBU T-5 i PBU T-4 ti gubici su 64,502 % i 100 %, respektivno, što je dobar i očekivan rezultat, jer je prvi transformator malo opterećen, a drugi je u režimu praznog hoda.

U velikom broju distributivnih kompanija, u bazama podataka postoje samo podaci o VN/SN delovima mreže, zaključno sa NN sabirnicama u transformatorskim stanicama SN/NN. NN mreža je obično predstavljena sumarnom potrošnjom na NN sabirnicama. Činjenica je i da značajan deo ukupnih gubitaka vezan upravo za NN mrežu, te bi bilo pogodno na izvestan način ukazati na delove te mreže gde su gubici veći od očekivanih. U okviru postupka koji je ovde izložen, moguće je doći i do takvih pokazatelja. Pri proračunu režima mreže, kao jedan od rezultata može da bude i isporučena energije po transformatorskim stanicama SN/NN (za sada ovaj podatak nije dat u izveštaju). Ako se taj podatak uporedi sa iznosom prodate energije krajnjim potrošačima (što se može dobiti iz sistema prodaje, ako se zna pripadnost potrošača po transformatorskim stanicama SN/NN), onda na transformatorskim stanicama SN/NN i mreži koja se iz njih napaja, gde se pojavljuju veliki ukupni gubici, treba preduzeti odgovarajuće mere. Te mere obuhvataju pregled NN mreže, da bi se konstatovali eventualni tehnički problemi (npr. neuobičajeno dugački i relativno značajno opterećeni NN izvodi; izrazito nesimetrično opterećeni NN izvodi), kontrola baždarenosti brojila, pa i provera neovlašćene potrošnje.

## 5. ZAKLJUČAK

*U radu je prikazan jedan nov postupak za analizu gubitaka, baziran na korišćenju DMS. Korišćenjem baza podataka, omogućeno je da se, pre svega, distributivna mreža opiše sa vrlo iscrpnim skupom podataka s obzirom na analizu gubitaka. Obrada jednog tako velikog skupa podataka je izvedena efikasno, zahvaljujući čitavom skupu DMS funkcija, sa posebnim naglaskom na funkcije za proračun režima distributivne mreže. Ovaj postupak, pored detaljnog uvida u gubitke po svim konkretnim*

elementima distributivne mreže, omogućuje i da se relativno lako identifikuju kritični elementi, sa staništa tehničkih gubitaka.

Kombinovanje podataka o protoku energije po transformatorskim stanicama SN/NN dobijenim ovde izloženim postupkom, sa podacima o prodatoj energiji po tim transformatorskim stanicama, omogućuje da se preciznije lociraju mesta u distributivnoj mreži gde postoje značajne razlike između isporučene i prodane energije. Izloženi postupak se može na analogan način primeniti i za analizu gubitaka u NN mreži, čime bi se još preciznije mogli locirati gubici i eventualne razlike između isporučene i prodane energije.

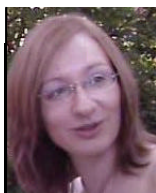
## 6. LITERATURA

- [1] V. Strezoski, D. Popović, D. Bekut, N. Katić, G. Švenda, Z. Gorečan, J. Dujić: OSNOVNE ENERGETSKE FUNKCIJE ZA ANALIZU, UPRAVLJANJE I PLANIRANJE POGONA SREDNJE-NAPONSKIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA, Zbornik radova sa IV Skupa - TRENDOVI RAZVOJA: „NOVE TEHNOLOGIJE U ELEKTRODISTRIBUCIJI”; Kopaonik, 1998, str. 4-17.
- [2] V. Strezoski, D. Popović, D. Bekut, N. Katić, G. Švenda, Z. Gorečan, J. Dujić: OSNOVNE ENERGETSKE FUNKCIJE ZA ANALIZU, UPRAVLJANJE I PLANIRANJE SREDNJE-NAPONSKIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA, JUKO CIGRE; Vrnjačka banja, 2002, ref. br. R-4. 02, str. R-4. 02/1-9.
- [3] N. Rajaković, D. Tasić, M. Stojanović: UPOREDNA ANALIZA RAZLIČITIH PRISTUPA PROCENI GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, JUKO CIGRE, Vrnjačka banja, 2002, Ref. 6-14, str. 99-106.
- [4] M. Kostić: OCENA TAČNOSTI I IZBOR FORMULA ZA PRORAČUN GUBITAKA U ELEKTRIČNIM MREŽAMA, Elektroprivreda, br. 1, 2000, str. 65-75.
- [5] N. Katić: METODA ZA PROCENU GUBITAKA U DISTRIBUCIJI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA KONZUMU ELEKTRODISTRIBUCIJE, JUKO CIGRE, Vrnjačka banja, 1995, Ref. 31-04.
- [6] N. Katić: METODA ZA PROCENU GUBITAKA U DISTRIBUCIJI ELEKTRIČNE ENERGIJE U ELEKTROVOJVODINI, JUKO CIGRE, H. Novi, 1997, Ref. 31-27.
- [7] D. Stojanović, L. Korunović, M. Dočić: PROCENA GUBITAKA SNAGE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA NA BAZI EKVIVALENTNE OTPORNOSTI, JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, 2002, Ref. 6-09, str. 65-70.
- [8] P. Savić, V. Janković, N. Mihajlović: PRORAČUN GODIŠNJIH GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U RADIJALNOM FIDERU 10(20) KV NA OSNOVU PRORAČUNA TOKOVA SNAGA I NAPONSKIH STANJA U MAKSIMALNOM I MINIMALNOM REŽIMU, JUKO CIGRE, Vrnjačka banja, 2002, Ref. 6-13, str. 93-98.

Rad je primljen u uredništvo 04. 02. 2004. godine



**Duško Bekut** je rođen 1962. godine u Novom Sadu. Fakultet tehničkih nauka je završio 1986. godine, dok je 1990. godine magistrirao, a 1994. godine doktorirao na elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1986. godine je zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, gde je sada vanredni profesor. Oblasti rada i angažovanja su vezane za relejnu zaštitu, analizu elektroenergetskih sistema, lokaciju kvara na vodovima, distributivni menadžment sistem, itd.



**Valentina Treskanica** je rođena 1971. godine u Sremskoj Mitrovici. Fakultet tehničkih nauka je završila 1998. godine u Novom Sadu. Zaposlena je u DMS Grupi, kao inženjer elektroenergetike. Radi na proračunima distributivnih mreža i vrlo intenzivno je angažovana na edukaciji domaćih i inostranih stručnjaka iz oblasti distributivnih menadžment sistema.



---

Dragoslav Perić

# Trajanje prekida napajanja i štete usled kvarova u gradskim srednjenaponskim distributivnim mrežama

Originalni naučni rad  
UDK: 621.311.1; 621.316

---

*Rezime:*

*U radu se izvode izrazi za izračunavanje trajanja prekida napajanja električnom energijom i troškova nastalih šteta kod potrošača. Razmatraju se prekidi i štete koji su posledica kvarova na gradskoj srednjenaponskoj mreži i njihova zavisnost od šeme, tehničke opremljenosti, odnosno stepena automatizacije mreže. Izvedeni izrazi mogu se koristiti kao pokazatelj pri poređenju različitih rešenja srednjenaponskih mreža pri njihovom planiranju i eksploataciji, kao i za regulisanje kupoprodajnih odnosa sa potrošačima.*

**Ključne reči:** *srednji napon, distributivni sistemi, trajanje prekida napajanja, štete usled prekida napajanja, automatizacija SN mreže*

---

*Abstract:*

**DURATION AND COSTS OF SUPPLY INTERRUPTION DUE TO FAULT  
IN URBAN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK**

*The expressions for calculation of supply interruption durations and costs are derived in this paper. Interruptions and costs due to fault in urban medium voltage distribution networks and their influence on the schemes, technical solutions, i.e. the network automation level are considered. Derived expressions can be used to compare different solutions of the network for their planning and exploitation as well as for regulation of the sales between consumers and distribution utilities.*

**Key words:** *medium voltage, distribution systems, supply interruption duration, supply interruption costs, MV network automation*

---

## 1. UVOD

Kvarovi na bilo kom od elemenata izvoda srednjenaponske radikalne distributivne mreže (SN mreže) izazivaju delovanje relejne zaštite i isključenje prekidača izvoda, čime svi potrošači priključeni na izvod ostaju bez napajanja sve dok se ne pronade i izoluje element u kvaru i napajanje obnovi korišćenjem osnovnog i rezervnog izvora napajanja [1]. Nakon obnavljanja (opravka ili zamena) elementa u kva-

ru ponovo se uspostavlja osnovno uklopno stanje, pri čemu opet dolazi do prekida napajanja potrošača. Ukupno vreme prekida napajanja usled posledica jednog kvara zavisi od toga koji element je u kvaru, od šeme i tehničke opremljenosti mreže (daljinsko upravljanje, pokazivači kvara itd.) i od organizacije dispečerske službe (broj ekipa koje se angažuju na terenu, plan traženja kvara itd.). U cilju smanjenja trajanja prekida napajanja, uvode se različiti nivoi automatizacije srednjenaponske (SN) mreže [2, 3]

---

*Dr Dragoslav Perić, dipl. el. ing. – Viša elektrotehnička škola, 11 000 Beograd, Vojvode Stepe 283*

Troškovi šteta usled prekida napajanja kod potrošača, zavise u najvećoj meri od vremena trajanja prekida napajanja [4]. Vreme prekida napajanja i odgovarajući troškovi kod potrošača mogu se koristiti kao pokazatelj pri poređenju različitih rešenja SN mreža, kao i za regulisanje kupoprodajnih odnosa sa potrošačima.

## 2. ŠEME GRADSKIH SREDNJENAPONSKIH MREŽA

Gradske srednjenaponske distributivne mreže (SN mreže) po pravilu rade kao radijalne, sa mogućnošću napajanja iz rezervnog izvora. SN mreže se sastoje od izvoda koji se napajaju iz izvorne TS X/SN (izvorna TS) i sastoje se od niza TS SN/NN (TS) SN vodovima povezanih u radijalnu šemu. U cilju standardizacije, teži se da izvod ima što manje ogranaka i da se obezbedi rezervno napajanje celog izvoda iz samo jednog izvora. Ovakva konfiguracija izvoda usvojena je kao pretpostavka u ovom radu.

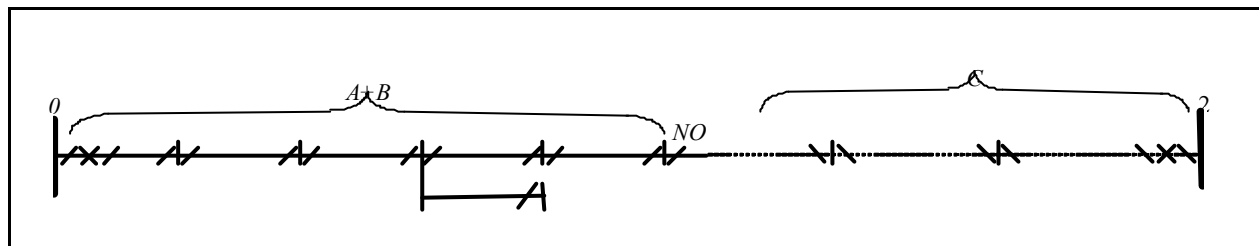
Razmatraju se tri tipične šeme SN mreža, koje se razlikuju prema izvoru rezervnog napajanja (rezervni izvod). Kao rezervni izvod, može da se koristi susedni izvod koji na sebi ima priključene potrošače preko odgovarajućih TS (C), ili se koristi poseban rezervni kabl (C̄), koji na sebi nema priključene potrošače, i obično se koristi kao rezerva za više izvoda. Rezervni izvod može da se napaja iz susedne izvorne TS (D) ili iz iste TS iz koje se napaja i izvod koji se rezerviše (D̄). Na osnovu navedenih kategorija, razlikuju se sledeće šeme modula SN mreža:

1. šema sa međupoveznim vodovima (C̄D),  
 2. šema sa otvorenim polupetljama (C̄D̄),  
 3. šema sa rezervnim kablom iz različite izvorne TS C̄D i  
 4. šema sa rezervnim kablom iz iste izvorne TS (C̄D).

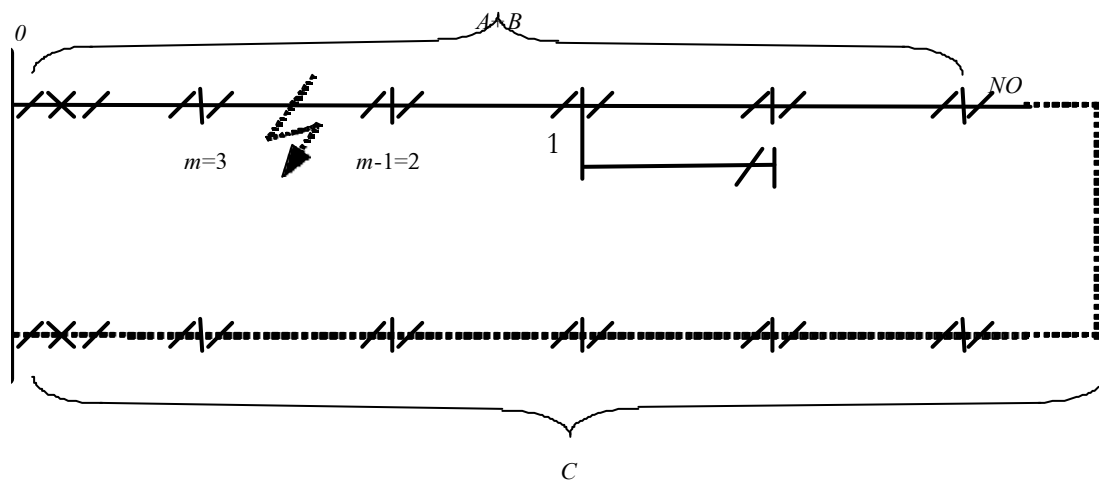
U šemi sa međupoveznim vodovima (slika 1) kao rezervni izvod služi izvod koji se napaja iz susedne izvorne TS, čije su SN sabirnice označene brojem 2. Oznake imaju sledeće značenje:

0 – sabirnice SN u izvornoj TS iz koje se izvod A+B napaja,  
 A+B – izvod SN mreže, A je deo izvoda od mesta kvara do početka izvoda, a B deo od mesta kvara do kraja izvoda,  
 NO – normalno otvoreni rastavljač ili rastavna sklopka na spoju prema rezervnom izvodu,

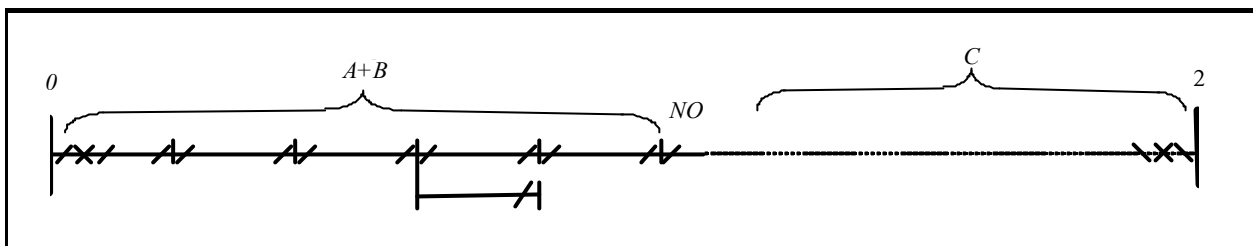
U šemi sa otvorenim polupetljama (slika 2) kao rezervni izvod služi izvod koji se napaja iz iste izvorne TS, čije su SN sabirnice označene brojem 1. Oznake imaju sledeće značenje:



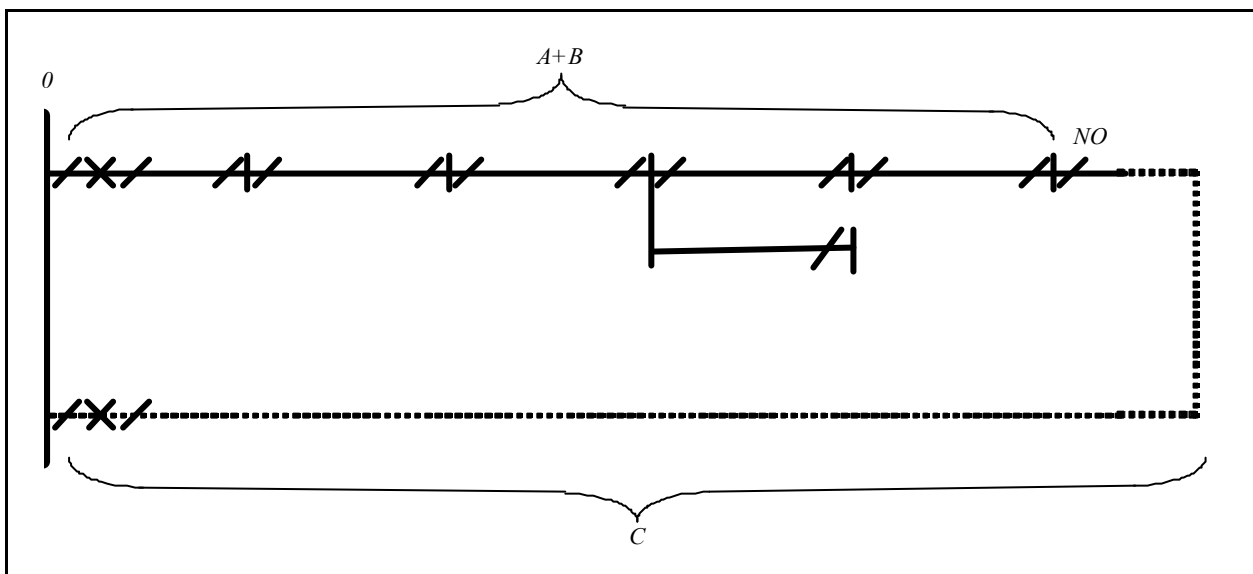
Slika 1. Šema sa međupoveznim vodovima CD



Slika 2. Šema sa otvorenim polupetljama CD



Slika 3. Šema sa rezervnim kablom iz različite izvorne TS ( $\overline{CD}$ )



Slika 4. Šema sa rezervnim kablom iz iste izvorne TS ( $\overline{CD}$ )

C – rezervni izvod - susjedni izvod koji se napaja iz iste izvorne TS i služi kao rezervni izvod izvodu A+B.

U gornjem pregledu šema modula SN mreža u zagradi iza naziva upisana je oznaka - naziv logičke promenljive kojom će se šema označavati u daljem tekstu. Slika 2 prikazuje primer šeme sa otvorenim polupetljama  $\overline{CD}$ .

U šemi sa rezervnim kablom iz različite izvorne TS, (slika 3), i iz iste izvorne TS (slika 4) rezervni kabl predstavlja izvor rezervnog napajanja za više, obično 4 do 8 izvoda, a na slici je prikazan samo jedan od tih izvoda.

U primerima šema na prethodnim slikama izvodi SN mreže imaju po jedan ogranak, a sva dalja razmatranja u ovom radu podjednako se odnose na radialne šeme sa manjim brojem ogranaka i bez njih.

### 3. OPREMLJENOST SREDNJENAPONSKIH MREŽA

Izvodi SN mreže mogu da budu opremljeni različitim tehničkim sredstvima i tehnikama koja se koriste prilikom otklanjanja posledica kvarova na izvodu.

Za spoj razmatranog izvoda i rezervnog izvoda postoje dva rešenja:

1. **S** - rastavna sklopka na spoju prema rezervnom izvodu

2. **S̄** - rastavljač na spoju prema rezervnom izvodu.

Tehnike vezane za daljinsko upravljanje su:

1. **R<sub>1</sub>** - daljinsko upravljanje prekidačima izvoda u izvornim TS (**R<sub>CB</sub>**) ili dve ekipe angažovane na otklanjanju posledica kvara (**R<sub>C2</sub>**),

2. **R<sub>S</sub>** - daljinsko upravljanje **R<sub>CB</sub>** i daljinsko upravljanje rastavnim sklopkom na spoju prema rezervnom izvodu,

3. **R<sub>D</sub>** - daljinsko upravljanje **R<sub>CB</sub>** i daljinsko upravljanje svim rastavljačima i rastavnim sklopkom izvoda,

4. **R** - nijedna od navedenih tehnika.

Logički izraz **R** se koristi da označi postojanje daljinskog upravljanja rasklopnim uređajima, odnosno korišćenje jedne od prve 3 navedene tehnike.

Za identifikaciju deonice u kvaru koriste se sledeće tehnike:

1. **I<sub>L</sub>** - lokatori (pokazivači) kvara u svakoj TS,

2. **I<sub>D</sub>** - lokatori kvara sa daljinskim pokazivanjem stanja u svakoj TS,

3.  $I_M$  - ispitivanje koja polovina podeljenog izvoda je u kvaru merenjem izolacije,
4.  $I_M$  - probno uključenje izvoda,
5.  $I_{L1}$  - jedan lokator kvara u TS na polovini izvoda,
6.  $I_{L2}$  - lokatori kvara u svakoj drugoj TS ili mikroprocesorski detektor kvara u izvornoj TS koji na osnovu merenja u režimu kvara određuje deonicu u kvaru,
7.  $I_{D1}$  - lokatori kvara sa daljinskim pokazivanjem stanja u TS na polovini izvoda,
8.  $I_{D2}$  - lokatori kvara sa daljinskim pokazivanjem stanja u svakoj drugoj TS,

Tehnike  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$  koriste se kombinovano sa tehnikama  $I_M$  i  $I$ , tako da ukupan broj tehnika vezanih za identifikaciju deonice u kvaru iznosi  $4+4 \times 2=12$ .

Razmatra se ukupno  $2(C) \times 2(D) \times 2(S) \times 4(R) \times 12(I)=384$  kombinacija šeme i opremljenosti SN mreže.

#### 4. POSTUPCI OTKLANJANJA POSLEDICA KVAROVA U SREDNENAPONSKOJ MREŽI

Izvod SN mreže u kvaru prikazan je na slici 5. Ova šema odnosi se na sve razmatrane šeme SN mreže s obzirom na to da se one razlikuju samo po rezervnom izvodu. Element 1 predstavlja sabirnice SN u izvornoj TS, element 1' sabirnički rastavljač izvoda, dok je sa CB označen prekidač izvoda. Elementi 5, 9 i 13 su sabirnice SN u TS, na koje se priključuju potrošači. Elementi 2, 4, 6, 8, 10, 12 i 14 su rastavljači, a element 16, koji se nalazi na spoju prema rezervnom izvodu je rastavljač (S) ili rastavna sklopka (Š), zavisno od izabranog rešenja. Deonice vodova su označene sa 3, 7, 11 i 15. Ukoliko postoje, lokatori kvara se po pravilu postavljaju u svaku TS, kako bi pokazivali da li je struja kvara prošla kroz tu TS prema sledećoj deonici voda. Stanje pokazivača kvara može da se vidi spolja, tako da ekipa nema potrebe da ulazi u TS radi probnog uključanja ili merenja izolacije, što značajno smanjuje vreme traženja elementa u kvaru.

Vreme prekida pogona za različite delove izvoda, a samim tim i vreme prekida napajanja potroša-

ča zavisi od opremljenosti SN mreže. Kod SN mreža sa daljinskim upravljanjem svim rasklopnim uređajima ( $R_D$ ) obnavljanje pogona postiže se relativno brzo posle očitavanja stanja lokatora kvara, otvaranja rastavljača najbližih elementu u kvaru i uključanja prekidača izvoda i rastavne sklopke prema rezervnom izvodu. U ostalim slučajevima proces obnavljanja napajanja, detaljno opisan u narednim poglavljima, znatno je složeniji i sporiji.

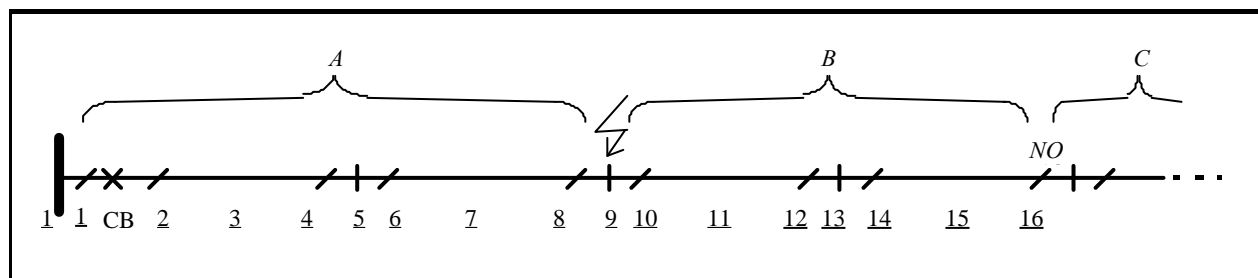
U slučajevima kada ne postoje lokatori kvara, deonica u kvaru se traži sukcesivnim deljenjem izvoda na pola otvaranjem rastavljača u TS. Ako se izvod sastoji od n deonica, broj deljenja i odgovarajućih ispitivanja koja od polovina sadrži element u kvaru potrebnih da se identifikuje element u kvaru je:

$$m = \frac{\ln n}{\ln 2} \quad (1)$$

gde uglaste zagrade označavaju prvi veći ceo broj od izraza u zagradama.

Pretpostavimo, na primer, da je u kvaru deonica broj 7 (slika 5). Deo A tada čine elementi od 1 do 6, a deo B elementi od 8 do 16. Izvod se deli na pola otvaranjem rastavljača 8. Uključivanjem prekidača CB ili merenjem izolacije utvrđuje se da je u kvaru deo izvoda od rastavljača 8 do izvorne TS. Otvaranjem rastavljača 6 i ponovnim probnim uključanjem ili merenjem izolacije, definitivno se utvrđuje da je kvar na deonici 7.

Eventualni kvar na opremi u TS (sabitrice SN i oprema vezana za sabirnice) utvrđuje se prilikom ulaska u TS. Kako su ovakvi kvarovi znatno ređi od kvarova na deonicama vodova, a njihove posledice uglavnom vidljive, identifikacija ovakvih kvarova obično se svodi na vizuelni pregled. Čak i ako vizuelnim pregledom dođe do greške, zaključuje se da je u kvaru susedna deonica. Greška će se uvideti prilikom pokušaja obnavljanja pogona te deonice, bez značajnih posledica (jer je pokušaj obnavljanja napajanja ekvivalentan probnom uključanju) i bez velikog gubitka vremena. Zato će se dalja razmatranja zasnivati na identifikaciji i izolovanju deonice u kvaru, a dobijeni rezultati će generalno važiti i za slučajeve kvarova na opremi u TS.



Slika 5. Izvod SN mreže u kvaru

## 5. VREME PREKIDA NAPAJANJA

Prilikom kvara i otklanjanja posledica kvara na izvodnu SN mreže dolazi do više prekida napajanja potrošača koji se napajaju sa izvoda. Ovi prekidi se mogu razvrstati u sledeće karakteristične periode:

- vreme identifikacije deonice u kvaru,
- vreme prekida napajanja posle kvara,
- vreme prekida napajanja posle opravke.

### 5.1. Vreme identifikacije deonice u kvaru

Vreme identifikacije deonice u kvaru je vreme od trenutka nastanka kvara, praćenog isključenjem izvoda od strane relejne zaštite, do dobijanja informacije o tome koja je deonica u kvaru i otvaranja rastavljača na jednom kraju deonice. U nastavku teksta prvo se razmatra ovo vreme kada ne postoji daljinsko upravljanje rastavljačima izvoda ( $\mathbf{R}_D$ ).

Kada se ne primenjuju lokatori kvara već samo probno uključenje ili merenje izolacije, vreme identifikacije deonice u kvaru  $\tau'_I$  izračunava se iz izraza:

$$\tau'_I = t_p + m t_e + (t_s + \bar{R} \bar{I}_M t_m) \quad (2)$$

$$t_e = \frac{t_m + t_1}{2} + t + 2t_s + I_M t_M + \bar{I}_M (\mathbf{R}_I + \mathbf{R}_S) t_r + \bar{R} t_m + t_s + t_m \quad (3)$$

gde je:

- $t_p$  - pripremno vreme ekipe,
- $t_e$  - vreme svih aktivnosti vezanih za jedno mesto podele izvoda,
- $t_s$  - vreme promene uklopnog stanja rasklopnog uređaja lokalnom komandom,
- $t_r$  - vreme promene uklopnog stanja rasklopnog uređaja lokalnom komandom ili vreme pristizanja i tumačenja daljinski dobijene informacije,
- $t_m$  - vreme kretanja ekipe sa kraja izvoda do TS približno na polovini izvoda,
- $t_1$  - vreme kretanja ekipe sa jednog na drugi kraj deonice izvoda,
- $\Delta t$  - vreme „svraćanja” ekipe u neku TS (usporavanje, zaustavljanje, ponovno pokretanje i ubrzanje).

Logički simboli u (2) i (3) imaju vrednost 0 ili 1 (u zavisnosti od toga da li se ima odgovarajuća situacija) i na njih se primenjuje Bulova algebra.

Prvi član u (3) odnosi se na vreme kretanja ekipe vezano za jedno mesto podele izvoda. Na prvo mesto podele izvoda ekipa putuje vreme  $t_m$ , potom se ovo vreme postepeno smanjuje sve do poslednjeg mesta gde ekipa putuje vreme  $t_1$  - zato je kao vreme putovanja uzeto srednje vreme  $(t_m + t_1)/2$ . Prvi član

je korigovan vremenom  $\Delta t$ , koje ekipa provede na svraćanju u TS. Drugi član se odnosi na dve obavezne operacije promene uklopnog stanja u TS, otvaranje rastavljača radi polovljenja izvoda pre ispitivanja koja polovina je u kvaru i njegovo zatvaranje nakon ispitivanja, otuda  $2t_s$ . Treći član u (3) odnosi se na vreme potrebno za ispitivanje koja polovina izvoda sadrži deonicu u kvaru, kada se primenjuje merenje izolacije. Četvrti član u (3) odnosi se na vreme potrebno za ispitivanje koja polovina izvoda sadrži deonicu u kvaru, kada se primenjuje probno uključenje. Kada postoji daljinsko upravljanje prekidačima izvoda, dovoljno je da se obavi daljinsko probno uključenje, što objašnjava član  $(\mathbf{R}_I + \mathbf{R}_S) t_r$ . Kada ne postoji daljinsko upravljanje prekidačima izvoda a primenjuje se probno uključenje, ekipa odlazi na početak izvoda, obavlja probno uključenje prekidača izvoda, i vraća se na mesto podele izvoda, što objašnjava član  $\bar{R}(t_m + t_s + t_m)$ .

Prva dva člana u (2) odnose se na pripremno vreme ekipe i m aktivnosti vezanih za jedno mesto podele izvoda. Poslednji član u (2) predstavlja korekciju za poslednje mesto podele izvoda, kada se već dobija informacija o deonici u kvaru. Tada rastavljač na polovini izvoda ostaje otvoren, a u situaciji kada nema daljinskog upravljanja prekidačima izvoda, a primenjuje se probno uključenje, ekipa ostaje na početku izvoda - drugim rečima, poslednji ciklus  $t_e$  se ne izvršava u potpunosti.

Kada se primenjuje samo jedan pokazivač kvara u sredini izvoda ( $\mathbf{I}_{L1}$ ) vreme identifikacije deonice u kvaru izračunava se iz izraza:

$$\tau'_I = t_p + t + (m - 1)t_e + (t_s + \bar{R} \bar{I}_M t_m) \quad (4)$$

gde je smanjenje vremena identifikacije postignuto smanjenjem broja podele izvoda u kvaru na  $(m-1)$ . Pre toga, ekipa treba da svrati do lokatora kvara, što je obuhvaćeno članom  $\Delta t$ .

Kada se primenjuje samo jedan pokazivač kvara sa daljinskom dojavom u sredini izvoda ( $\mathbf{I}_{D1}$ ) vreme identifikacije deonice u kvaru izračunava se iz izraza:

$$\tau'_I = t_r + t_p + (m - 1)t_e + (t_s + \bar{R} \bar{I}_M t_m) \quad (5)$$

gde je članom  $t_r$  obuhvaćeno vreme pristizanja i tumačenja informacije o položajima lokatora kvara.

Pri primeni lokatora kvara u svakoj TS ( $\mathbf{I}_L$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru je:

$$\tau'_I = t_p + \frac{n}{2} + t_1 + t_1 + t_s \quad (6)$$

Ekipa se posle pripremnog vremena kreće duž izvoda, kontrolišući stanje lokatora kvara. General-

no je ispravno prvih  $n/2$  deonica, što znači da je  $n/2$  lokatora kvara pokazalo proticanje struje kvara, a ekipa treba da produži do prvog sledećeg lokatora, koji nije aktiviran, što objašnjava član  $(n/2+1)t_I$ . Potom se ekipa vraća na drugi kraj deonice i lokalno isključuje rastavljač, što objašnjava ostatak izraza.

Pri primeni lokatora kvara u svakoj drugoj TS ( $\mathbf{I}_{L2}$ ) postupak je nešto izmenjen, a vreme identifikacije deonice u kvaru se izračunava iz izraza:

$$t'_I = t_p + \frac{n}{2} \cdot 2 \cdot t_1 + (t_1 + t_s) \cdot \mathbf{I}_M t_M + (\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_S) \bar{\mathbf{I}}_M t_r + \bar{\mathbf{R}} \bar{\mathbf{I}}_M t_m + t_s \quad (7)$$

Idući do prvog sledećeg lokatora koji nije aktiviran, ekipa treba da produži još dve deonice, što objašnjava promenu u članu  $(n/2+2)t_I$ . Potom se ekipa vraća u TS između dve deonice, od kojih je jedna u kvaru i lokalno isključuje rastavljač, što objašnjava vreme  $t_I+t_s$ . Ostatak izraza odnosi se na vreme ispitivanja koja od dve deonice je u kvaru, a njihovo objašnjenje je dato u okviru opisa izraza (3). Razlika se pojavljuje jedino u poslednjem članu, jer se ekipa ne vraća na početak izvoda.

U situacijama kada se primenjuju lokatori kvara sa daljinskom dojavom u svakoj TS ( $\mathbf{I}_D$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru iznosi:

$$t'_I = t_r + t_m + t_s \quad (8)$$

Ekipa posle dobijanja informacije o stanju lokatora kvara odlazi do deonice u kvaru i isključuje rastavljač na jednom od njenih krajeva.

U situacijama kada se primenjuju lokatori kvara sa daljinskom dojavom u svakoj drugoj TS ( $\mathbf{I}_{D2}$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru iznosi:

$$t'_I = t_r + (t_p + t_m + t_s) \cdot \mathbf{I}_M t_M + (\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_S) \bar{\mathbf{I}}_M t_r + \bar{\mathbf{R}} \bar{\mathbf{I}}_M t_m + t_s \quad (9)$$

Posle vremena  $t_r$  dobija se informacija o stanju lokatora kvara i identifikuju se dve susedne deonice, od kojih je jedna u kvaru. Potom ekipa posle pripremnog vremena odlazi u TS između dve deonice, od kojih je jedna u kvaru i lokalno isključuje rastavljač, što objašnjava vreme  $t_p+t_m+t_s$ . Ostatak izraza odnosi se na vreme ispitivanja koja od dve deonice je u kvaru, a njihovo objašnjenje je dato u okviru opisa izraza (3).

Kada se primenjuje daljinsko upravljanje svim rasklopnim uređajima sa probnim uključanjem  $\mathbf{R}_D$ , za traženje deonice u kvaru primenjuje se samo probno uključanje, jer merenje izolacije zahteva izlazak ekipa na teren.

Kada se ne primenjuju lokatori kvara, već samo probno uključanje ( $\mathbf{I}_M$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru je:

$$t'_I = t_r + 3mt_r + t_r + 3mt_r \quad (10)$$

Pristizanje informacije o pokazivanju lokatora kvara objašnjava prvi član izraza. Potom se za svako mesto podele izvoda daljinski obavlja isključenje rastavljača na izvodu, probno uključanje i isključenje rastavljača, što objašnjava drugi član izraza. Na poslednjem mestu podele izvoda, rastavljač se ne uključuje, što objašnjava i poslednji član izraza, sa negativnim predznakom.

Pri primeni lokatora kvara u svakoj TS ( $\mathbf{I}_L$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru je:

$$t'_I = t_p + \frac{n}{2} \cdot 1 \cdot t_1 + t_r \quad (11)$$

gde je objašnjenje postupka analogno onom uz izraz (6).

Pri primeni lokatora kvara u jednoj TS na sredini izvoda ( $\mathbf{I}_{L1}$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru je:

$$t'_I = t_p + t_m + (m-1) \cdot 3t_r + t_r \quad (12)$$

Ekipa posle pripremnog vremena odlazi na polovinu polovine izvoda koja sadrži deonicu u kvaru (iza prve ili treće četvrtine izvoda). Potom se  $m-1$  puta obavljaju daljinski potrebna rukovanja rasklopnom opremom, kako bi se utvrdila deonica u kvaru. Poslednji član predstavlja korekciju jer se pri poslednjem ispitivanju rastavljač ne zatvara.

Pri primeni lokatora kvara u svakoj drugoj TS ( $\mathbf{I}_{L2}$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru je:

$$t'_I = t_p + \frac{n}{2} \cdot 2 \cdot 2t_r \quad (13)$$

Prva dva člana predstavljaju vreme potrebno ekipi da obiđe lokatore kvara, kao što je objašnjeno uz izraz (7). Poslednji član opisuje vreme za koje se daljinskim rukovanjem rasklopnom opremom utvrđuje koja od dve deonice je u kvaru (otvaranje rastavljača između dve deonice i probno uključanje).

Pri primeni lokatora kvara sa daljinskim pokazivanjem stanja u svakoj TS ( $\mathbf{I}_D$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru iznosi:

$$t'_I = 2t_r \quad (14)$$

što odgovara vremenu potrebnom da informacija o pokazivanju lokatora stigne u centar upravljanja i da se daljinski isključi rastavljač.

Pri primeni lokatora kvara sa daljinskim pokazivanjem stanja u jednoj TS na sredini izvoda ( $\mathbf{I}_{D1}$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru iznosi:

$$t'_I = t_r (m-1) + 3t_r \quad t'_r = (m-1) + 3t_r \quad (15)$$

Posle pristizanja informacije o pokazivanju lokatora kvara, na polovini izvoda koji sadrži deonicu u kvaru  $m-1$  puta treba obaviti operacije za utvrđivanje dela izvoda u kvaru (otvaranje, probno uključanje i zatvaranje rastavljača - otuda  $3t_r$ ). Poslednji član predstavlja korekciju, u jer se pri poslednjem ispitivanju rastavljač ne zatvara.

Pri primeni lokatora kvara sa daljinskim pokazivanjem stanja u svakoj drugoj TS ( $\mathbf{I}_{D2}$ ), vreme identifikacije deonice u kvaru iznosi:

$$t'_I = t_r + 2t_r \quad (16)$$

Prvi član označava vreme pristizanja informacije o pokazivanju lokatora kvara. Drugi član opisuje vreme za koje se daljinskim rukovanjem rasklopnom opremom utvrđuje koja od dve deonice je u kvaru (otvaranje rastavljača između dve deonice i probno uključanje).

## 5.2. Vreme prekida napajanja posle kvara

Posle identifikacije deonice u kvaru pristupa se njenom izolovanju, odnosno otvaranju i drugog rastavljača na kraju deonice. Potom se obnavlja napajanje delova A i B izvoda u kvaru, pri čemu je u nekim slučajevima neophodno izvesno vreme prekinuti i napajanje deonice C. U situacijama kada je potrebno doneti odluku da li prvo napajati deo A ili deo B izvoda u kvaru, usvajano je bolje rešenje, uz pretpostavku da su potrošači priključeni na različite TS imaju približno iste instalisane snage i jedinična cena neisporučene energije.

Kada se primenjuje daljinsko upravljanje rasklopnim uređajima ( $\mathbf{R}$ ), vremena prekida napajanja posle kvara izračunavaju se iz sledećih izraza:

$$t'_A = t'_I + \overline{QI}_M t_r + \mathbf{Q} \mathbf{R}_D t_r + \overline{R}_D t_1 + t_s + \mathbf{Q} t_r \quad (17)$$

$$t'_B = t'_A + \mathbf{R}_S t_r + \overline{R}_S \mathbf{S} \mathbf{R}_1 t_m + t_s + \overline{Q} \mathbf{R}_S t_r + \overline{R}_S \mathbf{S} \mathbf{R}_1 t + t_s + \overline{S} 2t_r \quad (18)$$

$$t'_C = \mathbf{C} \overline{S} \mathbf{R}_D t_r + \overline{R}_D t_s + t_r \quad (19)$$

gde su:

$\tau'_A, \tau'_B, \tau'_C$  - vremena prekida napajanja posle kvara delova izvoda A, B i C, respektivno,

$\mathbf{Q}, \overline{Q}$  - logički izrazi koji označavaju situacije kada se kvar nalazi na deonici koja se od poslednjeg mesta podele izvoda prostire prema izvornoj TS ( $\mathbf{Q}$ ), odnosno prema rezervnom izvodu ( $\overline{Q}$ ),

Obnavljanje napajanja dela A obavlja se posle identifikacije deonice u kvaru, što pokazuje prvi član izraza (17). U situaciji  $\mathbf{Q}$ , kada se primenjuje probno uključanje, deo A je napojen sa završetkom identifikacije deonice u kvaru, a kada se ne primenjuje probno uključanje, da bi se obnovilo napajanje dela A, potrebno je daljinski uključiti prekidač izvoda, što objašnjava drugi član izraza. U situaciji  $\overline{Q}$ , kada postoji daljinsko upravljanje rastavljačima u TS, daljinski se isključuje rastavljač na drugom kraju deonice, a kada pomenuto daljinsko upravljanje ne postoji, ekipa odlazi na drugi kraj deonice i lokalno isključuje rastavljač, što objašnjava drugi član izraza (17). Poslednji član ovog izraza odnosi se na situaciju  $\mathbf{Q}$  i daljinsko uključanje prekidača izvoda kojim se uspostavlja napajanje dela A.

Obnavljanje napajanja dela B, obavlja se posle obnavljanja napajanja dela A, što pokazuje prvi član izraza (18). Kada postoji daljinsko upravljanje rasklopnim uređajem na spoju sa rezervnim izvodom, njegovim daljinskim uključanjem uspostavlja se napajanje dela B, a ako ono ne postoji ekipa odlazi do uređaja i lokalno ga uključuje ( $t_m + t_s$ ). U situaciji  $\mathbf{Q}$ , potrebno je pre opisanog uključanja isključiti rastavljač na drugom kraju deonice u kvaru, što objašnjava treći član izraza (18). Poslednji član ovog izraza odnosi se na situaciju kada se na spoju sa rezervnim izvodom nalazi rastavljač, pa je pre njegovog uključanja neophodno isključiti, a potom ponovo uključiti rezervni izvod. Trajanje isključenja rezervnog izvoda, odnosno dela C, dato je izrazom (19), pri čemu se ne smatra da postoji prekid napajanja ako se koristi rezervni kabl, jer na njega nisu priključeni potrošači. Prva dva člana ovog izraza odnose se na uključanje rastavljača na spoju sa rezervnim izvodom, a treći član na daljinsko uključanje rezervnog izvoda.

Kada se ne primenjuje daljinsko upravljanje, niti se angažuju dve ekipe i pri tome se ne primenjuje probno uključanje izvoda, a postoji rastavna sklopka na spoju prema rezervnom izvodu ( $\mathbf{RIS}$ ), vremena prekida napajanja izračunavaju se preko izraza:

$$t'_B = t'_I + t_m + t_s + \overline{Q} \mathbf{A} t + t_s \quad (20)$$

$$t'_A = t'_B + t_f + t_s + \mathbf{Q} \mathbf{A} t + t_s \quad (21)$$

$$t'_C = 0 \quad (22)$$

gde je  $t_f$  vreme kretanja ekipe od početka (izvorne TS) do kraja izvoda (spoja sa rezervnim izvodom).

U ovoj situaciji prvo se obnavlja napajanje dela B, jer se time postiže ukupno racionalnije kretanje ekipe. Posle identifikacije deonice u kvaru ekipa odlazi do spoja sa rezervnim izvodom i zatvara rastavnu sklopku, što objašnjava prva dva člana izraza (20). poslednji član ovog izraza odnosi se na situaciju **Q**, kada ekipa prethodno svraća da isključi rastavljač na drugom kraju deonice u kvaru. Napajanje dela A obavlja se posle napajanja dela B, time što ekipa odlazi sa kraja na početak izvoda i uključuje ga, što objašnjava prva dva člana izraza (21). Treći član ovog izraza odnosi se na situaciju **Q**, kada ekipa prethodno svraća da isključi rastavljač na drugom kraju deonice u kvaru. Napajanje rezervnog izvoda se ne prekida (22), jer se koristi rastavna sklopka.

Kada se ne primenjuje daljinsko upravljanje, niti se angažuju dve ekipe i pri tome se ne primenjuje probno uključivanje izvoda, a ne postoji rastavna sklopka na spoju prema rezervnom izvodu ( $\overline{\mathbf{RIS}}$ ), vremena prekida napajanja dela A izračunava se preko izraza:

$${}'_A \quad {}'_I \quad t_m \quad t_s \quad \mathbf{Q} \quad \ddot{A}t \quad t_s \quad (23)$$

u kome se prva dva člana odnose na vreme identifikacije deonice u kvaru i vreme potrebno da ekipa ode na početak izvoda i uključi ga. Treći član izraza se pojavljuje u situaciji **Q**, kada ekipa svraća na drugi kraj deonice u kvaru i isključuje rastavljač.

Vreme prekida napajanja delova B i C zavisi od šeme mreže. Kada se rezervni izvod napaja iz različite izvorne TS (**D**), ova vremena se izračunavaju iz izraza:

$${}'_B \quad {}'_A \quad t_{2f} \quad t_s \quad \ddot{A}t \quad t_s \quad 2t_f \quad t_s \quad (24)$$

$${}'_C \quad \mathbf{C} \quad 2t_f \quad t_s \quad (25)$$

gde je  $t_{2f}$  vreme kretanja ekipe od početka izvoda do početka rezervnog. Posle obnavljanja napajanja dela A, ekipa odlazi sa početka izvoda na početak rezervnog izvoda i isključuje ga, što objašnjava prva dva člana izraza (24), pri čemu ekipa svraća na drugi kraj deonice u kvaru i isključuje rastavljač, što objašnjava treći član istog izraza. Najzad, ekipa odlazi do spoja dva izvoda, uključuje rastavljač i vraća se na početak rezervnog izvoda i uključuje ga, što objašnjava poslednji član izraza (24). Tokom vremena opisanog ovim članom traje prekid napajanja rezervnog izvoda u šemi sa međupoveznim vodovima (25).

Kada se rezervni izvod napaja iz iste izvorne TS (**D**), vremena prekida napajanja delova B i C izračunavaju se iz izraza:

$${}'_B \quad {}'_A \quad t_s \quad 2t_f \quad t_s \quad \ddot{A}t \quad t_s \quad (26)$$

$${}'_C \quad \mathbf{C} \quad 2t_f \quad t_s \quad \ddot{A}t \quad t_s \quad (27)$$

Posle obnavljanja napajanja dela A, ekipa u izvornoj TS isključuje rezervni izvod, što objašnjava prva dva člana izraza (26). Potom ekipa odlazi na spoj sa rezervnim izvodom, gde uključuje rastavljač i vraća se u izvornu TS, gde uključuje rezervni izvod, što objašnjava treći član izraza, pri čemu ekipa svraća na drugi kraj deonice u kvaru i isključuje rastavljač, što objašnjava poslednji član istog izraza. Tokom vremena opisanog sa poslednja dva člana izraza (26) traje i prekid napajanja rezervnog izvoda, odnosno dela C, što opisuje izraz (27) uz uvažavanje činjenice da na rezervnom kablju nema potrošača.

Najzad, kada se ne primenjuje daljinsko upravljanje rasklopnim uređajima, a koristi se probno uključivanje ( $\overline{\mathbf{RI}}$ ), postupak završetka izolovanja deonice u kvaru i obnavljanja napajanja zavisi od šeme mreže i od toga da li se primenjuje rastavna sklopka na spoju prema rezervnom napajanju. U mreži sa međupoveznim vodovima i mreži sa rezervnim kablom iz različite izvorne TS i kada nema rastavne sklopke ( $\overline{\mathbf{RISD}}$ ) vremena prekida napajanja se izračunavaju iz izraza:

$${}'_A \quad {}'_I \quad \mathbf{Q} \quad 2t_m \quad t_s \quad (28)$$

$${}'_B \quad {}'_A \quad t_{2f} \quad t_s \quad \overline{\mathbf{Q}} \quad \ddot{A}t \quad t_s \quad 2t_f \quad t_s \quad (29)$$

$${}'_C \quad \mathbf{CD} \quad 2t_f \quad t_s \quad (30)$$

Neposredno nakon identifikacije deonice u kvaru ekipa se nalazi u izvornoj TS, a u situaciji **Q** napajanje dela A je uspešnim probnim uključivanjem već obavljeno. U situaciji  $\overline{\mathbf{Q}}$ , ekipa odlazi do drugog kraja deonice u kvaru, otvara rastavljač, vraća se u izvornu TS i uključuje izvod, što objašnjava drugi član izraza (28). Nakon toga, ekipa izvorne TS odlazi na početak rezervnog izvoda i isključuje ga, što objašnjava prvi i drugi član izraza (29), svraćajući pri tome, u situaciji  $\overline{\mathbf{Q}}$ , do drugog kraja deonice u kvaru kako bi isključila rastavljač, što objašnjava treći član istog izraza. Zatim ekipa odlazi na kraj rezervnog izvoda, uključuje rastavljač, vraća se na početak rezervnog izvoda i uključuje prekidač i time napaja deo B, što objašnjava poslednji član izraza (29). Pome-



nuti član predstavlja vreme prekida napajanja rezervnog izvoda, odnosno dela C, što objašnjava izraz (30) uz uvažavanje činjenice da na rezervnom kablju nema potrošača.

U preostalim situacijama ( $\overline{RISD}$ ) vremena prekida napajanja data su izrazima:

$$'_A \quad 'I \quad \overline{Q} \overline{S} t_s \quad 2 t_f \quad t_s \quad t \quad t_s \quad (31)$$

$$'_B \quad 'I \quad t_f \quad t_s \quad t \quad t_s \quad \overline{S} \overline{Q} t_s \\ t_f \quad t_s \quad t_s \quad (32)$$

$$'_C \quad \overline{CDS} \overline{2} t_f \quad t_s \quad t \quad t_s \quad t_s \quad (33)$$

Posle identifikacije deonice u kvaru napajanje dela A nije obnovljeno samo u situaciji  $\overline{Q}$ . Tada, ako nema rastavne sklopke na spoju prema rezervnom izvodu, ekipa u izvornoj TS isključuje rezervni izvod, što objašnjava član  $\overline{S} t_s$ . Potom ekipa odlazi na spoj dva izvoda i uključuje rasklopni uređaj, vraća se i uključuje prekidač, što objašnjava član  $2(t_f+t_s)$ , pri čemu u prvom kretanju sa kraja na kraj izvoda svraća na kraj deonice u kvaru i gde isključuje rastavljač, što objašnjava poslednji član u srednjoj zagradi. Kada postoji rastavna sklopka, napajanje dela A se obnavlja posle opisanog odlaska sa početka na kraj izvoda, što objašnjava prva tri člana izraza (32). Kada rastavna sklopka ne postoji, napajanje dela B se obnavlja tek posle obnavljanja dela A, uključivanjem rezervnog izvoda, što objašnjava ostatak izraza (32). Opisano trajanje prekida napajanja rezervnog izvoda izračunava se iz izraza (33).

### 5.3. Vreme prekida napajanja posle opravke

Posle obnavljanja (opravke ili zamene) elementa u kvaru pristupa se vraćanju na osnovno uklopno stanje izvoda u kvaru i rezervnog izvoda, koje se odvija u tri faze. U prvoj fazi postupka otvara se rasklopni uređaj koji spaja dva izvoda, čime se rezervni izvod vraća na osnovno uklopno stanje. Pri tome dolazi do prekida napajanja rezervnog izvoda, koje se računa prema izrazu:

$$c_0 \quad \overline{S} \overline{R} \overline{2} t_f \quad t_s \quad \overline{R} \overline{R}_D t_s \quad \overline{R}_D t_r \quad t_r \quad (34)$$

iz koga se vidi da do prekida napajanja dolazi samo kada ne postoji rastavna sklopka na spoju dva izvoda. Kada ne postoji daljinsko upravljanje, ekipa isključuje rezervni izvod, odlazi na spoj dva izvoda i isključuje rastavljač, potom se vraća na početak i uključuje rezervni izvod, što opisuje prvi član izraza. Kada daljinsko upravljanje postoji, rastavljač na

spoju dva izvoda se isključuje lokalno ili daljinski, u zavisnosti od toga da li postoji daljinsko upravljanje rastavljačima izvoda, a potom se rezervni izvod uključuje daljinski, što objašnjava drugi član izraza (34). Pripremno vreme ekipe se ne pojavljuje u ovom izrazu, jer se ekipa priprema pre nego što postupak započne.

U drugoj fazi postupka, isključuje se izvod (koji je bio) u kvaru. Vreme od trenutka uspostavljanja osnovnog uklopnog stanja rezervnog izvoda do trenutka isključenja izvoda u kvaru, izračunava se prema izrazu:

$$B_0 \quad \overline{R} \overline{S} t_f \quad \overline{DS} t_{2f} \quad t_s \quad \overline{R} \overline{R}_S \overline{S} t_m \\ \overline{DS} t_f \quad t_m \quad t_r \quad (35)$$

Ekipa se vraća sa spoja dva izvoda, odnosno sa početka rezervnog izvoda međupoveznog voda i lokalno isključuje izvod, što objašnjava prvi član izraza. Kada postoji daljinsko upravljanje, ali ne i daljinsko upravljanje rasklopnim uređajima na izvodu, sačeka se da ekipa stigne na jedan kraj opravljene deonice, kako se ne bi prerano isključivao deo A, i daljinski se isključi izvod, što objašnjava drugi član izraza (35).

U trećoj fazi postupka vraćanja na osnovno uklopno stanje, zatvaraju se rastavljači koji izoluju obnovljeni element i uključuje se izvod. Deo A izvoda pri tome ostaje bez napajanja za vreme koje se izračunava prema izrazu:

$$A \quad \overline{R} t_m \quad t_s \quad t \quad t_s \quad t_m \quad t_s \\ \overline{R} \overline{R}_D t_s \quad t_l \quad t_s \quad t_r \quad \overline{R}_D \quad 3t_r \quad (36)$$

Kada ne postoji daljinsko upravljanje, ekipa sa početka izvoda odlazi na jedan kraj opravljene deonice i uključuje rastavljač, svraća i na drugi kraj deonice i uključuje rastavljač i vraća se na početak izvoda i uključuje ga, što objašnjava prvi član izraza. Kada postoji daljinsko upravljanje samo prekidačima izvoda, ekipa uključuje rastavljač na jednom kraju opravljene deonice, odlazi na drugi kraj deonice i tamo uključuje rastavljač, posle čega se daljinski uključuje izvod, što objašnjava prvi deo drugog člana izraza (36). Kada postoji daljinsko upravljanje i rastavljačima izvoda, daljinski se uključuju rastavljači na krajevima deonica i prekidač izvoda, što objašnjava poslednji deo drugog člana istog izraza.

Saglasno opisanom postupku vraćanja na osnovno uklopno stanje, vreme prekida napajanja dela B posle opravke kvara iznosi:

$$B \quad C_0 \quad B_0 \quad A \quad (37)$$

a vreme prekida napajanja rezervnog izvoda:

$$C \quad C \quad C_0 \quad (38)$$

gde je uvaženo da na rezervnom izvodu nema potrošača.

#### 5.4. Ekvivalentno vreme prekida napajanja

Za ocenu izvoda sa stanovišta vremena prekida napajanja može da se koristi ekvivalentno vreme

prekida napajanja, kojim se realna situacija u kojoj delovi izvoda A i B ostaju različito vreme bez napajanja svodi na situaciju kvara na sredini izvoda duž koga su potrošači homogeno raspoređeni.

Ekvivalentno vreme prekida napajanja posle kvara izračunava iz izraza:

$$\frac{A+B}{2} \quad C \quad (39)$$

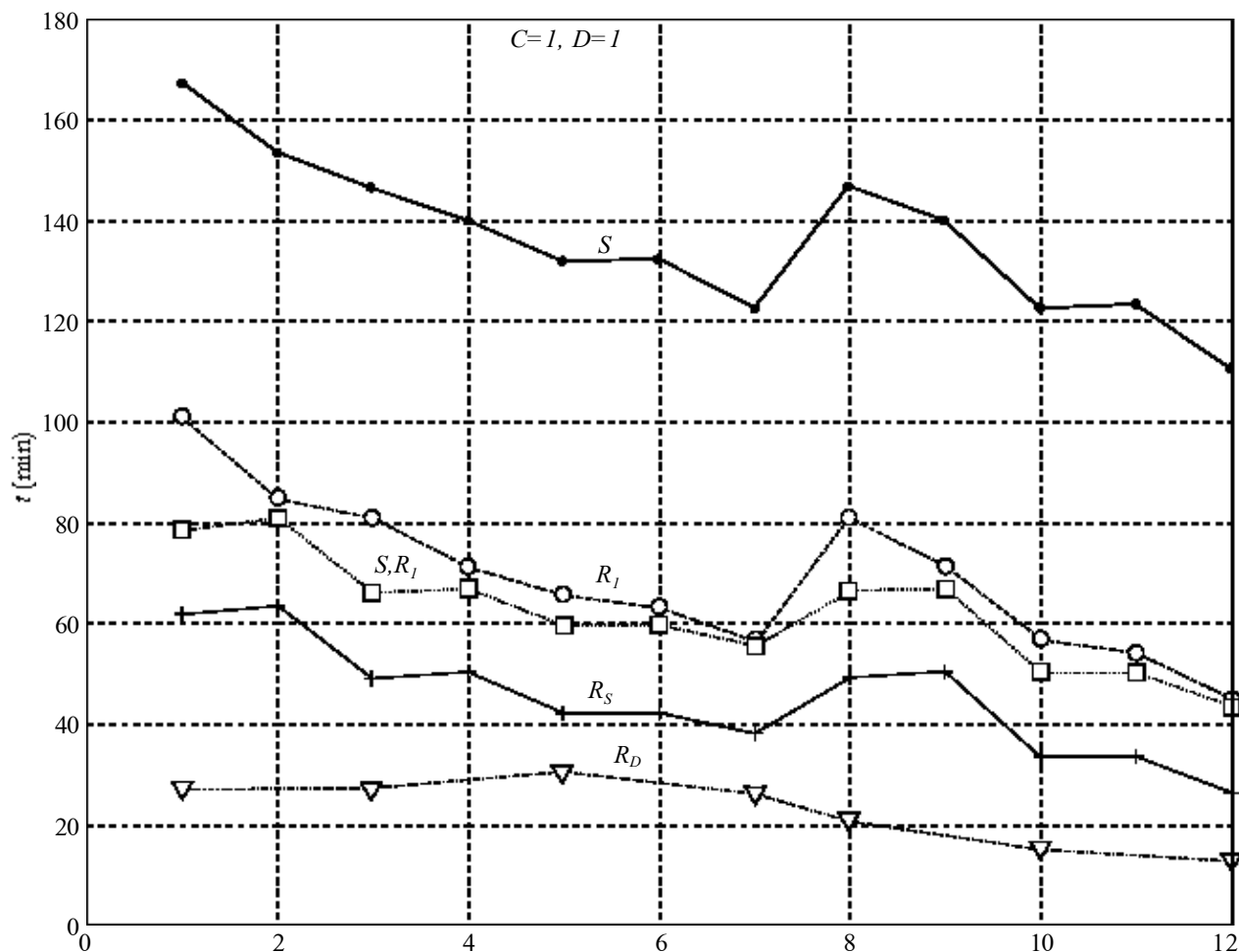
dok prekida napajanja posle opravke važi izraz:

$$\frac{A+B}{2} \quad C \quad (40)$$

Tabela 1.

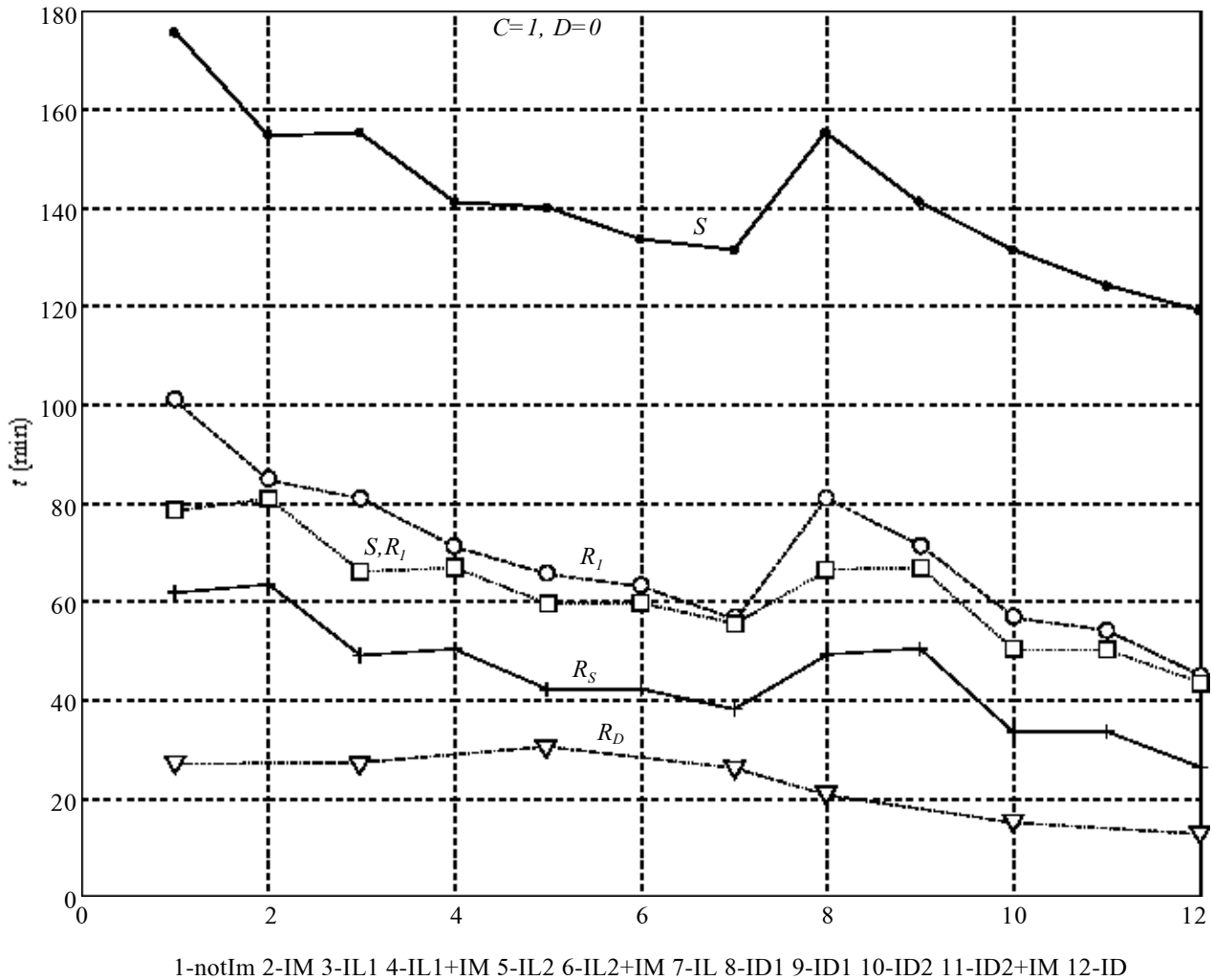
Podaci o izvodu

$n=8$	$m=3$	$t_p=5$	$t_s=4$	$t_r=2$	$t_M=3$	$t_m=3$	$t_l=2$	$D=2$	$t_f=7$	$t_{2f}=10$
-------	-------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	-------	---------	-------------



1-notIm 2-IM 3-IL1 4-IL1+IM 5-IL2 6-IL2+IM 7-IL 8-ID1 9-ID1 10-ID2 11-ID2+IM 12-ID

Slika 6. Ekvivalentno vreme prekida napajanja za šemu sa međupoveznim vodovima



Slika 7. Ekvivalentno vreme prekida napajanja za šemu sa otvorenim polupetljama

Ukupno ekvivalentno vreme prekida po jednom kvaru:

$$(41)$$

## 6. ŠTETE USLED PREKIDA NAPAJANJA

Štete usled prekida napajanja koje imaju potrošači različitih kategorija mogu se izračunati iz sledećih izraza [4]:

– Industrija:

$$c_i = 4,5 d \text{ €/kW} \quad (42)$$

– Komercijala:

$$c_k = 7 d \text{ €/kW} \quad (43)$$

– Poljoprivreda:

$$c_p = 1,75 d \text{ €/kW} \quad (44)$$

– Domaćinstva:

$$c_p = 0,75 d \text{ €/domaćinstvo za } d \leq 2h \quad (45)$$

gde je:

$c$  - šteta po jedinici vršne snage,  
 $d$  - trajanje vremena prekida u  $h$ ,

Štete u slučaju ispada celog izvoda tada iznose:

$$c = c_i d \text{ €/kW} \quad (46)$$

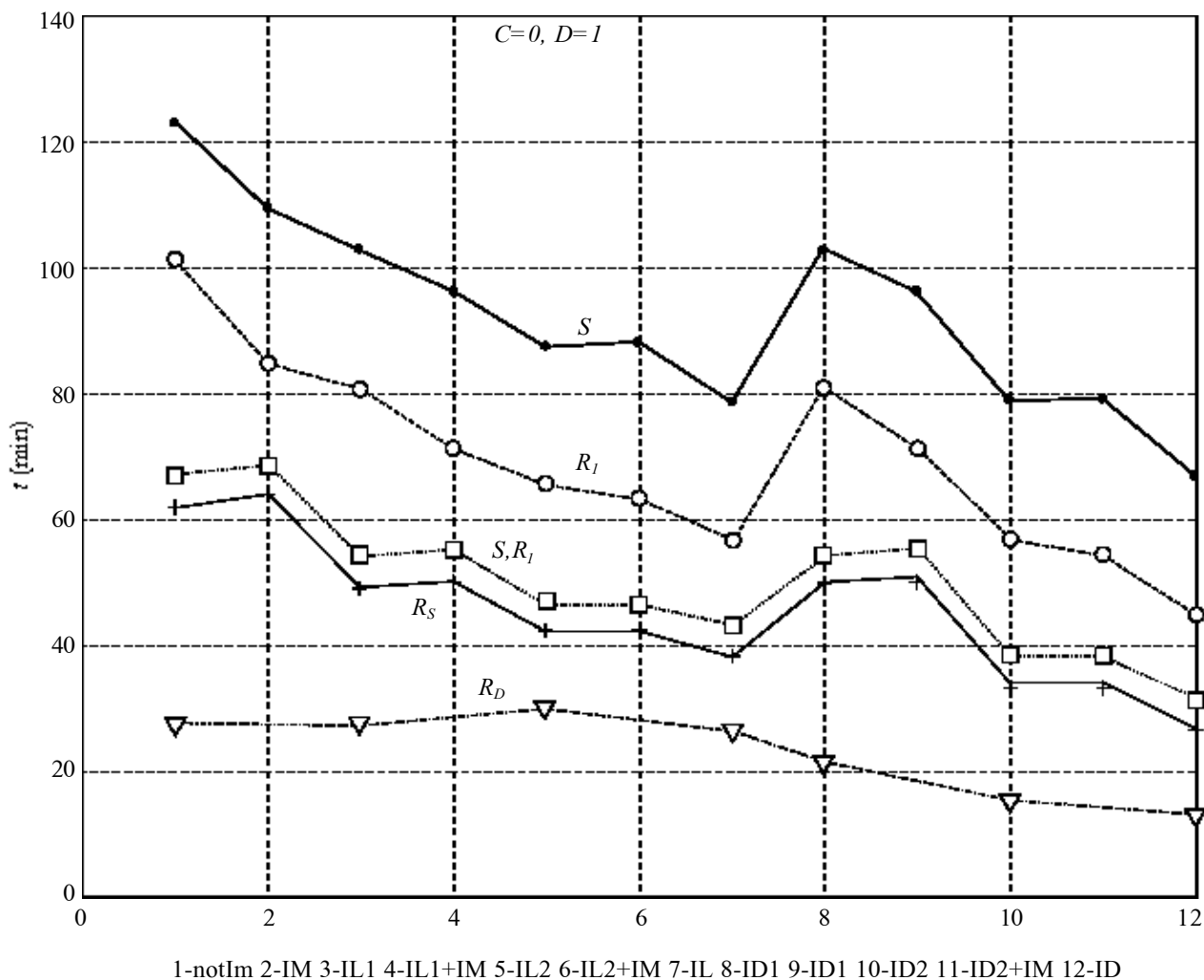
$$c_1 = 4,5k_i \quad 7k_k \quad 1,75k_p \quad \frac{0,75}{k_1} \quad 1 \quad k_i \quad k_k \quad k_p \quad (47)$$

gde je:

$k_i, k_k, k_p$  - relativni udeo u snazi izvoda potrošača kategorija industrija, komercijala i poljoprivreda, respektivno,

$k_1$  - prosečna vršna snaga jednog domaćinstva priključenog na izvod, kW/domaćinstvo.

Imajući u vidu da prosečna snaga delova A i B izvoda iznosi približno polovinu snage izvoda, a da snaga dela C odgovara ukupnoj snazi izvoda, kada je ispunjen uslov iz (45), za izračunavanje prosečnih troškova usled prekida napajanja usled jednog kvara na SN mreži, može se koristiti izraz:



Slika 8. Ekvivalentno vreme prekida napajanja za šemu sa rezervnim kablom iz različite izvorne TS

$$c = c_f \tau \text{ €/kW} \quad (48)$$

pri čemu vreme treba izraziti u satima. Kako je uslov iz (45) za gradske SN mreže po pravilu ispunjen, izraz ((48) pokazuje da su štete usled prekida napajanja u ovim mrežama direktno srazmerne ekvivalentnom prekidu napajanja  $t$ , koje, kao što je pokazano, zavisi od šeme SN mreže, i njene tehničke i organizacione opremljenosti, tj. stepena automatizacije.

## 7. PRIMER PRIMENE

Na osnovu izraza (41) izračunata je ekvivalentno vreme prekida napajanja za različite šeme SN mreža i različite nivoe njihove tehničke opremljenosti. Podaci o izvodu i vremenima obavljanja pojedinih operacija prikazana su u tabeli 1.

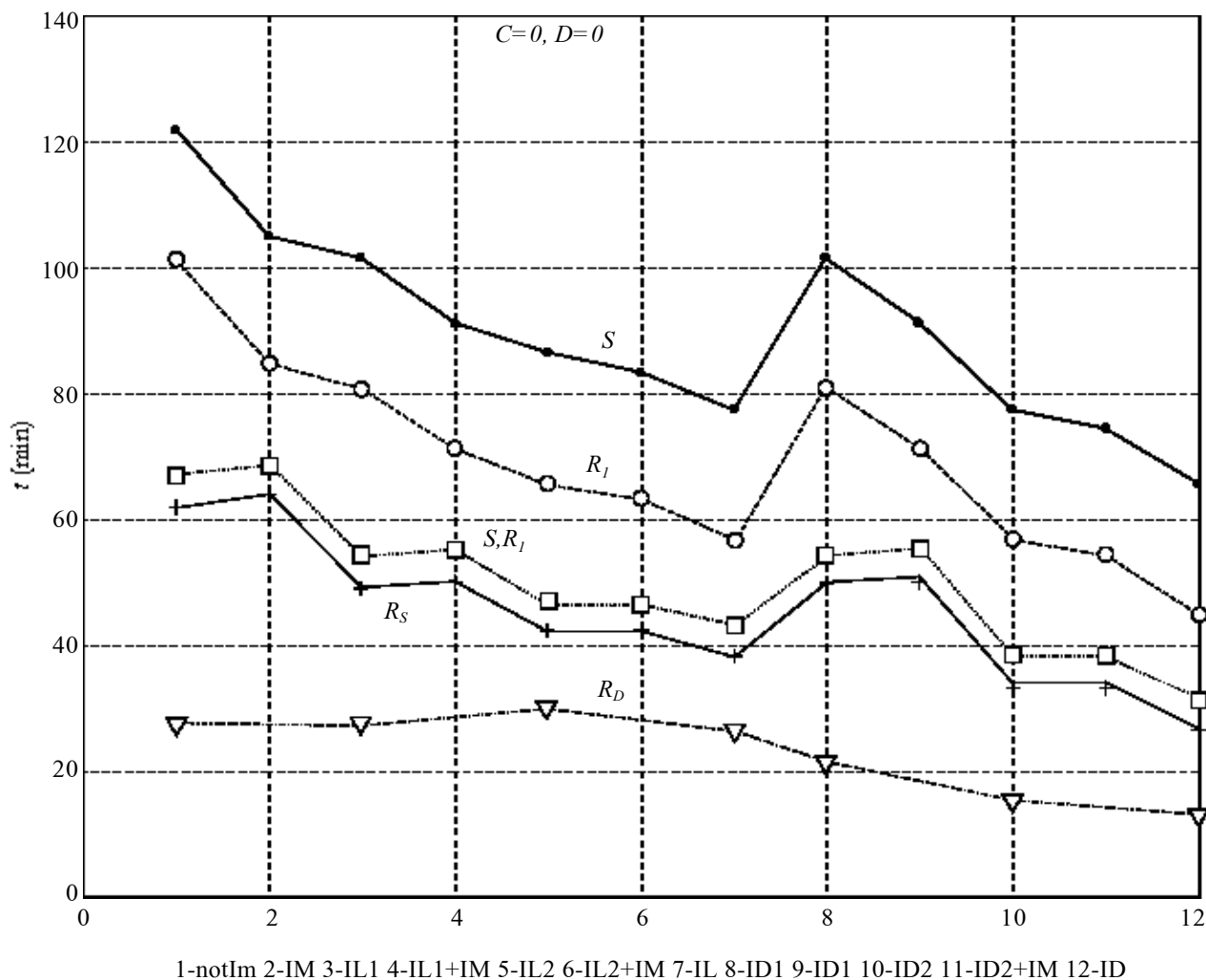
Sva pojedinačna vremena prekida napajanja manja su od 2 h, odnosno uslov iz (45) je zadovol-

ljen. Ekvivalentno vreme prekida napajanja za šemu sa međupoveznim vodovima (CD) prikazuje slika 6.

Rešenje bez daljinskog upravljanja  $\bar{R}$  pokazuje se, kao što se moglo i očekivati, kao daleko najlošije. Približno upola manja ekvivalentna vremena prekida napajanja dobijaju se primenom ili daljinskog upravljanja prekidačima izvoda, ili korišćenjem dve ekipe ( $R_1$ ) ili primenom rastavne sklopke na spoju sa rezervnim izvodom ( $S$ ). Pri tome je tehnika  $S$  znatno slabije rešenje ako se koristi sa probnim uključenjem umesto merenja izolacije.

Dalje značajno poboljšanje od preko 20 minuta dobija se istovremenim uvođenjem tehnika  $R_1$  i  $S$ , dok se daljim uvođenjem daljinskog upravljanja rastavnom sklopkom  $R_S$  dobijaju zanemarljiva poboljšanja.

Potpuno daljinsko upravljanje rasklopnom opremom izvoda  $R_D$  donosi očekivana dalja smanjenja vremena prekida. Ukoliko se želi izbeći probno uključivanje zbog opterećivanja opreme, ili zbog



Slika 9. Ekvivalentno vreme prekida napajanja za šemu sa rezervnim kablom iz iste izvorne TS

stvaranja velikog broja kratkih prekida, tehnike  $I_D$  i  $I_{D2}$  mogu biti isplativo rešenje.

Od tehnika za identifikaciju deonice u kvaru posebno su efikasni lokatori kvara sa i bez daljinske dojava. Zanimljivo je da se već sa jednim lokatorom kvara dobijaju značajna poboljšanja, a sa više lokatora pozitivan efekat se povećava.

Rezultate proračuna za šemu sa otvorenim polupetljama ( $\overline{CD}$ ) prikazuje slika 7. Generalna zapažanja ista su kao i za prethodno razmatranu šemu.

Na narednim slikama prikazani su rezultati za šemu sa rezervnim kablom iz različite izvorne TS ( $\overline{CD}$  - slika 8) i šemu sa rezervnim kablom iz iste izvorne TS ( $\overline{CD}$  - slika 9). U odnosu na prethodne šeme

Tabela 2.

Struktura potrošača i jedinični troškovi prekida

$k_i$	$k_k$	$k_p$	$k_d$	$k_I, kW$	$c_I, \text{€}/(\text{h kW})$
0,10	0,30	0,00	0,60	10	2,60
0,10	0,20	0,00	0,70	10	1,90
0,05	0,25	0,00	0,70	10	2,03
0,10	0,15	0,00	0,75	10	1,56

me mreža, uočljivo je značajno manje ekvivalentno vreme prekida napajanja, jer na rezervnom nema potrošača koji bi trpeli posledice prekida. U vezi s tim je i relativno manji efekat uvođenja rastavne sklopke (S) od daljinskog upravljanja prekidačima izvoda ( $R_1$ ).

Jedinični troškovi prekida napajanja ( $c_1$ ) za više različitih struktura potrošnje izvoda prikazani su u tabeli 2.

## 8. ZAKLJUČAK

*U radu su izvedeni izrazi za izračunavanje trajanja prekida napajanja električnom energijom i troškova nastalih šteta kod potrošača za oko 400 različitih modula gradskih srednjenaponskih distributivnih mreža i njihovih stepena automatizacije. Iz dobijenih rezultata, može se kvantitativno odrediti uticaj različitih nivoa daljinskog upravljanja rasklopnom opremom u SN mreži i uticaj primene različitih tehnika za traženje deonice u kvaru. Izvedeni izrazi mogu se koristiti kao pokazatelj pri poređenju*

*različitih rešenja SN mreža pri njihovom planiranju i eksploataciji, kao i za regulisanje kupoprodajnih odnosa sa potrošačima.*

## 9. LITERATURA

- [1] Nahman J., Perić D., ANALYSIS OF COST OF URBAN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS, Electric Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 1, pp7-16, 1998
- [2] FAULT MANAGEMENT IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS, final report WG03, 15th International Conference CIRED, Nice, June, 1999,
- [3] Bargigia A., Cerretti A., Di Lembo G., Rogai S., Veglio G., TELECONTROL AND AUTOMATION ON ENEL DISTRIBUZIONE'S NETWORK: STRATEGY AND RESULTS, 17th International Conference CIRED, Barcelona, May, 2003, pp3-33,
- [4] Nahman J. i ostali, POUZDANOST DISTRIBUTIVNIH SISTEMA, studija urađena za Elektroprivredu Srbije, Elektrotehnički fakultet Beograd, 1999.

Rad je primljen u uredništvo 05. 03. 2004. godine



**Dragoslav M. Perić** je rođen 1958. godine u Rači. Diplomirao je 1983. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, gde je i magistrirao 1989. godine na smeru Elektroenergetski sistemi i odbranio doktorsku tezu 1997. godine. Radi kao profesor na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu. Objavio je više naučnih i stručnih radova i knjiga.

---

Miodrag Arsić,  
Stojan Sedmak i Vujadin Aleksić

# Ocena integriteta i produženje radnog veka rotornih bagera I deo

Pregledni rad  
UDK: 622.221; 622.332; 620.09

---

*Rezime:*

*Integritet konstrukcija je relativno nova naučna i inženjerska disciplina, koja u širem smislu obuhvata analizu stanja i dijagnostiku ponašanja i popuštanja, procenu veka i revitalizaciju konstrukcije. To znači da, osim uobičajene situacije u kojoj treba proceniti integritet konstrukcije kada se ispitivanjem bez razaranja otkrije greška, ova disciplina obuhvata i analizu naponskog stanja. Na taj način se dobija precizna i detaljna raspodela pomeranja, deformacija i napona, koja omogućava da se utvrde „slaba” mesta u konstrukciji. Ovaj pristup je posebno važan za konstrukcije koje su izložene složenom dinamičkom opterećenju, kakvi su rotorni bageri.*

*U radu su prikazani rezultati teorijskih i eksperimentalnih analiza različitih pristupa ocene integriteta odgovornih celina rotornih bagera. Prikazan je značaj dijagnostike stanja i postojanja baza podataka. Takođe su predložene mere preventive oštećenja i produženje veka bagera.*

**Ključne reči:** rotorni bager, integritet konstrukcije, radni vek

---

*Abstract:*

**INTEGRITY ASSESSMENT AND PROLONGATION  
OF ROTOR DREDGERS WORKING LIFE**

*Part 1*

*Structural integrity is a relatively new scientific and engineering discipline, which in wider meaning comprises state analysis, behavior and abatement diagnostics, life assessment and structure recovery. This discipline comprises also analyses of stress state as the difference from common situation when structure integrity should be assessed on the basis of defects detected by nondestructive testing. Precise and detailed distribution of displacements, stress and strain which is obtained by this method enables clenching of structure's „weak” spots. This approach is especially important when structures are exposed to complex dynamic loading, which is the case of rotor dredgers.*

*Results of theoretical and experimental analyses in different approaches to integrity assessment of rotor dredgers important units are presented in this paper. Paper signifies the importance of state diagnostics and database presence. Measures for damage prevention and prolongation of dredgers life are also proposed.*

**Key words:** rotor dredger, structural integrity, working life

---

*Dr Miodrag Arsić, naučni saradnik, mr Vujadin Aleksić, istraživač saradnik – Goša Institut, 11 000 Beograd, Milana Rakića 35  
Prof. dr Stojan Sedmak – Tehnološko-metalurški fakultet, 11 000 Beograd, Karnedžijeva 4*

## 1. UVOD

Veličina, oblik i konstrukcija rotornih bagera zavisi, uglavnom, od zahtevanog kapaciteta, načina utovara materijala i specifičnih uslova kopa (stabilnost radilišta, čvrstoća stenskih masa, dozvoljena opterećenja tla). Imajući to u vidu, danas postoji čitav niz različitih tipova rotornih bagera koji se međusobno razlikuju u prečniku radnog točka, broju i obliku kašika na radnom točku i dužini radne strele.

U praksi često dolazi do prevremenih oštećenja i lomova odgovornih komponenti i čitavih konstrukcija rotornih bagera na površinskim kopovima, što se objašnjava neadekvatnim projektovanjem i konstruisanjem, nedovoljnim poznavanjem svojstava materijala i njihovih zavarenih spojeva i propustima u tehnologiji izrade delova. Sem direktne štete od oštećenja i lomova, poremećaj u proizvodnji električne energije može prouzrokovati i znatne indirektno štete. Mnogi primeri lomova rotornih bagera zabeleženi su na gotovo svim površinskim kopovima u Evropi. Prevremeni lom ili oštećenje delova konstrukcije rotornih bagera javljaju se pri istovremenom uticaju većeg broja tehnološko-metalurških, konstrukcijskih i eksploatacijskih faktora [1, 2, 3, 4, 5].

Zamorni lom je najčešći oblik oštećenja u radu i oko 80 % otkaza metalnih konstrukcija je posledica zamora. Utvrđivanje spektra opterećenja omogućava utvrđivanje radne čvrstoće odgovornih elemenata konstrukcija, a uvođenje parametara mehanike loma omogućava praćenje zavisnost brzine rasta pr-

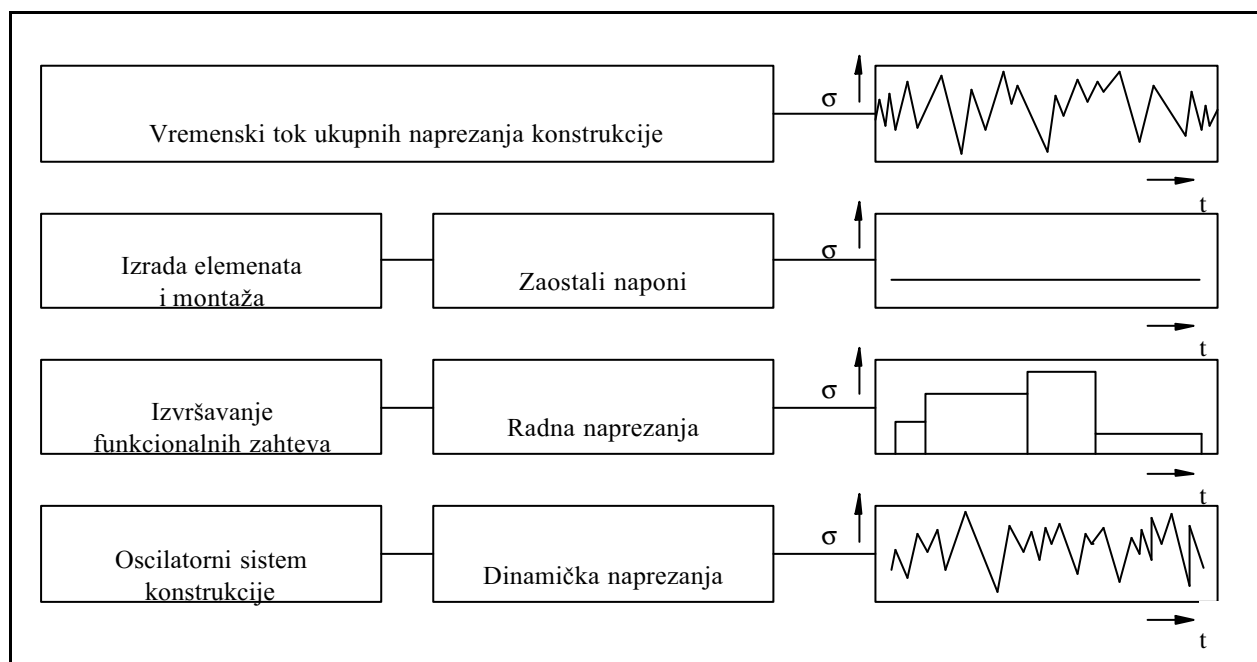
sline od opsega faktora intenziteta napona, gde je interesantno područje važenja zakona Parisa i područje praga zamora, u kome ne postoje uslovi za rast postojeće prsline. Podaci o brzini rasta zamorne prsline, o pragu zamora, kritičnoj veličini faktora intenziteta napona (žilavost loma) mogu da koriste u proceni veka.

Opterećenje odgovornih delova i elemenata konstrukcija rotornih bagera ne može biti izraženo u obliku jednostavne matematičke funkcije, odnosno ne može se u potpunosti predstaviti modelom u kome se promenljive ili parametri ravnomerno menjaju u radnim uslovima, jer takav model mora da predviđi niz aproksimacija, uslovljenih realnim uslovima izrade i eksploatacije. Na slici 1 prikazan je vremenski tok složenog naprezanja bagerske konstrukcije i njegove komponente prema uzroku nastanka.

Zato, jedino ispitivanja konstrukcija u radnim uslovima i baze podataka omogućavaju da se oceni njihovo stanje u potpunosti. Na taj način se dobijaju neophodni podaci za upoređenje kvaliteta i ocenu mašina i konstrukcija, za ocenu uticaja prostornog rada pojedinih delova i elemenata na nosivost, kao i za određivanje zajedničkog rada pogonskih uređaja i konstrukcija.

## 2. PROJEKTOVANJE NOSEĆIH KONSTRUKCIJA ROTORNIH BAGERA

Danas je poznato da se mali broj delova na rotornim bagerima na zadovoljavajući način može



Slika 1. Prikaz rasčlanjenog ukupnog naprezanja prema uzroku nastanka



proračunati prema metodološkim uputstvima za proračun uređaja, pogona i elemenata odgovornih konstrukcija, jer se uslovi složenog dinamičkog karaktera kojima su izloženi rotorni bageri ne mogu u potpunosti predvideti u fazi projektovanja i konstruisanja.

## 2.1. Proračun konstrukcije rotornih bagera

Uputstva za proračun metalne konstrukcije strele radnog točka rotornih bagera [6], kao dinamički najugroženije celine bagera, predlažu da se osnovni proračunski naponi  $s$  i  $t$  u njenim elementima odrede od delovanja sledećih opterećenja:

- Sopstvena težina strele rotora i rotora uzimajući u obzir i njihov položaj.
- Težina materijala na transporterima i u kašikama, uzimajući u obzir i njihov položaj.
- Proračunska opterećenja na rotoru za normalno kopanje tla.
- Opterećenje vetrom u radnom stanju.

Pri tome, opterećenja po tačkama b) i c) treba da se izaberu tako da opterećenja pojedinih elemenata budu maksimalna. Neophodno je razmotriti proračunska opterećenja elemenata strele radnog točka u tri položaja:

- donjem,
- horizontalnom,
- gornjem.

Težinu materijala na transporterima, uzimajući u obzir opterećenja na elemente konstrukcije, od prosipanja, lepljenja materijala za transportnu traku i drugih faktora, neophodno je kod određivanja računске težine povećati za 15-30 %.

Pri proračunu elemenata strele radnog točka na statičku izdržljivost neophodno je proanalizirati maksimalna opterećenja i odrediti maksimalne napone  $s$  i  $t$ , polazeći od razmatranja sledećih proračunskih slučajeva:

- Opterećenjima po tačkama a), b), d) se dodaju maksimalna dinamička opterećenja koja deluju na strelu radnog točka kod naglog zaustavljanja radnog točka u vertikalnoj ravni.
- Opterećenjima po tačkama a), b), d) se dodaju maksimalna dinamička opterećenja koja deluju na strelu radnog točka kod naglog zaustavljanja okretanja strele radnog točka u ravni kružnog kretanja.
- Pri delovanju proračunskih opterećenja po tačkama a)-d) isključuje se iz rada jedna strana vešalice strele radnog točka.
- Pri delovanju proračunskih opterećenja po tačkama a)-d) dolazi do delimičnog upiranja radnog točka u otkopnu masu i uravnoteženja polovine težine radnog točka.

- Kod delovanja proračunskih opterećenja po tačkama a), b) i d) radni točak se potpuno oslanja na tle.

Osim navedenih slučajeva potrebno je analizirati i maksimalne napone koji se pojavljuju pri montaži i remontu mašina.

Za proračun na zamor od zatezanja elemenata strele radnog točka od ekvivalentnih opterećenja, preporučuje se da se usvoje srednje vrednosti proračunskih opterećenja, za tri položaja strele radnog točka, dok se ne dođe do eksperimentalnih podataka.

Koeficijente nesimetričnosti opterećenja i napona  $R = s_{min}/s_{max}$  za određivanje amplitudnih napona i srednje vrednosti napona u ciklusu  $s_a$  i  $s_m$  ili  $t_a$  i  $t_m$  treba odrediti polazeći od proračuna oscilacija elemenata konstrukcije strele radnog točka u vertikalnoj i horizontalnoj ravni i torzijskih oscilacija, koje se pojavljuju pri normalnim procesima kopanja.

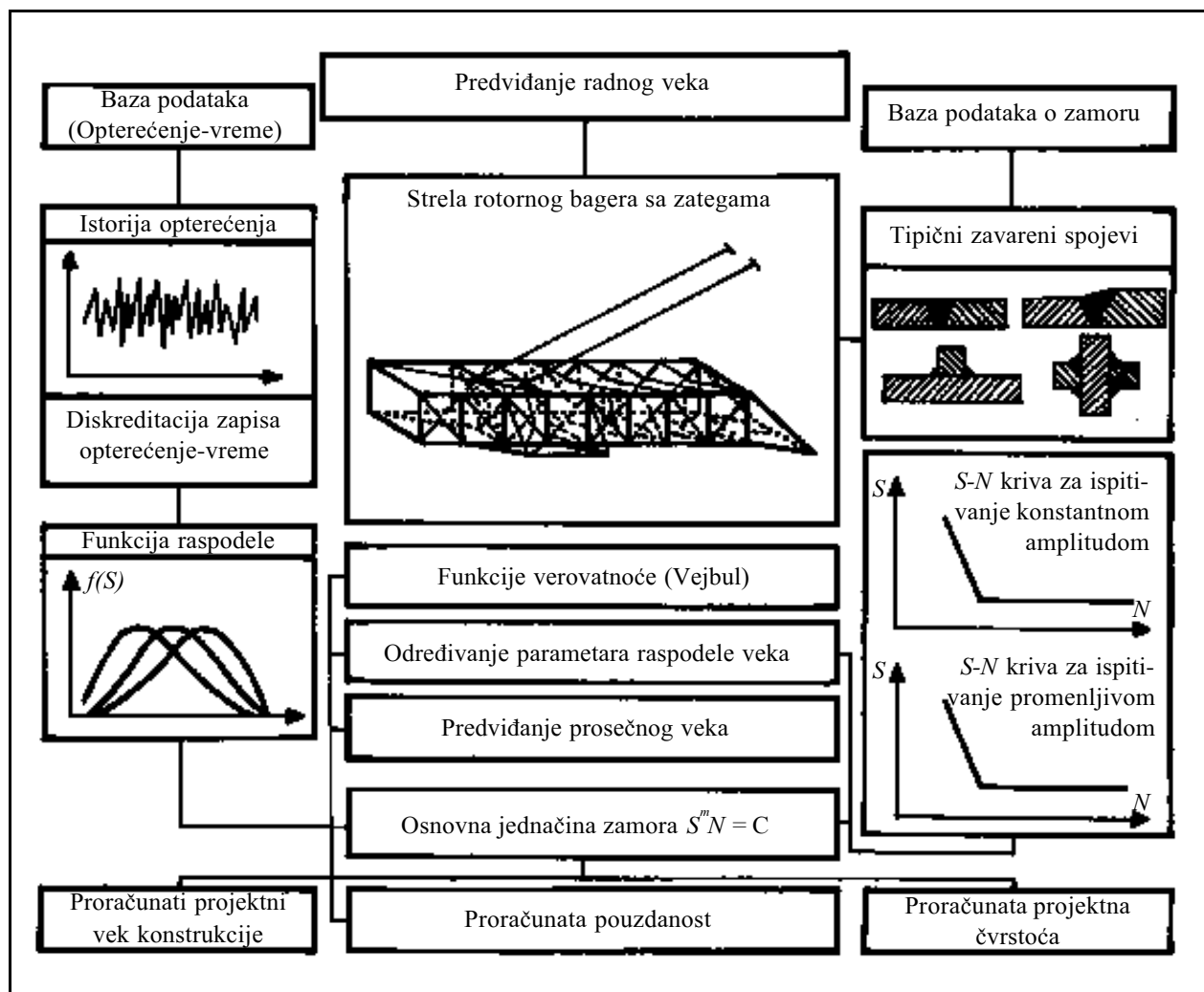
Kod prethodnih proračuna za elemente strele radnog točka, koji ne unose rezonantne oscilacije ili oscilacije bliske rezonantnim, mogu se u prvoj aproksimaciji proračunati koeficijenti nesimetričnosti opterećenja za proračunska opterećenja po tački c), koja se pojavljuju od sila kopanja na radnom točku, usvojiti u zavisnosti od otkopavane mase u granicama za rotorne bagere na otkrivci  $R=0,5-0,6$  i za proizvodne bagere sa povećanim silama rezanja  $R=0,25-0,4$ . Sa povećanjem tvrdoće otkopavanih masa koeficijent se smanjuje, a amplitudni deo opterećenja i napona raste.

Konstrukcija se definiše u zavisnosti od veličine i oblika spoljnog opterećenja, fizičko-mehaničkih svojstava materijala i od geometrijskih karakteristika razmatrane konstrukcije.

## 2.2. Predviđanje veka u fazi projektovanja i razvoja konstrukcija

Poslednjih godina, pri projektovanju odgovornih konstrukcija sve više se, umesto klasičnog proračuna za neograničen vek, primenjuju metode projektovanja konstrukcija sa ograničenim vekom, bazirane na konceptu radne čvrstoće i pristupima mehanike loma. Na osnovu sopstvenih ispitivanja i literature, preporučeno je postupak za projektovanje noseće konstrukcije rotornog bagera, sa sigurnošću od zamornog loma, i prikazana je mogućnost procene zamornog veka odgovornih konstrukcija u eksploataciji [3].

Kao što se vidi na slici 2, za projektovanje su potrebne dve grupe podataka: o opterećenju i o zamornim karakteristikama odgovornih konstrukcija.



Slika 2. Postupak za procenu veka u fazi projektovanja

U fazi projektovanja ovi podaci nisu poznati, pa se uzimaju na osnovu standarda, iskustva i literature.

Kada su u pitanju složene konstrukcije, kao što je rotorni bager, opravdano je na prototipu ispitati ponašanje u realnim radnim uslovima. Od takvog ispitivanja očekuju se podaci o deformacijama, merenim na kritičnim mestima, o naponima, sračunatim na osnovu izmerenih deformacija, o raspodeli napona u realnom vremenu i o faktoru koncentracije napona za zavarene spojeve, da bi se odredili kritični naponi na tim mestima. Na osnovu ovih podataka može da se oceni vek prototipa, sledeći postupak prikazan na slici 3.

Kao što se vidi na slici 3, istorija opterećenja, ciklične krive i zavisnost napon-deformacija, kao i faktor koncentracije napona  $k_t$  su ulazni podaci za proračun oštećenja od zamora i predviđanje veka. Ovaj je pristup zasnovan na zavisnosti zamornog loma od energije, sakupljene u cikličnom procesu deformisanja. Rasuta energija se određuje iz zatvorene

histerezisne petlje, pri čemu se uzimaju u obzir i naponi zaostali od zavarivanja.

### 3. OTPOR KOPANJA I FUNKCIONALNE KARAKTERISTIKE BAGERA

Određivanje spoljnog opterećenja na radnom točku od otpora kopanja javlja se kao osnovna potreba, kako pri projektovanju, tako i pri eksploataciji rotornih bagera. Veliki broj parametara koji definišu otpore u procesu kopanja rotornim bagerom svrstani su u tri grupe: parametre stenske mase, geometrijske parametre kopanja i konstruktivno-kinetičke karakteristike rotornog bagera kao radne mašine.

#### 3.1. Teorijska postavka

Radni točak sa kašikama treba da savlada otpore rezanja, podizanja otkopnog materijala, punjenja kašika, trenja materijala tla i trenja između materija-

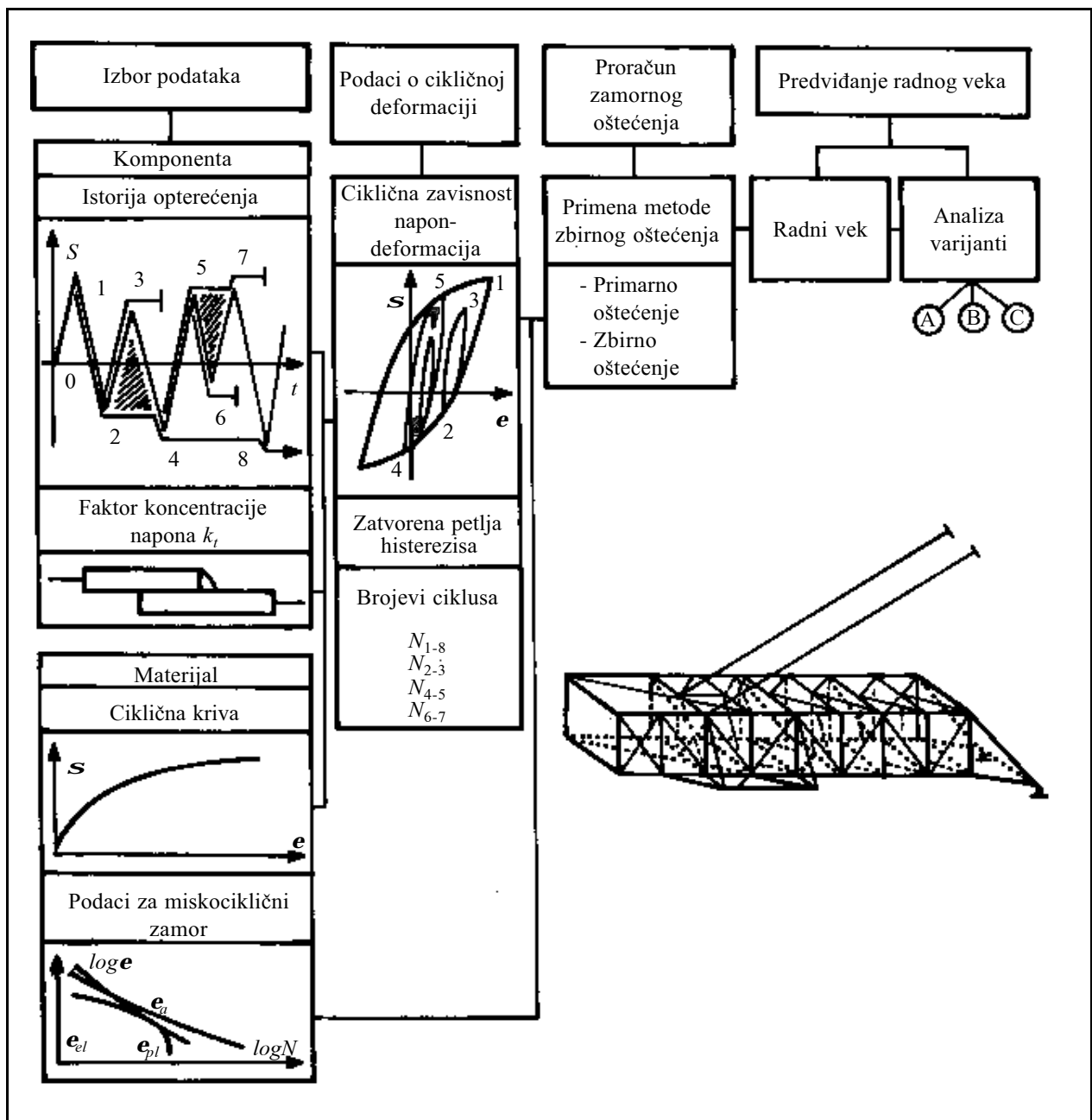
la i kašika, koji zavise od parametara rezanja i karakteristika radne sredine. Navedeni otpori se mogu, sa većom ili manjom tačnošću, ponaosob odrediti primenom odgovarajućih metoda. Međutim, u praksi je češće potrebno da se utvrde ukupni otpori, jer su oni merodavni za pravilan izbor i dimenzionisanje rotornog bagera [6], slici 4.

Osnovna komponenta otpora kopanja je tangencijalna komponenta  $F_t$ ,  $kN$ , definisana kao proizvod specifičnog linearnog otpora kopanja  $k_L$ ,  $kN/m$ , i zbiru prosečnih dužina reznih ivica noževa u zahva-

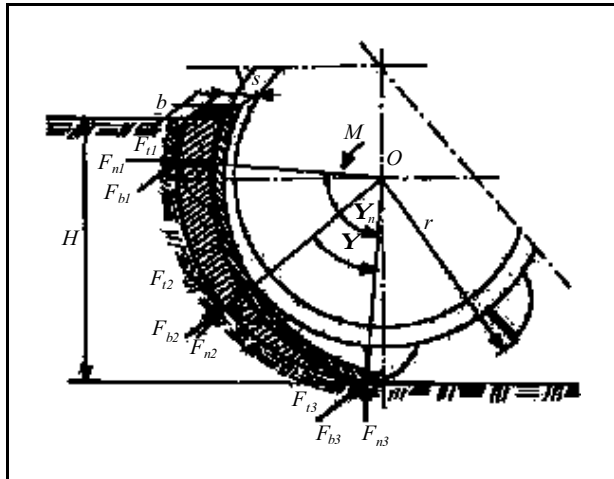
tu  $L_{sr}$ ,  $m$ , ili specifičnog površinskog otpora kopanja  $k_A$ ,  $kN/m^2$  i zbiru prosečnih površina poprečnog preseka odrezaka  $A_{sr}$ ,  $m^2$ , u zavisnosti od broja kašika  $z$  na radnom točku i ugla kopanja  $\beta$ :

$$F_t = k_L L_{sr}; L_{sr} \frac{Z}{2} L(\beta) d$$

$$F_t = k_A A_{sr}; A_{sr} \frac{Z}{2} L(\beta) d \quad (1)$$



Slika 3. Postupak za procenu veka prototipa



Slika 4. Otpori kopanja

Ukupni otpor kopanja  $F_k$  predstavlja prostorno opterećenje, koje se sastoji iz tri komponente: tangencijalne  $F_t$ , normalne  $F_n$ , od obrtanja rotora, i bočne  $F_b$ , od kružnog kretanja nadgradnje bagera sa radnim točkom i strelom:

$$F_k = \sqrt{F_t^2 + F_n^2 + F_b^2} \quad (2)$$

Srednje vrednosti normalne  $F_n$  i bočne komponente  $F_b$  otpora tla određuju se prema srednjoj vrednosti tangencijalne komponente  $F_t$ :

$$F_n = n F_t \quad (3)$$

$$F_b = b F_t \quad (4)$$

gde su:  $y_n$  i  $y_b$  eksperimentalni koeficijenti proporcionalnosti, čije vrednosti zavise od radne sredine.

Nominalna snaga kopanja  $N$ , kW, koja zavisi od stepena iskorišćenja pogonskih elektromotora  $h$ , može se definisati kao zbir snage potrebne za kopanje  $N_k$  i snage potrebne za dizanje i utovar otkopnog materijala  $N_h$ .

$$N = \frac{1}{h} (N_k + N_h) \quad (5)$$

Na osnovu karakteristika otpora kopanja jedne kašike  $F_{i(j)}$ , kao slučajne funkcije ugla kopanja, moguće je preći na statističke karakteristike zbirnog opterećenja rotora, odnosno vratila rotora  $F(j)$  i obrtnog momenta na vratilu rotora  $T(j)$ . Veličine  $F(j)$  i  $T(j)$  su merodavne za dimenzionisanje pogonskih sistema. Do njihovih tačnih vrednosti se dolazi merenjima na većem broju kašika, na većem broju rotornih bagera i za više različitih otkopnih sredina [7, 8, 9].

### 3.2. Merenje otpora kopanja

Merenje otpora kopanja u principu se izvodi na dva načina, i to: direktno sa konkretnom otkopnom mehanizacijom (bagerom) i laboratorijski na uzetim uzorcima. Laboratorijsko merenje otpora kopanja se izvodi na više načina, od kojih su poznatiji: merenje reznim klatnom, merenje klinom, merenje penetrometrom, merenje triaksialnim aparatom, merenje ultrazvukom. Laboratorijske metode koje se najviše upotrebljavaju su modifikovane metode Orenstein & Koppel, koje se baziraju na Merchantovoj teoriji.

Na kopovima u našoj zemlji, za merenje otpora kopanju najčešće je korišćena metoda vatmetarskog učinka. Princip ove metode sastoji se u merenju angažovane snage na prenosniku za pogon radnog točka. Na osnovu podataka o veličini struje i napona izmerenih vatmetrom R60, izračunava se angažovana snaga na elektromotoru za pogon radnog točka, koja se registruje kao zapis promene snage u vremenu. Potrošnja električne energije je posledica savlađivanja svih otpora, koji se javljaju u procesu kopanja.

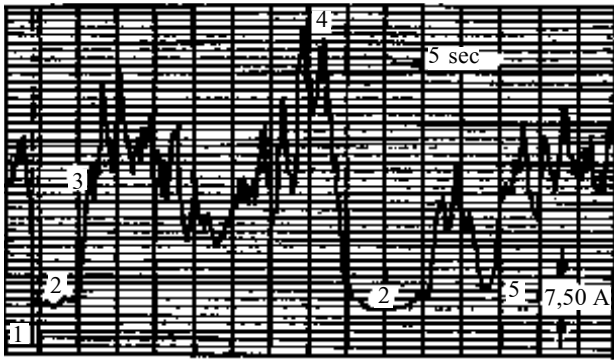
Za određivanje potrebne snage za pogon radnog točka, u zavisnosti od ostvarenog kapaciteta i specifičnog otpora kopanju, korišćenjem odgovarajućih uređaja, izvršena su merenja i snimanja jačine struje [7, 8, 9]

Merenja se vrše pod radnim opterećenjem bagera u različitim otkopnim sredinama. U radu su prikazani rezultati merenja radnog opterećenja na radnom točku rotornog bagera, Sch Rs 650/5x24 /9/. Na slici 5 prikazan je jedan od zapisa promene jačine struje sa osnovnim karakteristikama odreska, a na slici 6 prikazan je zapis na kome označene tačke predstavljaju:

- tačka 1 - jačina struje u momentu uključenja motora za pogon radnog točka,
- tačka 2 - jačina struje pri okretanju radnog točka na prazno,
- tačka 3 - jačina struje pri otkopavanju,
- tačka 4 - maksimalno zabeležena jačina struje obuhvaćena na dijagramu.



Slika 5. Prikaz dela zapisa promene jačine struje sa osnovnim karakteristikama odreska

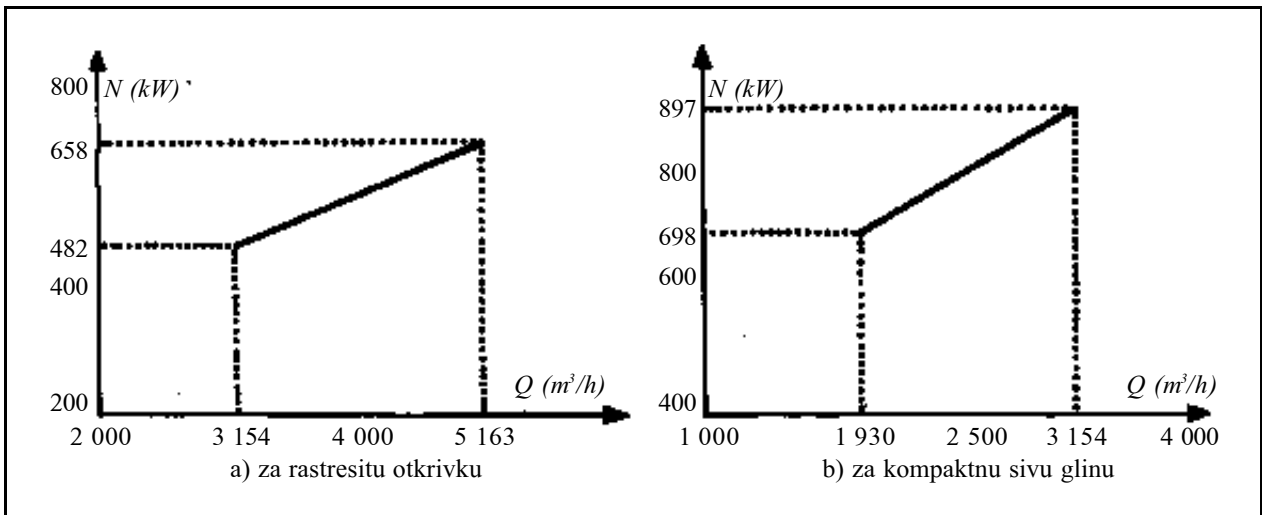


Slika 6. Prikaz zapisa promene jačine struje sa označenim tačkama za karakteristična opterećenja radnog organa

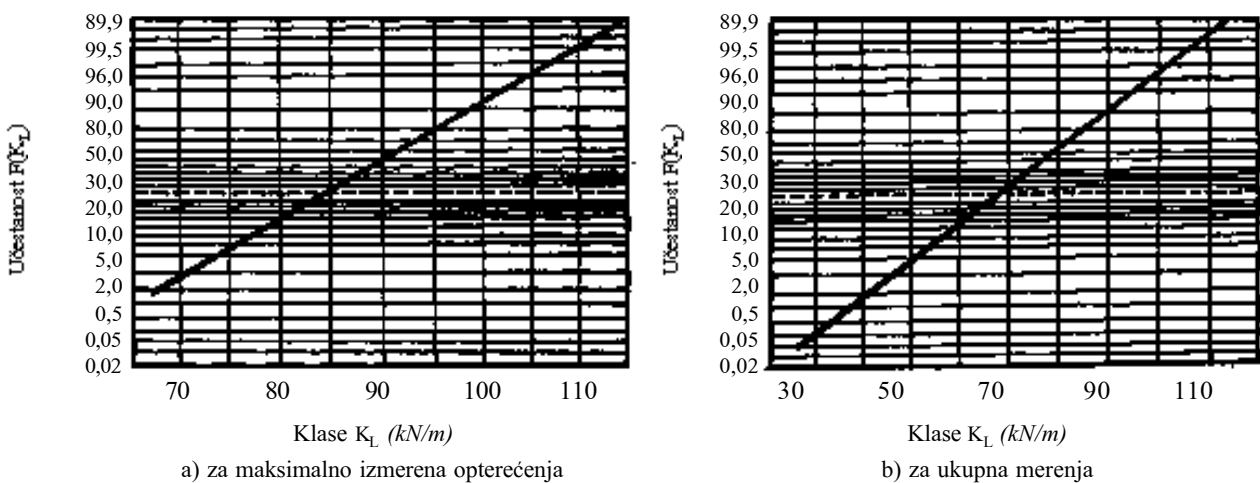
Za podatke o angažovanoj snazi  $N$  (kW) za pogon radnog točka i odgovarajuće časovne proizvodnje  $Q_e$  ( $m^3/h$ ), pri radu bagera u različitim otkopnim sredinama, izvršena je statistička analiza. Na osnovu statističkih karakteristika, metodom najmanjih kvadrata utvrđene su linearne korelacije za regresivnu funkciju  $N=N(Q_e)$  za rastresitu otkopnu sredinu i za kompaktnu sivu glinu, slika 7.

- Za rastresitu otkrivku  $N(Q_e)=0,083\ 7Q_e+229,6$
- Za kompaktnu sivu glinu  $N(Q_e)=0,166\ 6Q_e+366,6$

Analizom histograma empirijske raspodele, kumulativnih funkcija učestanosti i statističkih karakteristika došlo se do zaključka da se za matematički opis slučajnih veličina specifičnog otpora kopanja ( $k_L$ ) može koristiti normalni zakon raspodele, slika 8.



Slika 7. Promena snage u funkciji časovne proizvodnje



Slika 8. Grafičko određivanje parametara normalnog zakona raspodele

Parametri normalnog zakona raspodele specifičnog otpora kopanju

	Normalna raspodela		$f_i = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{k_L k_L^*}{s^2}}$	
	Srednja vrednost	Standardna odstupanja	Varijacije	Provera ekstremnih vrednosti
	$k_L^* (kN/m)$	$s$	$V = s/k_L$	$k_L^* - 3s$
Za maksimalno izmerena opterećenja	86,3	23,2	0,27	Zadovoljava
Za ukupno merenje	68,2	19,1	0,28	Zadovoljava

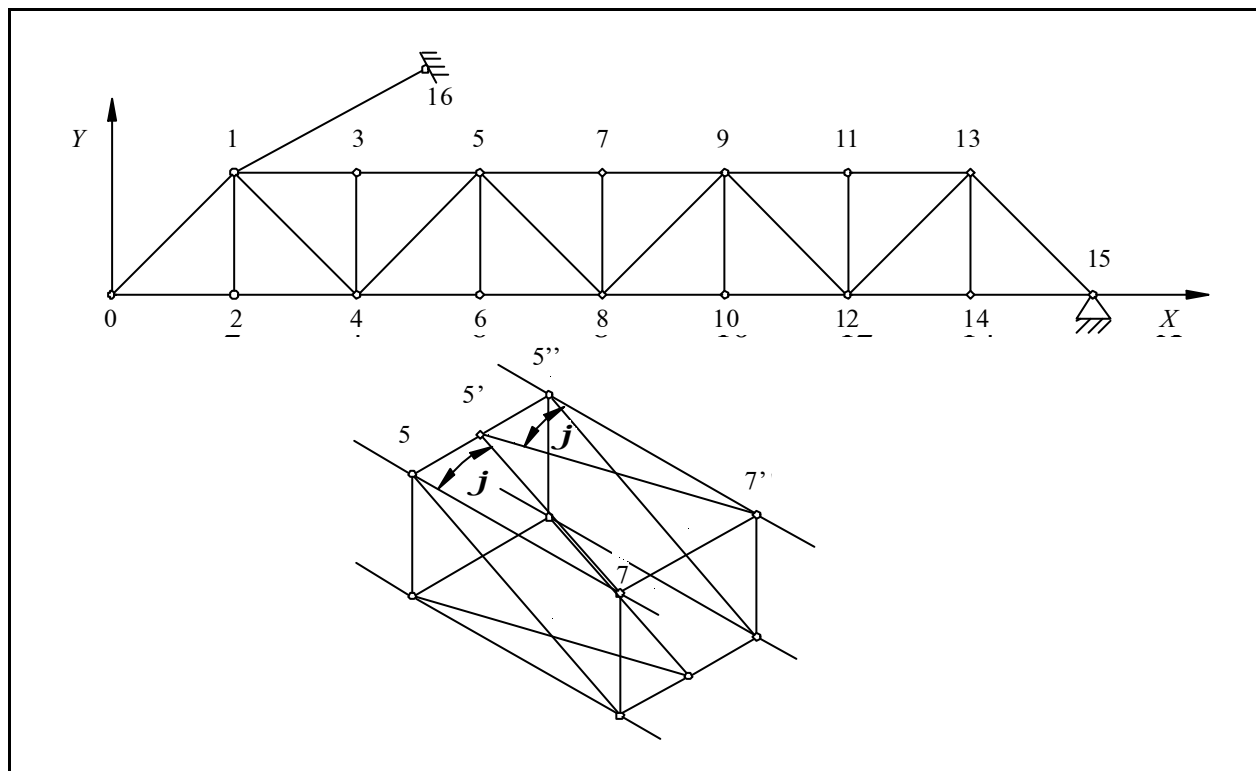
Normalni zakon raspodele specifičnog otpora kopanja ne važi za maksimalno izmerena opterećenja i za ukupna merenja. Zato se ona određuju drugim grafičkim metodama, da bi se izbegle ekstremne vrednosti, ili Vejbulovom raspodelom. U tabeli 1 date su vrednosti parametara normalnog zakona raspodele specifičnog otpora kopanja i rezultati provere prihvatljivosti zakona na bazi koeficijenta varijacije.

Merenjem utvrđeni specifični otpori kopanju, za određene radne sredine, mogu poslužiti konstruktorima bagera za proveru proračuna pogonskih elemenata i delova mehanizama, kao i za iznalaženje povoljnih rešenja.

#### 4. UTICAJ OSCILACIJA NA INTEGRITET NOSEĆE KONSTRUKCIJE BAGERA

Obrtna veza gornjeg obrtnog i hodnog dela rotnog bagera predstavlja, u poređenju sa radnom strelom, pretovarnom strelom i protivtegom malu osnovu za stabilnost konstrukcije u radu. Bageri se, zbog toga, relativno lako dovode u stanje oscilovanja. Izazvane oscilacije noseće konstrukcije dovode do dinamičkih naprezanja u strukturnim elementima.

U toku eksploatacije, većina sklopova i elemenata bagera su izloženi složenim dinamičkim opterećenjima, koja zavise od uslova eksploatacije i sop-



Slika 9. Proračunski model strele za vertikalne oscilacije

stvenih oscilacija. Oscilatorna kretanja elemenata noseće konstrukcije bagera pojavljuju se u oba slučaja: stacionarnom i nestacionarnom režimu rada sistema pogona bagera i mogu biti veoma složena i širokog frekventnog spektra.

U radu su prikazani rezultati teoretske i eksperimentalne analize sopstvenih i prinudnih oscilacija noseće konstrukcije bagera klase SRs 470 za različite eksploatacione uslove [10].

U slučaju vremenskog poklapanja sopstvenih oscilacija konstrukcije i oscilacija izazvanih periodičnim delovanjem opterećenja može doći do rezonanse, pa time i do otkaza najnapretnijih preseka. Zbog toga frekvencija prinudnih oscilacija, usled zahvata kašika u eksploataciji, ne sme ležati u blizini frekvencije sopstvenih oscilacija noseće konstrukcije.

#### 4.1. Teorijske analize

Na osnovu tehničke dokumentacije i konstruktivnih elemenata radne strele rotornog bagera, izvršen je proračun sila u štapovima i pomeranje čvorova prostorne rešetke radne strele. Izračunate su i mase i koeficijenti krutosti za pojedine štapove i čvorišta.

U sklopu analize dinamičke izdržljivosti, izvršen je proračun sopstvenih oscilacija radne strele primenom metode „Finite-storrelmente” [11], za model ravanske rešetke, slika 9.

Pomeranje mase svakog štapa i svakog čvora daje ukupnu masu svih štapova. Pri proračunu frekvencije sopstvenih oscilacija kao kruti elementi uzete su u čvorovima koncentrisane mase, a kao elastični elementi u konvergentnim pravcima štapova modela rešetke su postavljeni elastični elementi, kao što je prikazano na slici 9.

Problem dobijanja frekvencije sopstvenih oscilacija rešen je sledećom jednačinom:

$$\det (XK=f^2M) = 0$$

gde je:  $XK$  - matrica krutosti sistema,

$M$  - matrica masa,

Matrice  $XK$  i  $M$  su 26 reda.

Tako preračunate približne vrednosti frekvencija sopstvenih oscilacija za radnu strelu bagera iznose  $f_{min}=4,58$  Hz i  $f_{max}=195,0$  Hz.

Iako danas, zahvaljujući primeni računara, nema principijelnih teškoća u određivanju frekvencije prinudnih i sopstvenih oscilacija noseće konstrukcije rotornih bagera, eksperimentalna ispitivanja u stvarnim uslovima eksploatacije imaju prednost.

#### 4.2. Ispitivanja oscilacija i rezultati merenja

Mehaničke oscilacije noseće konstrukcije rotornog bagera karakteriše translatorno ili obrtno pome-

ranje pojedinih tačaka preseka tj. njihovo udaljenje od neutralnog položaja, koje se menja u vremenu  $Y=y(t)$ .

Za realizaciju eksperimentalnog ispitivanja, koje se sastoji od mernog programa, izvođenja merenja i određivanja vrednosti mernih veličina potreban je sistem mernih uređaja koji obuhvata karakteristična svojstva oscilovanja noseće konstrukcije rotornog bagera. Funkcija sistema mernih uređaja u suštini je obrada signala.

Sa ciljem da se izvrši analiza sopstvenih i prinudnih oscilacija, izvršena su merenja vertikalnih i horizontalnih pomeranja, brzina i ubrzanja na nosećoj konstrukciji različitih tipova bagera, u različitim režimima opterećenja. U radu su iznete analize sopstvenih i prinudnih oscilacija noseće konstrukcije rotornih bagera klase SRs 470.

Merenja vertikalnih i horizontalnih pomeranja, brzina i ubrzanja izvršena su vibracijskom metodom, na sredini nosećih vertikalnih stubova i na sredinama glavnih nosača gornjeg pojasa radne strele, analizatorom buke i vibracija „General Radio Company”, za različite faze rada bagera u teško obradivim sredinama, kada dolazi do jakih udarnih opterećenja. U sklopu merenja naprežanja na nosećoj konstrukciji rotornih bagera, takođe su izvršena i merenja vertikalnih pomeranja na sredinama glavnih nosača gornjeg pojasa radnih strela.

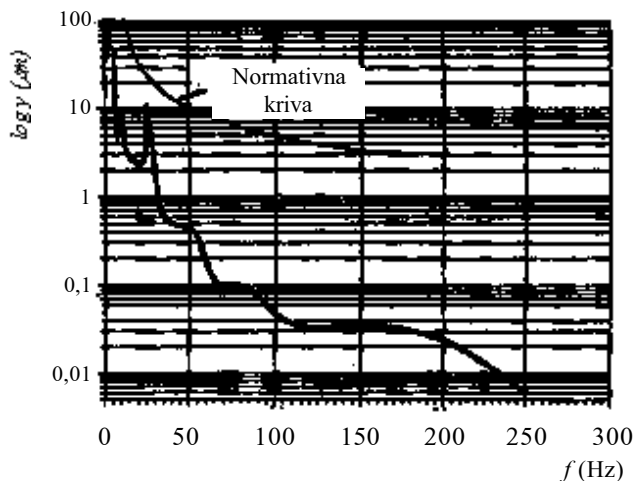
Analizom sopstvenih opterećenja rotornih bagera, odnosno registrovanjem oscilacije pri transportu i radnim pokretima izvan procesa kopanja, zavisno od tipa bagera (dužine radne strele) utvrđeno je da vrednosti osnovnih frekvencija sopstvenih oscilacija iznose:

- vertikalne oscilacije 1,0 - 3,2 Hz,
- poprečne 0,5 - 0,7 Hz i
- dužinske 0,4 - 0,5 Hz.

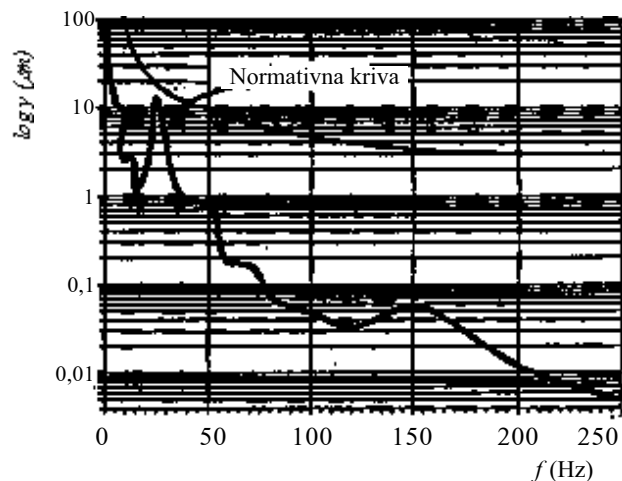
Takođe, utvrđeno je da logaritamski dekrement prigušenja,  $p$ , iznosi do 0,5, što predstavlja relativno malu snagu prigušenja i ukazuje na mogućnost pojave rezonancije.

Frekventne analize, s obzirom na teorijske pokazatelje, izvršene su za slučaj harmonijskih oscilacija u području učestanosti 2,5 – 250 Hz sa korakom od 1/3 oktave (trećinsko oktalna analiza). Frekventni spektri vertikalnih oscilacija u odnosu na normativnu krivu, za sva merna mesta jednog od ispitanih bagera prikazani su na slikama 10 i 11.

Najveće vertikalne oscilacije su zabeležene na glavnim nosačima radnih strela u području frekventne analize 2,5 - 5,0 Hz. Oscilacije u području frekventne analize 25 - 250 Hz, za koje autori kao Goldman, Zeler, Andrejeva-Golinina smatraju da su opasne ako su izražene velikim učešćem pomeranja, na osnovu ovih ispitivanja oscilacije se mogu zanemariti.

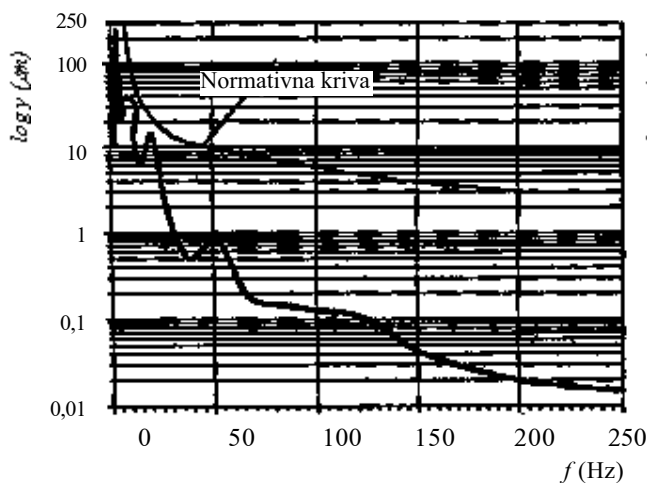


Merno mesto 1 (desni stub)

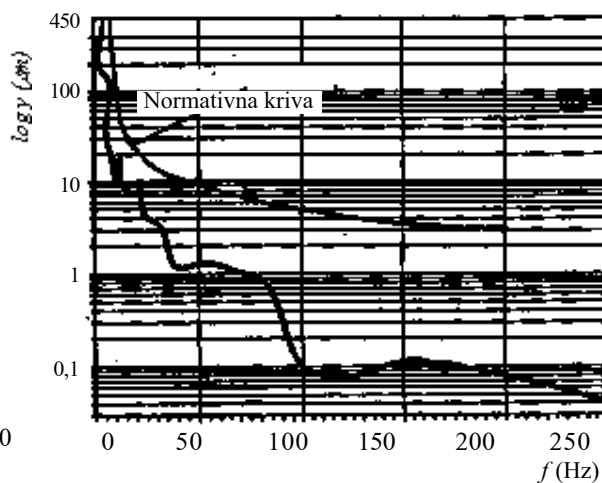


Merno mesto 2 (levi stub)

Slika 10. Frekventni spektar vertikalnih oscilacija na nosećim vertikalnim stubovima



Merno mesto 3 (na suprotnoj strani pogona)



Merno mesto 4 (na strani pogona radnog točka)

Slika 11. Frekventni spektar vertikalnih oscilacija na nosećoj konstrukciji radne strele

Kasnijim ispitivanjima, na radnim strelama rotornih bagera, pri tenzometrijskom merenju deformacija u cilju utvrđivanja radnih napona, odnosno spektra opterećenja [3], merene su i vertikalne, poprečne i dužinske oscilacije. Rezultati ispitivanja oscilacija su pokazali da se vertikalne oscilacije u radu bagera javljaju kao dvostruka amplituda u razmaku od 2 - 3 sekunde. Time je potvrđeno da opasnost od oscilovanja postoji u niskofrekventnom području.

Analize sopstvenih i prinudnih oscilacija pokazuju da je opasnost od pojave rezonancije veća kod konstrukcije radne strele nego kod nosećih vertikalnih stubova i to isključivo u niskofrekventnom području.

Frekventne analize oscilacija za različite faze rada bagera pokazuju da su sve oscilacije u dozvoljenim granicama, ali sa naglim promenama. Nagle promene oscilacija posledica su udarnih opterećenja.

Rezonancije koje nastaju poklapanjem sopstvenih oscilacija konstrukcije i oscilacija izazvanih periodičnim dejstvom opterećenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravni radne strele ne predstavljaju opasnost za konstrukciju, ukoliko radno tle ima karakter jakog prigušenja, dok u suprotnom mogu dovesti do brzih oštećenja najnapregnutijih preseka.

S obzirom na to da ovim ispitivanjima nisu obuhvaćena granična opterećenja koja se javljaju pri



nailasku rotornog bagera na okamenjene stenske mase, kada usled udarnih opterećenja praktično dolazi do zaustavljanja radnog točka u procesu rada, ne može se odrediti granica korisnog opterećenja.

## 5. ZAOSTALI NAPONI USLED ZAVARIVANJA I INTEGRITET KONSTRUKCIJE

S obzirom na to da zavareni spojevi spadaju u kritična mesta na konstrukciji rotornih bagera proučavanjem ponašanja materijala i zavarenih spojeva pri dejstvu promenljivog opterećenja se dolazi do podataka koji mogu pomoći da se realizuju konstrukcije sigurne u odnosu na udarna opterećenja i zamorni lom.

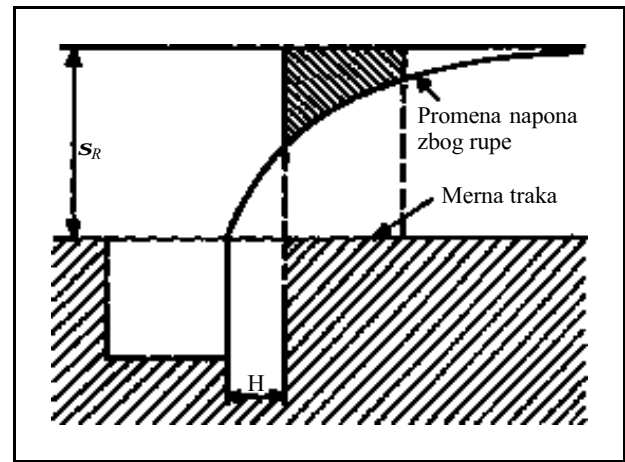
Zaostali naponi su prouzrokovani termičkim ciklusima zagrevanja i hlađenja u lokalnim područjima delova u toku zavarivanja, pri čemu je rastopljen metal šava (MŠ) ukrućen hladnim područjima koja ga okružuju. Neravnomerna raspodela temperatura pri zavarivanju izaziva nekompatibilne deformacije, što dovodi do nastanka samouravnotežavajućih zaostalih napona, koji ostaju u konstrukciji i posle njenog hlađenja do temperature okoline.

U uslovima promenljivog opterećenja, sumiranje zaostalih napona sa promenljivim naponima spoljnog opterećenja, dovodi do promene ukupnih napona, koji postaju veći ili manji. Na taj način, zaostali naponi mogu presudno uticati na procese stvaranja i rasta prslina.

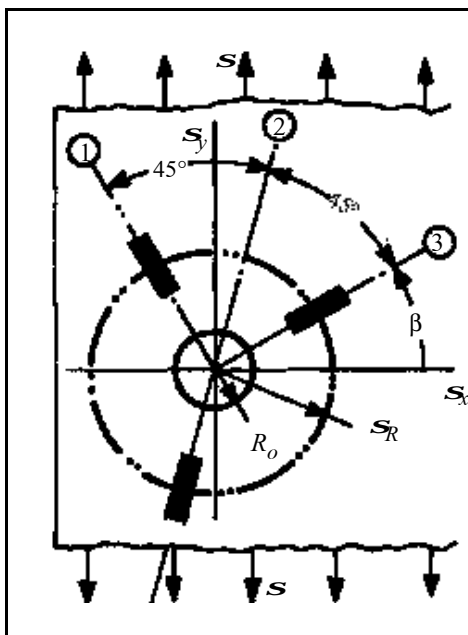
### 5. 1. Teorijske osnove određivanja zaostalih napona

Metoda bušenja središnje rupe je jedna od mehaničkih metoda za određivanje zaostalih napona koja se najčešće primenjuje pri ispitivanju realnih konstrukcija. Posle oko 40 godina usavršavanja ove metode, danas se koristi metoda sa specijalnim rozetama sa središnjim otvorom prečnika do 1,5 mm i mernom dužinom trake 1,5 mm.

Princip ove metode je prikazan na slici 12, gde je zaostali napon označen sa  $s_R$ . Kada se rupa izbuši, napon na ivici rupe mora da se svede na nulu, a dalje se napon menja kako je prikazano na slici 1.



Slika 12. Princip određivanja zaostalih napona  $s_R$  metodom bušenja središnje rupe i merenjem relaksiranih deformacija specijalnom rozetom



Slika 13. Shema određivanja dvoosnih zaostalih napona bušenjem središnje rupe

$$e_q = \frac{s_x}{A} \cos^2 \alpha + \frac{s_y}{B} \cos^2 \beta \quad (6)$$

$e_q$  - nije od značaja za ova merenja

$$s_x = \frac{A}{4AB \cos^2 \alpha} \left( \frac{1}{3} A B \cos^2 2\alpha - \frac{1}{3} A B \cos^2 2\beta \right) \quad (7a)$$

$$s_y = \frac{B}{4AB \cos^2 \beta} \left( \frac{1}{3} A B \cos^2 2\alpha - \frac{1}{3} A B \cos^2 2\beta \right) \quad (7b)$$

gde je:

$$A = \frac{1}{2E} \frac{1}{r^2} \quad r = \frac{R}{R_0} \quad (8a)$$

$$B = \frac{1}{2E} \left( \frac{4}{1} - \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right) \quad (8b)$$

$$C = \frac{1}{2E} \left( \frac{4}{1} - \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right) \quad (8c)$$

Merna traka (rozeta), koja se nalazi na odstojanju  $x$  od ivice rupe, prikazuje promenu deformacije, kao što je prikazano šrafiranom površinom na slici 12.

U opštem slučaju, naponsko polje je dvoosno i pravci glavnih napona su nepoznati. Zato je potrebna trojna rozeta, slika 13. Za bilo koju vrednost napona  $S_R$  izmerena deformacija je zavisna od rastojanja  $x$ . Zbog toga rupa mora da bude potpuno centrična, okrugla i poznatog prečnika.

Relaksirane deformacije, izmerene na rozeti, zavise od dubine rupe. Za dobijanje maksimalne relaksirane deformacije dovoljno je da dubina rupe bude približno jednaka prečniku rupe.

Teoretske osnove metode opisuju sledeće jednačine za dvoosno naponsko stanje, slika 13.

U ovom poglavlju su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja zaostalih napona usled zavarivanja u elementima zakovano-zavarene konstrukcije strele radnog točka i kašikama rotornog bagera SRs 1300.26/5.0, koji rade u različitim otkopnim sredinama [12].

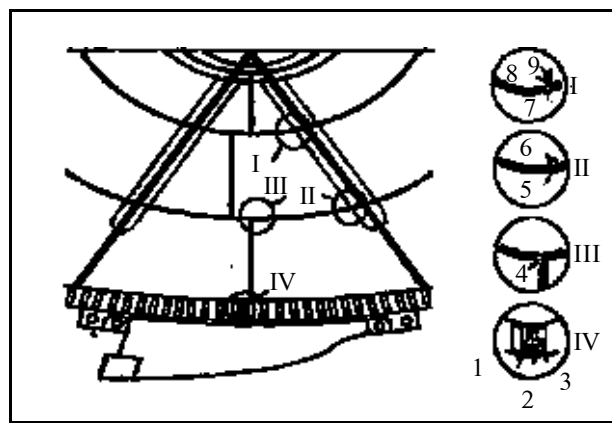
## 5.2. Eksperimentalno određivanje zaostalih napona

Merenje je izvedeno metodom bušenja središnje rupe specijalnom burgijom i uređajem za precizno centriranje. Korišćene rozete, tip RY-61 su proizvod firme HBM. Uređaj za precizno centriranje i bušenje se sastoji od univerzalne spojnice i magnetnog držača, koji služi kao vođica centrirajućeg klina i burgije pri bušenju u sredini rozete.

Merenje zaostalih napona od zavarivanja na konstrukciji radnog točka bagera je izvršeno u zoni zavarenih spojeva, slika 14. Izračunate vrednosti zaostalih napona su date u tabeli 2, a dijagrami zaostalih napona u pravcu šava  $S_x$  i poprečno na šav  $S_y$  date su na slici 15.

Merenje zaostalih napona na kašici je izvedeno na više mesta, tabela 3. Dijagrami zaostalih napona u pravcu šava ( $S_x$ ) i poprečno na šav ( $S_y$ ) date su na slici 16.

Dobijeni rezultati dozvoljavaju zaključak da su zaostali naponi od zavarivanja na kašikama i radnom točku visoki i da u lokalnim područjima zavarenih spojeva, u uslovima promenljivog opterećenja, mogu dostići napon tečenja, što dovodi do razvoja postojećih mikroprrslina i smanjenja integriteta konstrukcije.



Slika 14. Raspored devet mernih mesta

Tabela 2.

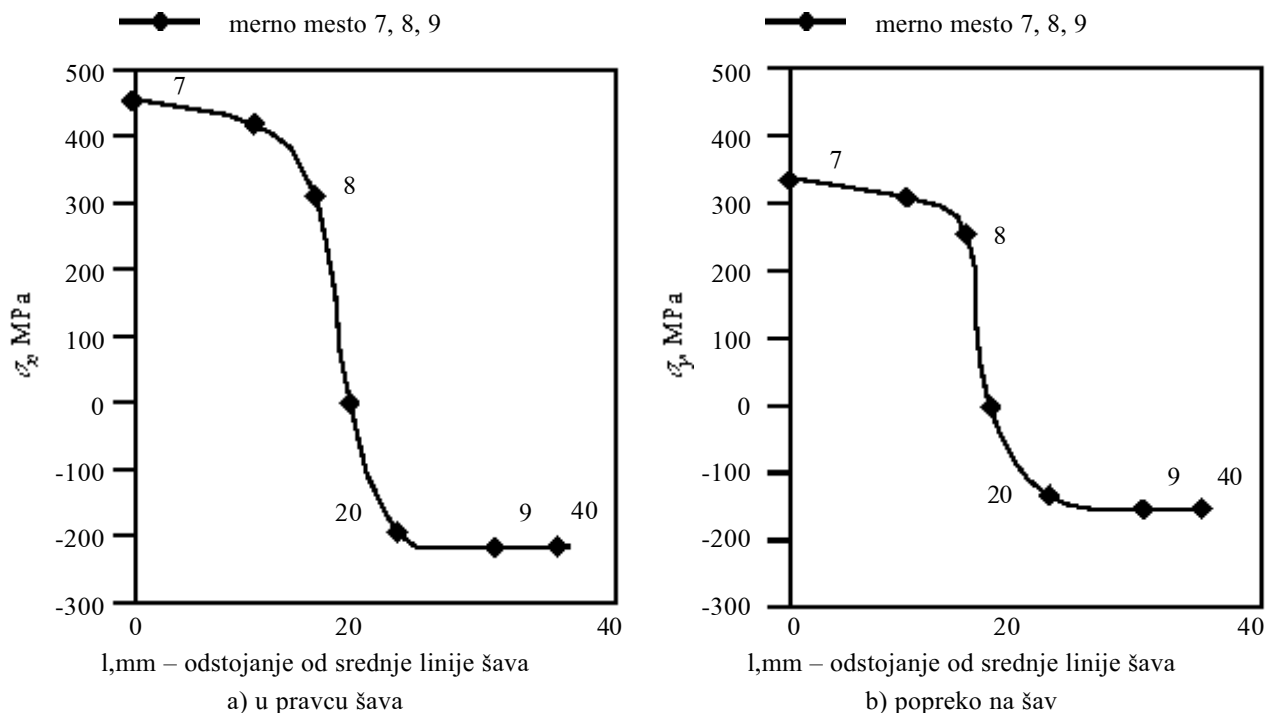
Vrednosti napona izračunate na osnovu korigovanih vrednosti deformacija

Merno mesto	1(šav)	2(ZUT)	3(OM)	4(ZUT)	5(šav)	6(ZUT)	7(šav)	8(ZUT)	9(OM)
$S_x$ (Mpa)	+240	+256	+153	+433	+421	+318	+457	+313	-213
$S_y$ (Mpa)	+171	+196	+104	+300	+169	+232	+334	+251	-154

Tabela 3.

Vrednosti napona sračunati na osnovu korigovanih vrednosti deformacija

Merna mesta	Zadnji oslonac kašike(sučeonni spoj)			Prednji oslonac kašike(ugaoni spoj)		
	11(šav)	12(ZUT)	13(OM)	ZUT	OM	ZUT
$S_x$ (Mpa)	+319	+373	+99	+568	-52	-362
$S_y$ (Mpa)	+248	+270	+9	-44	-52	-247

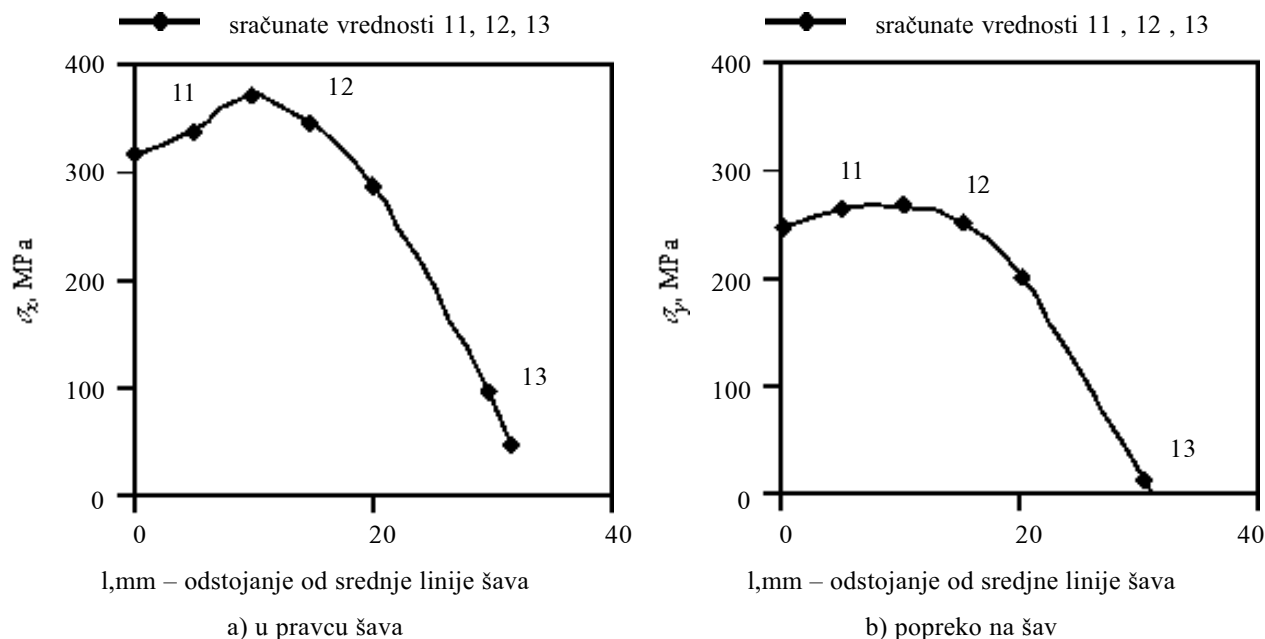


Slika 15. Dijagrami raspodele zaostalih napona na radnom točku

## 6. OCENA INTEGRITETA NA OSNOVU SPEKTRA NAPONA

Imajući u vidu već rečeno da se mali broj delova na rotornim bagerima može proračunati prema postojećim metodološkim uputstvima jasno je da jedino eksperimentalna ispitivanja daju pouzdane podatke za njihovo projektovanje i razvoj.

U ovom poglavlju su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja naponskog stanja u elementima zakovano-zavarene konstrukcije strele radnog točka i zategama rotornog bagera SRs 470. 15/3. 5, koji radi u različitim otkopnim sredinama [3], na osnovu izvršenih ispitivanja definisani su spektri opterećenja za eksperimentalna ispitivanja uticaja

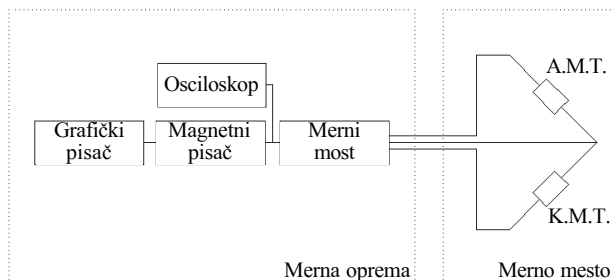


Slika 16. Dijagrami raspodele zaostalih napona na zadnjem delu kašike

nestacionarnosti režima opterećenja na radnu čvrstoću noseće konstrukcije rotornog bagera.

### 6.1. Merenje deformacija i određivanje radnih napona

Polazeći od karaktera opterećenja i principa dejstva mernih traka i merne opreme, za ova ispitivanja je korišćena oprema čija je struktura prikazana na slici 17.



A. M. T. -aktivna merna traka,  
K. M. T. -kompenzaciona merna traka

Slika 17. Shematski prikaz strukture merne opreme

U toku ispitivanja korišćen je četvorokanalni magnetni писаč HP-3964-A, proizvod firme Hewlett Packard. Pisač je posebno podešen da verno snima i reprodukuje zapis kada se i sam nalazi u dinamičkim uslovima rada. Širok dijapazon promene brzine zapisa i reprodukovanja omogućuje zapis brzih dinamičkih promena.

Za vizuelno praćenje stanja deformacija tokom ispitivanja korišćen je jednokanalni osciloskop, proizvod Iskra-Kranj. Njegova primena je posebno korisna zbog vizuelnog praćenja pojava pri eventualnom prekoračenju normiranih vrednosti.

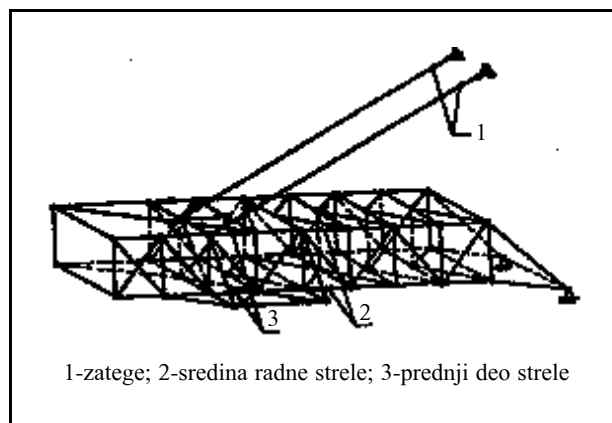
Za crtanje zapisa sa magnetofona na hartiju i za analizu istih korišćen je grafičko писаč, proizvod firme Rikadenki. Pored mogućnosti grafičkog zapisivanja, ovaj instrument može da pojačava signal u domenu od 1 mV do 500 V i razvlači signal u domenu od 1 cm/h do 60 cm/min, što omogućava dobijanje zapisa podesnih za analizu i prezentiranje.

#### 6.1.1. Metodologija ispitivanja i izbor mernih mesta

Eksploatacijski uslovi za jednu mašinu mogu biti različiti i zavise od većeg broja determinističkih i slučajnih parametara. U cilju utvrđivanja stvarnog naponskog stanja, odnosno promene naprezanja u vremenu na elementima konstrukcije strele radnog točka i zategama bagera, izvršena su merenja promene opterećenja i naprezanja u radnim uslovima u različitim otkopnim sredinama (otkrivci i uglju). Tako su izvršena:

- ispitivanja deformacija u rasterećenom stanju bagera,
- ispitivanja deformacija pri radu bagera na prazno,
- ispitivanja deformacija pri kretanju bagera (transportu),
- ispitivanja deformacija u prosečnim radnim uslovima,
- ispitivanja deformacija pri radu bagera u punom rezu.

Polazeći od statičkog proračuna konstrukcije strele rotora, teorijske analize deformacija elementa strele rotora i iskustvenih pokazatelja pojave prslina i lomova, određene su 3 merne zone sa po 4 merna mesta, slika 18. Merne zone 1 i 3 se nalaze u području zavarenih spojeva, pa se rezultati ispitivanja mogu koristiti za analizu ponašanja zavarenih spojeva izloženih promenljivom opterećenju.



Slika 18. Merne zone i merna mesta

Tenzometrijska merenja deformacija na konstrukciji radnog točka i kašikama su izvršena sa 10 mernih traka LY11-HBM i 30 rozeta RY31-HBM. Prenos električnog signala sa obrtnog vratila radnog točka do opreme za registrovanje i obradu signala izvršen je pomoću specijalno izrađenih kliznih bakarnih prstenova, koji su postavljeni na vratilu radnog točka i kontaktnih grafitnih četkica, postavljениh na stacionarnim nosačima, slika 19.

Sva merna mesta su locirana na unutrašnjoj i spoljnoj strani segmenta radnog točka, koji obuhvata prostor jedne kašike.

Zahvaljujući svojstvima merne opreme merenje deformacije na konstrukciji strele radnog točka i zategama su izvršena pri višestrukome ponavljanju režima radnih opterećenja.

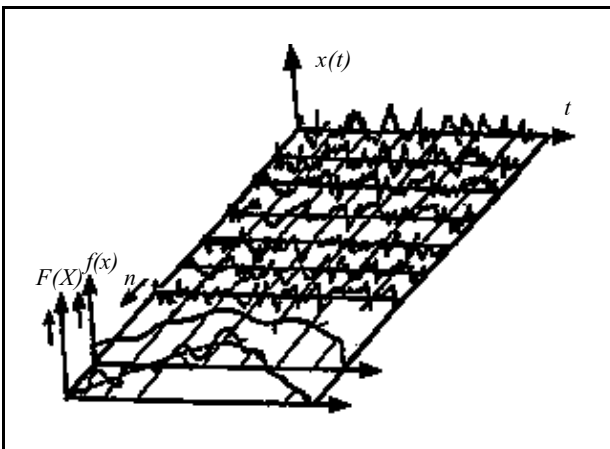
Eksperimentalno određene vrednosti radnih napona potvrdile su rezultate teoretske analize da se najveći naponi javljaju u zategama, i prednjem delu strele radnog točka.



Slika 19. Mesto postavljanja bakarnih prstenova i kontaktnih četkica

## 6.2. Definisanje spektra opterećenja

Osnovni parametri funkcije slučajnih procesa u amplitudnom području su: veličina amplitude, maksimalna, minimalna i srednja vrednost napona, broj pojava pojedinih parametara za određeni period rada, ukupan broj promena ciklusa u toku radnog veka [3], slika 20.



Slika 20. Skup realizacija slučajne veličine  $X(t)$  jednog nestacionarnog procesa opterećenja bagera

Definisanje odgovarajućih spektara radnih opterećenja, na osnovu zavisnosti naprezanje - vreme, radi kvantitativne ocene ponašanja komponenata noseće konstrukcije rotornih bagera u području zamorne čvrstoće materijala, ostvaruje se u dva koraka:

- izbor parametara slučajnog procesa i metode njihove diskretizacije,
- statistička obrada diskretizovanih veličina i njihov grafički i analitički opis teorijom verovatnoće i matematičke statistike.

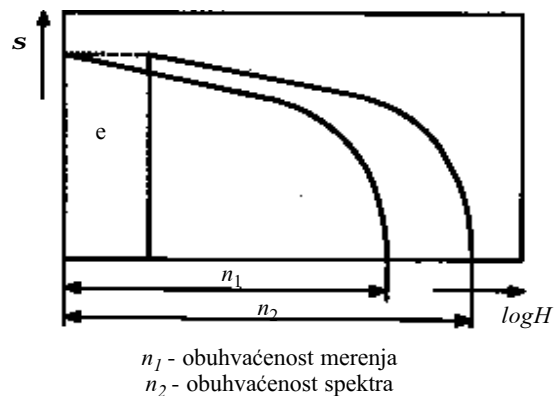
Postupci diskretizacije se mogu razvrstati u više osnovnih grupa: na postupke zasnovane na ekstremnim vrednostima procesa, na broju presecanja zadatog nivoa, na „vremenske“ postupke, postupke raspona, postupke ciklusa. Najpouzdaniji u analizi slučajnih procesa su postupci koji se zasnivaju na brojanju i klasificiranju celih ciklusa, bez zanemarivanja malih promena. U njima se ceo ciklus promena definiše kao zatvorena petlja histereza promene napon - deformacija ( $s - e$ ), sa odgovarajućim vremenskim zavisnostima napona ( $s - t$ ) i deformacije ( $e - t$ ). Najpoznatiji je postupak „rein-flou“.

Za ova istraživanja, primenom dvoparametarskog postupka „rein-flou“, diskretizovane su veličine tenzometrijskim merenjem utvrđenih zavisnosti naprezanje - vreme, za različite režime opterećenja rotornih bagera. Primenjeni postupak za definisanje odgovarajućih spektara opterećenja za zamorna ispitivanja kritičnih zavarenih spojeva noseće konstrukcije rotornih bagera dat je u radu [3].

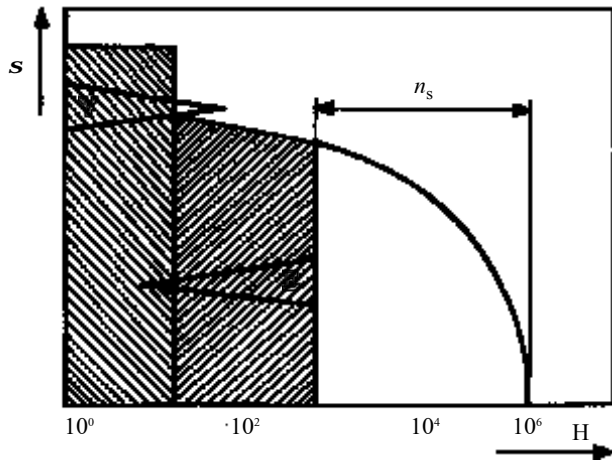
S obzirom na vreme i troškove ispitivanja, vreme merenja je u skoro svim slučajevima samo relativno mali deo ukupnog dejstva opterećenja, a svaki delimičan spektar samo jedno od tih stanja. Obuhvatanje vrednosti kratkih eksperimentalnih merenja za pojedina stanja opterećenja postiže se množenjem apsolutne učestalosti pojedinih spektara faktorom proširenja:

$$e = \frac{\text{obuhvaćenost stanja opterećenja}}{\text{obuhvaćenost merenja}} > 1$$

Ovo je na slici 21 prikazano kroz jednoparametarski spektar, gde najviša vrednost spektra ostaje sadržana i pri proširenju spektra. Određivanje najviše vrednosti spektra, pri skraćenom vremenu merenja u odnosu na vreme uvođenja u spektar, moguće je prvenstveno ekstrapolacijom, slika 22. U jediničnom spektru napona ( $n_b=10^5$ ) područje spektra  $n_s$ , utvrđeno na osnovu praktičnih merenja, najčešće obuhvata veće učestanosti napona ( $10^3-10^5$  ciklusa), što znači da su područja napona sa malom učestanošću (područja E i V) nepoznata, slika 22.



Slika 21. Prikaz proširenja spektra



Slika 22. Prikaz sastavljanja ukupnog spektra

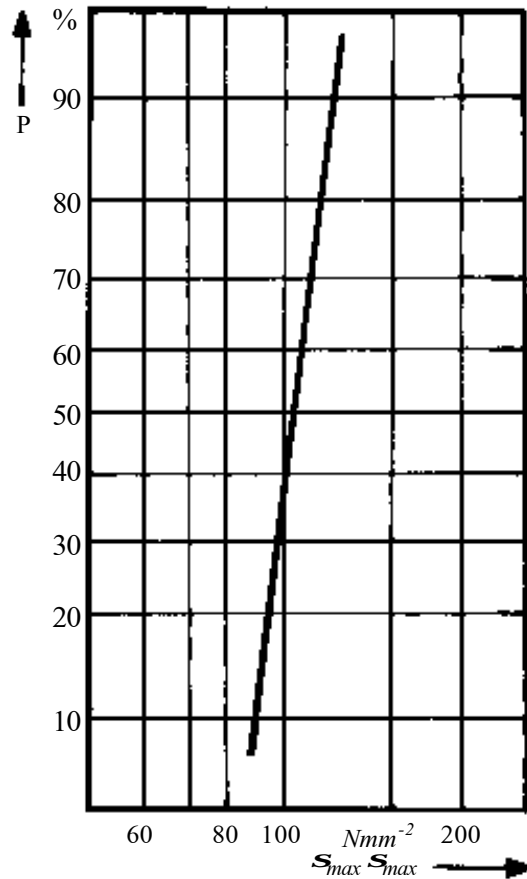
Područje *E* (učestanost  $10^2$ - $10^4$ ) popunjava se veličinama napona dobijenim ekstrapolacijom funkcije raspodele ukupne učestanosti, [3]. U ukupnom spektru napona za kritični presek na radnoj streli rotornog bagera deo spektra dobijen ekstrapolacijom prikazan je isprekidanom linijom. Područje *m* koje čine učestanosti najviših napona od  $10^1$ - $10^2$ , utvrđeno je na osnovu ekstremnih vrednosti, dobijenih posebnim ispitivanjima. Zbog malog broja eksperimentalnih vrednosti nije mogao da se primeni statistički postupak obrade diskretizovanih veličina. Zato je definisanje ekstremnih opterećenja u ukupnom spektru (područje *V*) za zamorna ispitivanja izvršeno primenom logaritamske normalne raspodele, jer se pokazalo da se vrednosti mogu dobro aproksimirati pravom linijom, slika 23.

Izmerene ekstremne vrednosti su uređene u rastući niz, slika 23, i za svaki član niza su izračunate verovatnoće  $P_j$ .

$$P_j = \frac{3j}{3k+1} (\%),$$

gde je *j* redni broj u nizu, *k* ukupni broj ekstremnih vrednosti.

<i>j</i>	$S_{max}$ (MPa)	$P_j$ (%)
1	92,30	10,53
2	97,02	26,32
3	102,30	42,63
4	109,10	57,90
5	118,20	73,68
6	125,00	89,49



Slika 23. Raspodela ekstremnih vrednosti u mreži logaritamske normalne raspodele

#### Parametri Vejbulovog zakona raspodele radnih napona za kritične preseke

Tabela 4.

$f(r) = \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{r}{h}\right) \quad F(r) = 1 - \exp\left(-\frac{r}{h}\right)$												
Parametri	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>d</i> -test	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>d</i> -test	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>d</i> -test
Opterećenje bagera (MPa)	Zatege				Sredina radne strele				Prednji deo strele			
Pri kretanju	52	2,6	46,2	0,156<0,163	34	2,4	30,1	0,098<0,124	41	3,6	36,9	0,089<0,102
Prosečno	73	3,2	65,4	0,093<0,127	40	2,4	35,5	0,090<0,128	65	3,6	58,5	0,122<0,127
U punom rezu	68	2,0	60,3	0,069<0,108	48	2,6	42,6	0,084<0,111	81	3,7	73,1	0,076<0,114

Grafičkim i analitičkim metodama teorije verovatnoće i matematičke statistike je utvrđeno da je za prikaz raspodele diskretizovanih amplituda ( $S_d$ ), odnosno raspona ( $S_r$ ) radnih napona najpogodnija dvo-parameterska Weibulova raspodela. Funkcije raspodele raspona napona dobijene su grafičkom metodom korišćenjem papira Weibulove verovatnoće u koji su unete kumulativne relativne učestanosti za odgovarajuće klase napona, tabela 4. Prihvatljivost Weibulovog zakona raspodele potvrđena je testom Kolmogorov-Smirnova, odnosno  $d$ -testom.

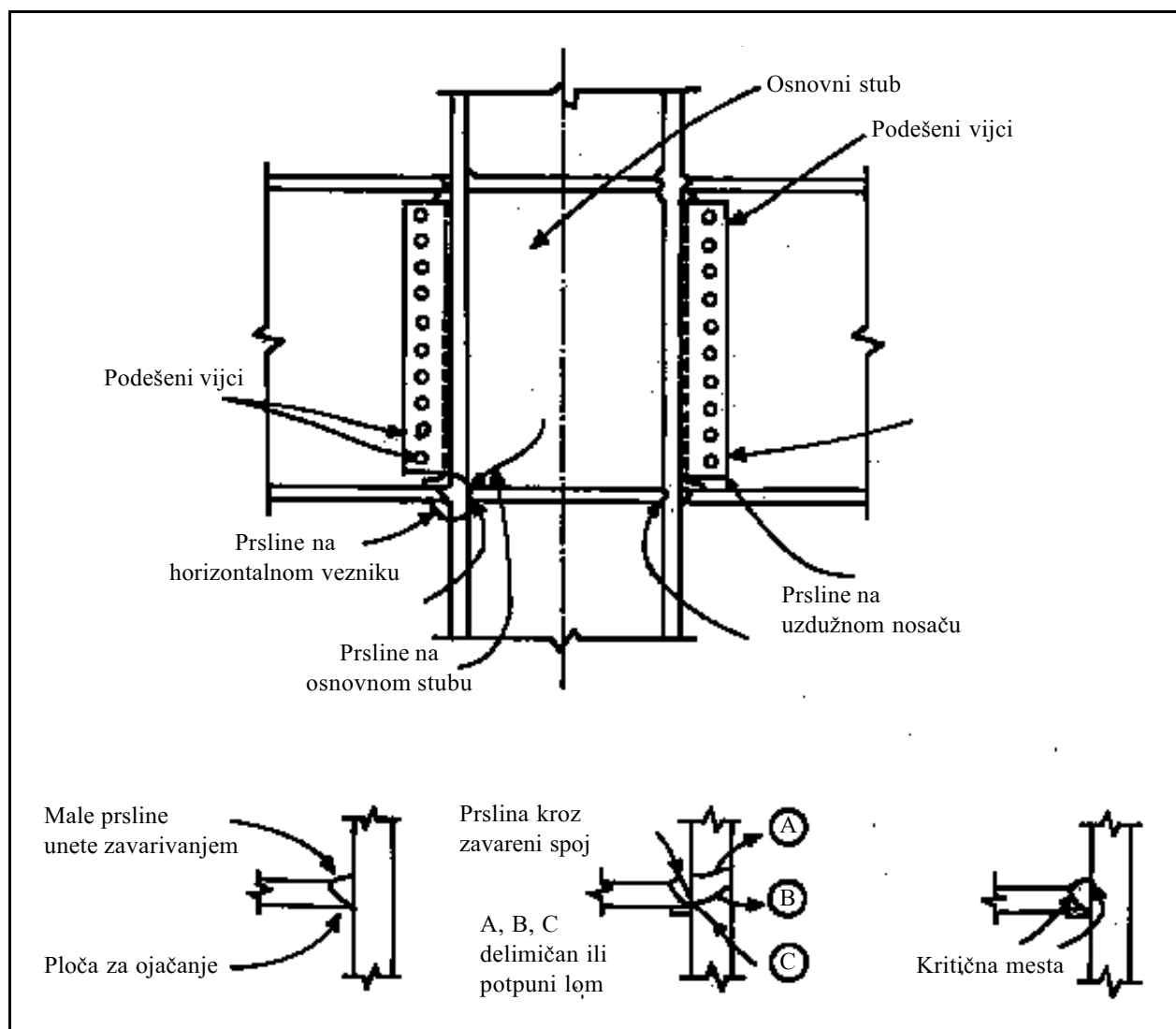
Statistički podaci o vremenu rada rotornog bagera za razmatrana opterećenja (pri kretanju, prosečno i u punom rezu) dati su u tabeli 5. Na osnovu podataka o režimima rada i njihovom procentualnom učešću, izvedena je kombinovana opadajuća funkcija napona  $H(S_r)=1-F(S_r)$ , [3], za kritični presek merne zone prednjeg dela radne strele, slika 24, u obliku:

$$H(S_r) = 0,04 \exp\left(-\frac{r}{41}\right)^{3,6} + 0,60 \exp\left(-\frac{r}{65}\right)^{3,6} + 0,36 \exp\left(-\frac{r}{81}\right)^{3,7} \quad (9)$$

Tabela 5.

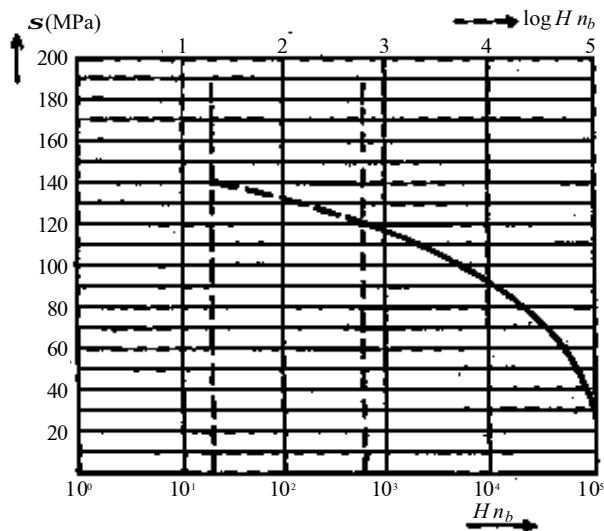
Statistički podaci o vremenu rada bagera za razmatrana opterećenja, %

Opterećenje	U transportu	Prosečno	U punom rezu
Trajanje opterećenja (%)	4	60	36



Slika 24. Prikaz kritičnog čvora noseće konstrukcije i mesta pojave zamornih prslina

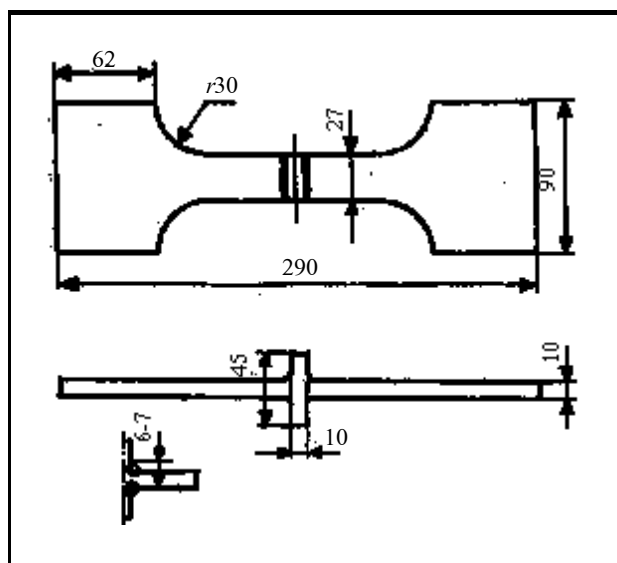
Ukupni jedinični spektri raspona napona za zamorna ispitivanja karakterističnih spojeva rotornog bagera, prikazani na slici 25, dobijeni su ekstrapolacijom kombinovanih opadajućih kumulativnih funkcija Vejbulove rasodele  $H(S_r)$  i unošenjem napona dobijenih ekstrapolacijom ekstremnih opterećenja.



Slika 25. Grafički prikaz jediničnog spektra raspona napona za prednji deo strele radnog točka bagera

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja na zamor krstastog zavarenog spoja, prikazanog na slici 26, sa konstantnom amplitudom opterećenja (S-N dijagram) i spektrom napona (dijagram radne čvrstoće) prikazani su u okviru slike 27.

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja na zamor sa konstantnom amplitudom opterećenja (S-N dijagram) i spektrom napona (dijagram radne čvr-



Slika 26. Krstasti spoj

stoće) omogućuju proučavanje zamorne čvrstoće delova i elemenata noseće konstrukcije rotornih bagera i istraživanje valjanosti teorije kumulativnog oštećenja.

### 6.3. Procena veka na bazi spektra napona

Za poznavanje uticaja nestacionarnosti režima opterećenja i sopstvenih niskofrekventnih oscilacija na radnu čvrstoću elemenata noseće konstrukcije rotornog bagera neophodno je poznavanje radnih napona, koji se uspostavljaju pri dejstvu promenljivog opterećenja u različitim radnim režimima bagera, odnosno poznavanje spektra napona.

Radna čvrstoća elemenata noseće konstrukcije određuje se uglavnom na dva načina:

- računskim putem primenom hipoteza o akumulaciji oštećenja,
- eksperimentalnim programskim ispitivanjem uzoraka bliskih realnim ili ispitivanjem realnih elemenata noseće konstrukcije, pri čemu je režim ispitivanja (spektar napona) usaglašen sa uslovima eksploatacije.

Najviše korišćene hipoteze zasnovane na akumulaciji zamornog oštećenja su prvo postavljena hipoteza linearnog akumuliranja oštećenja Polmgren-Minera i hipoteze Korten-Delou, Serensen-Kogaev i Hojbah koje su pokušale da isprave sistematske greške Polmgren-Minerove hipoteze, čineći podgrupu modifikovanih linearnih hipoteza. Suma akumulacije oštećenja u opštem obliku glasi:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (10)$$

gde se podrazumeva da lom nastaje kada suma dostigne vrednost 1,0. Za nezavarene materijale suma oštećenja varira u širokim granicama  $D = 0,1 \div 1,0$ , a za zavarene konstrukcije velikih dimenzija iskustva pokazuju da je suma oštećenja blizu vrednosti  $D = 0,5$  [1].

Osnovni nedostatak hipoteza zasnovanih na akumulaciji zamornog oštećenja je u tome što ne uzimaju u obzir „istoriju opterećenja”, što u realnim uslovima ima značajan uticaj na brzinu procesa akumulacije oštećenja. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da zamorna čvrstoća materijala bitno zavisi ne samo od oblika spektra opterećenja već i od težine spektra (težine režima opterećenja), kao i slučajnog preopterećenja ili udarnog opterećenja tzv. vršnog ili ekstremnog opterećenja [3].

Na bazi rezultata eksperimentalnih ispitivanja i utvrđenog jediničnog spektra napona [3] izračunate su karakteristične veličine potrebne za računsku procenu veka trajanja primenom linearnih hipoteza o akumulaciji oštećenja [13], tabela 6.



Veličine za izračunavanje veka trajanja

	i	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$D_{bi}$	1	19	58	504	3824	21112	54326	85462
2	$D_{bi}/n_b$	$6 \times 10^{-6}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$3,05 \times 10^{-4}$	0,023	0,128	0,329	0,517
3	$s_i [N/mm^2]$	141,38	94,26	90,22	80,78	68,66	53,9	40,4	26,92
4	$s_i/s_{i1}$	1	0,667	0,638	0,5714	0,486	0,381	0,286	0,191
5	$(s_i/s_{i1})^{6,7}$	1	0,066	0,049	0,024	0,007 9	0,001 6	0,000 23	0,000 015
6	$(D_{bi}/n_b)(s_i/s_{i1})$	$6 \times 10^{-6}$	$7,67 \times 10^{-5}$	$2,23 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-3}$	0,011 2	0,048 8	0,094	0,099
7	$(D_{bi}/n_b)(s_i/s_{i1})^{6,7}$	$6 \times 10^{-6}$	$7,63 \times 10^{-6}$	$1,72 \times 10^{-5}$	$7,17 \times 10^{-5}$	$1,82 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$7,46 \times 10^{-5}$	$7,71 \times 10^{-6}$
8	$(s_i/s_{i1})^{12,4}$	1	$6,59 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$9,68 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-4}$	$6,41 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,17 \times 10^{-9}$
9	$(D_{bi}/n_b)(s_i/s_{i1})^{12,4}$	$6 \times 10^{-6}$	$7,58 \times 10^{-7}$	$1,33 \times 10^{-6}$	$2,95 \times 10^{-6}$	$0,03 \times 10^{-4}$	$0,82 \times 10^{-6}$	$0,59 \times 10^{-7}$	$0,61 \times 10^{-9}$

## 6.3.1. Hipoteza Polmgren-Miner

Funkcija interakcije napona  $a_p=1$ .

Vek trajanja:

$$N_{R_{pM}} = \frac{N_1}{\prod_{i=1}^j \frac{n_{bi}}{n_b} \prod_{r=1}^m \frac{r_i}{r_1}} = \frac{586\,650}{13,63 \cdot 10^6} = 4,304 \cdot 10^{10} \quad (11)$$

$j=2$  - nivoi napona u spektru koji su veći od trajne zamorne čvrstoće.

## 6.3.2. Hipoteza Korten-Delon

Funkcija interakcije napona  $a_p=1$ .

Vek trajanja:

$$N_{R_{CD}} = \frac{N_1}{\prod_{i=1}^k \frac{n_{bi}}{n_b} \prod_{r=1}^m \frac{r_i}{r_1}} = \frac{586\,650}{566,903 \cdot 10^6} = 1,0348 \cdot 10^9 \quad (12)$$

$k=8$  - svi nivoi napona u spektru.

## 6.3.3. Hipoteza Serensen-Kogaev

Funkcija interakcije napona:

$$a_p = \frac{\prod_{i=1}^k \frac{n_{bi}}{n_b} \prod_{r=1}^m \frac{r_i}{r_1} \cdot 0,5}{\prod_{D} \frac{1}{D} \cdot 0,5} = \frac{141,38}{92,59} \cdot 0,5457 \cdot 0,5}{\frac{141,38}{92,59} \cdot 0,5} = 0,325 \quad (13)$$

Vek trajanja:

$$N_{R_{SK}} = \frac{a_p N_1}{\prod_{i=1}^j \frac{n_{bi}}{n_b} \prod_{r=1}^m \frac{r_i}{r_1}} = \frac{0,325 \cdot 586\,650}{13,63 \cdot 10^6} = 1,397 \cdot 10^{10} \quad (14)$$

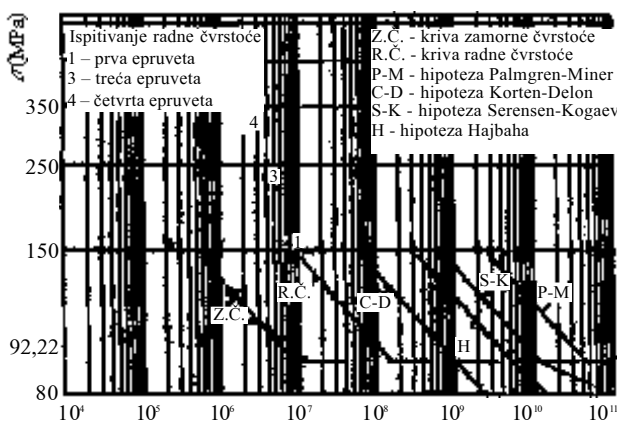
$k=8$  - svi nivoi napona u spektru.

## 6.3.4. Hipoteza Hajbaha

$$N_{RH} = \frac{N_1}{\prod_{i=1}^j \frac{n_{bi}}{n_b} \prod_{r=1}^m \frac{r_i}{r_1} \prod_{D} \frac{1}{D} \prod_{i,j=1}^k \frac{n_{bi}}{n_b} \prod_{r=1}^{2m} \frac{r_i}{r_1}} = \frac{586\,650}{13,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{141,38}{92,59}^{5,7}} = 8,129 \cdot 10^6 \quad (15)$$

Grafički prikaz eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih na bazi linearnih hipoteza o akumulaciji oštećenja dat je na slici 27.

Upoređenje rezultata eksperimentalnog ispitivanja sa računskom procenom veka, slika 27, je značajno za odgovor kako tačno i do koje mere rezultati ispitivanja sa promenljivom amplitudom optere-



Slika 27. Prikaz eksperimentalnih rezultata i rezultata proračuna

ćenja mogu biti preneti na druge konstrukcije sa istom „istorijom naprežanja” ili na isti tip konstrukcija, ali sa drugačijom istorijom naprežanja.

## 7. ZAKLJUČAK

*Rezultati prikazani u radu i realizovana istraživanja [1-16] pružaju velike mogućnosti u opsežnim analizama ponašanja odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija rotornih bagera, u cilju utvrđivanja promena mehaničkih svojstava materijala, delova i zavarenih spojeva konstrukcija pri variranju velikog broja uticajnih faktora, a da se dobiju sigurnije konstrukcije ili da se neki nepoželjni efekti svedu na podnošljivu vrednost, odnosno da se realizuje povoljno konstrukcijsko rešenje rotornog bagera kao celine.*

*Brzo i pouzdano rešenje problema za odgovorne delove i elemente nosećih konstrukcija moguće je ostvariti isključivo stvaranjem baze podataka i osnova za razvoj računarskih programa. Prateći softverski paketi omogućili bi efikasnije korišćenje baza podataka, analizu pojedinih uticajnih faktora, tehnika poboljšanja, mogućnosti preventive njihovog razaranja i pretraživanje varijantnih rešenja u svim fazama projektovanja i razvoja konstrukcija rotornih bagera.*

## 8. LITERATURA

- [1] Džoni A.: TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA ANALIZA STANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA KONSTRUKCIJE RADNOG TOČKA ROTORNOG BAGERA, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Skoplje, 1985.
- [2] Arsić M.: TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA ANALIZA STANJA ZAVARENE KAŠIKE ROTORNOG BAGERA, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Skoplje, 1986.
- [3] Arsić M.: KORELACIJA ZAMORNE ČVRSTOĆE I PRAGA ZAMORA ZAVARENIM SPOJEVA, Doktorska disertacija, Priština, 1995.
- [4] Arsić M., Sedmak S., Sarvan M.: ANALIZA UZROKA POJAVE PRSLINA NA ZAVARENIM SPOJEVIMA KONSTRUKCIJE ROTORA BAGERA SRs 1300.26/5.0, Međunarodno savetovanje „Zavarivanje '96”, Beograd, 1996.
- [5] Arsić M., Sedmak S., Ćirković B.: ANALIZA UZROKA HAVARIJE ZAVARENOG NOSAČA SA TELITA REDUKTORA ZA POGON ROTORA BAGERA SRS 1300.26/5.0, Međunarodno savetovanje „Zavarivanje 96”, Beograd, 1996, str. 29.
- [6] Volkov D. P., Ćerkasov V. A.: DINAMIKA I ČVRSTOĆA BAGERA, GLODARA I ODLAGAČA, Prevedeno sa ruskog, Zavod za informatiku i ekonomiku Rudarskog instituta, Beograd, 1989.
- [7] Arsić M., Ljamić D., Ćirković B.: EKSPERIMENTALNA ANALIZA RADNOG OPTEREĆENJA POGONA RADNOG TOČKA ROTORNOG BAGERA, naučno-stručni skup „Istraživanje i razvoj mašinskih sistema i elemenata” - IRMES 95, Niš, 1995.
- [8] Arsić M., Sedmak S., Ljamić D.: EKSPERIMENTALNA ANALIZA NAPONSKOG STANJA I RADNOG OPTEREĆENJA TRAKASTIH TRANSPORTERA, XIII međunarodni naučno-stručni skup „Transport u industriji”, Beograd, 1994, str. 16-21.
- [9] Arsić M., Ljamić D., Ćirković B.: EKSPERIMENTALNA ANALIZA RADNOG OPTEREĆENJA OBRTNOG TOČKA ROTORNOG BAGERA SCH Rs 650/5X24, IV naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem „Mehanizacija u rudarstvu”, Beograd, 1995, str. 92-99.
- [10] Arsić M., Aleksić V.: ISPITIVANJE OSCILACIJA NOSEĆE KONSTRUKCIJE ROTORNOG BAGERA, II Skup o konstruisanju, oblikovanju i dizajnu, „KOD 2002”, Novi Kneževac, 2002, str. 137-140.
- [11] Zienkiewicz O. C.: METHODE DER FINITEN ELEMENTE, München, 1975.
- [12] Arsić M., Sedmak S., Aleksić V., Anđelković Z.: UTICAJ ZAOSTALIH NAPONA OD ZAVARIVANJA NA PONAŠANJE KONSTRUKCIJA ROTORNIH BAGERA U EKSPLOATACIJI, Međunarodna konferencija „ZAVARIVANJE 2003”, Beograd, 2003.
- [13] Arsić M., Sedmak S., Aleksić V.: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION OF CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE OF WELDED STRUCTURE, Conference „FATIGUE-DEMA-GE”, Seville, 2003
- [14] Arsić M., Sedmak S., Sarvan M.: ANALIZA ČVRSTOĆE I POUZDANOSTI KRITIČNIH ZAVARENIM SPOJEVA ODGOVORNIH NOSEĆIH KONSTRUKCIJA ROTORNIH BAGERA, časopis „Zavarivanje i zavarene konstrukcije”, Vol. 42, br. 3, 1997, str. 203-206.
- [15] Arsić M., Ljamić D., Aleksić V., Sedmak S.: KONTINUALNO DIJAGNOSTICIRANJE REDUKTORA ZA POGON ROTORA BAGERA U FUNKCIJI UPRAVLJANJA RIZIKOM, Savetovanje sa međunarodnim učešćem PREVING, Beograd, 2001.
- [16] PLC Direct by Koyo, INTERNATIONAL SALES CATALOG, 1996, str. 215.

Rad je primljen u uredništvo 26. 12. 2003. godine



**Miodrag Arsić** (1954) je diplomirao (1978) na Mašinskom fakultetu u Prištini, magistrirao (1986) na Mašinskom fakultetu u Skoplju na odseku Zavarivanje i zavarene konstrukcije i doktorirao (1995) na Mašinskom fakultetu u Prištini, pod mentorstvom prof. dr. Stojana Sedmaka. Teme magistarskog rada i doktorske disertacije vezane su za ocenu integriteta i procenu veka nosećih konstrukcija rotornih bagera. Od 1987. do 1991. godine je radio na poslovima rukovodioca tehničke pripreme i održavanja na Površinskom kopu „Dobro Selo”, Kosovo. Od 1991. do 1999. godine radi kao predavač na Mašinskom fakultetu u Prištini i Rudarsko metalurškom fakultetu u Kosovskoj Mitrovici (Osnove konstruisanja, Metode konstruisanja, Mehanizmi, Ispitivanje metala). Danas je u stalnom radnom odnosu u Institutu GOŠA, na radnom mestu Pomoćnika direktora za nauku, istraživanje i obrazovanje. Član je društva za mašinske elemente i konstrukcije (JUDEKO), društva za unapređenje zavarivanja Srbije (DUZ Srbije) i član predsedništva društva za Integritet i vek konstrukcija (DIVK). Član je i izdavačkih odbora časopisa „Konstruisanje mašina”, izdavač JUDEKO, Beograd i časopisa „Integritet i vek konstrukcija”, izdavač Institut GOŠA i DIVK, Beograd. Danas učestvuje u realizaciji 5 projekata iz Programa Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj, kao i 2 projekta iz Programa EUREKA. Autor je više od 70 naučnih i stručnih radova prezentovanih na stranim i domaćim konferencijama i publikovanih u časopisima. Takođe, bio je rukovodilac u realizaciji više od 30 projekata vezanih za probleme mašinskih konstrukcija i sistema kao i opreme pod pritiskom, (ovlašćeni projektant).



**Prof. dr. Stojan Sedmak**, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta (u penziji) za Konstruisanje procesne opreme i Zavarivanje rođen je 1929. godine. Bio je profesor na poslediplomskim studijama iz zavarivanja za strane studente. Glavni je istraživač na jugoslovensko-američkom projektu „Mehanika loma zavarenih spojeva” (1982-1992). Rukovodilac je istraživačkih projekata i ekspertiza iz zavarivanja i loma konstrukcija. Mentor je 17 doktorskih disertacija i 12 magistarskih teza. Bio je glavni i odgovorni urednik časopisa „Zavarivanje i zavarene konstrukcije” od 1989-2000. Od 2001. godine Predsednik je Društva za integritet i vek konstrukcija (DIVK).

Urednik je 7 monografija Letnje škole mehanike loma. Autor je 6 knjiga i više od 200 radova.



**Vujadin D. Aleksić** Rođen je 8. 3. 1963. godine u Donjoj Brijesnici, opština Lukavac, bivša BiH. Osnovnu školu i Gimnaziju završio je u Lukavcu, a Rudarsko-geološki fakultet (smer mašinski) u Tuzli. Od 1989. godine radi u Fabrici šinskih vozila, HK „GOŠA”, iz Smederevske Palanke. Godine 1994. prelazi u Institut „GOŠA” u Beogradu, gde i danas radi. Stručni ispit položio je 1999. godine. Iste godine je magistrirao na katedri za mašinske materijale i zavarivanje Mašinskog fakulteta u Beogradu sa temom „Primena inženjerskih metoda za određivanje sila rasta prsline u zavarenim spojevima sa zaostalim naponima i geometrijskim nepravilnostima”. U aprilu 2001. godine stekao je zvanje „istraživač saradnik”, u skladu sa zakonom.

U aprilu 2003. godine završio je i školu za međunarodne inženjere za zavarivanje. Odličan je poznavalac više računarskih programa, a i sam programira. U svom radu služi se engleskim, ruskim i nemačkim jezikom. Učesnik je u realizaciji 3 projekta iz Programa Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj, kao i 2 međunarodna projekta iz programa EUREKA. U preko 20 radova se pojavljuje kao autor ili koautor.

# Održavanje jonoizmenjivačkih smola

Pregledni rad  
UDK: 628.161; 628.1; 549.8

---

*Rezime:*

*U radu se analizira problematika zaprljanja jonoizmenjivačkih smola različitim komponentama iz vode i kondenzata, te indikacije odnosno simptomi zaprljanja. Ponuđena su moguća rešenja za skidanje nečistoća sa smola. Posebna pažnja posvećena je skidanju silicijuma i sulfata sa smola. Data su kratka uputstva za čuvanje smola u uređajima u vreme dužeg isključenja iz rada i čuvanje smole u rezervi.*

**Ključne reči:** *jonoizmenjivačke smole, makroporozne smole, koloidni silicijum, bio-zaprljanja smola, algicidi i baktericidi*

---

*Abstract:*

*MAINTENANCE OF ION EXCHANGE RESINS*

*The paper analyzes the problem of fouling of ion exchange resins by means of different components from water and condensates, as well as indications and symptoms of fouling. Possible solutions are suggested for removal of fouling from resins. Special attention is given to silicate and sulphate removal from resins. Brief instructions are given for resin preservation in devices during longer outages as well as for preservation of spare resin.*

**Key words:** *ion exchange resins, macroporous resins, colloide silicates, bio fouling, algicides and bactericides*

## 1. UVOD

Vek jonoizmenjivačkih smola je relativno dug, zavisno od načina korištenja, opterećenja i vrste vode koju obrađuju kao i održavanja između eksploatacionih ciklusa. Intenzitet korištenja smole može biti veći ili manji, zbog čega je manja ili veća mogućnost njihove nege između dva ciklusa.

Fizičko i hemijsko opterećenje vode može biti veće ili manje, zavisno od vrste izvora i prvog stepena obrade. Nedostatak raspoloživog vremena i uslova za regeneraciju i čišćenje smola takođe utiču na efikasnost njihovog rada i vek trajanja. U ovom de-

lu govori se o najčešćim prolaznim i trajnim zaprljanjima smole i postupcima održavanja i obnavljanja njenih osobina.

## 2. ZAPRLJANJE SMOLA

To je pojava akumulacije stranih agenasa na površini zrnaca smole. Time se smanjuju performanse postrojenja, odnosno smanjuje eksploatacioni ciklus i povećava vreme ispiranja.

Zaprljanje može biti dakle dvojako, prolazno ili trajno. Njemu su podložne katjonske i anjonske smole u svim varijantama upotrebe.

### 3. ZAPRLJANJA KATJONSKIH SMOLA

Potiču od gvožđa, mangana, aluminijuma i kalcijumsulfata deponovanih na njenim zncima. Prisustvo ovih je posledica neefikasnih i neopreznih regeneracija sa kiselinama. Da bi se preveliko opterećenje i zaprljanje smole izbeglo, poželjno je skidanje gvožđa iz sirove vode u prvom stepenu obrade na nivo ispod  $0,1 \text{ mg/dm}^3$ . Ovde se preporučuje efikasna koagulacija i flokulacija nečistoća kod dekarbonizacije vode i filtracija primenom posebnih filtracionih sredstava, kao što je manganski zeleni pesak, odnosno primenom, danas, namenskih načinjenih smola.

Simptomi zaprljanja ovih smola su nizak kvalitet obrađene vode, izražen visokim i prevremenim probijem natrijuma i smanjenje radnog ciklusa. Zaprljanje smole gvožđem, manganom i aluminijumom skidaju se posebnom obradom sa 6-10 % *HCl*, te sa 4 % natrijumditionatom (ovim se gvožđe redukuje iz feri u fero - oblik). Rastvor natrijumditionata pravi se neposredno pred upotrebu, jer se vrlo brzo oksidiše kiseonikom iz vazduha. Iz istog razloga, dok je rastvor u filtru, ne vrši se rastresanje smole vazduhom (doći će do deaktiviranja natrijumditionata). Zaprljanje smole aluminijumom je posledica loše optimizacije pogona prvog stepena obrade vode.

Znaci zaprljanja smole aluminijumom su visok pad pritiska, pad kvaliteta obrađene vode i smanjenje radnog ciklusa.

Skidanje aluminijuma je uspešno, pre svega, vazduhom i povratnim ispiranjem. Skidanje kalcijumsulfata sa smole je dosta uspešno sa 10-15 % *HCl*. Međutim, u slučaju nekoliko uzastopnih pojava ovog zaprljanja, smolu je najbolje zameniti. Naime, kod regeneracije katjonskih smola sa sumpornom kiselinom, moguća je pojava precipitacije i odlaganja taloga kalcijumsulfata na smoli. Ovo se sprečava regeneracijom smole u više etapa. Tako uvođenje kiseline počinje sa koncentracijom od 0,5 % i u sledećim etapama ide do 4,0 %. Veličina protoka rastvora ove kiseline zavisna je od procentualnog učešća *Ca* i *Mg* u sirovoj vodi. Što je veći procenat ovih elemenata u vodi, utoliko je nužno obezbediti veći protok rastvora po jedinici volumena smole.

### 4. ZAPRLJANJA ANJONSKIH SMOLA

Najčešće su izazvana gvožđem, tvrdoćom, silicijumom i organskim materijama. Gvožđe dospeva na ove smole tokom rada u obliku organskih kompleksa i taloženjem kao gvožđehidroksida pri regeneraciji, kao i usled korištenja lošeg kvaliteta lužine. Ovo zaprljanje može biti sprečeno takođe optimizacijom prvog stepena obrade vode i ugradnjom uređaja sa smolom namenjenom za skidanje organskih

materija, tzv. skavendžerom, ispred linije demineralizacije.

Simptomi zaprljanja ovih smola su loš kvalitet obrađene vode, izražen visokom provodljivošću, visokim probijem silicijuma i potreba za dugim ispiranjem. Gvožđe i tvrdoća se uklanjaju sa smole sa 5-6 % *HCl*, posle čega sledi uklanjanje organskih materija alkalno-slanim rastvorom.

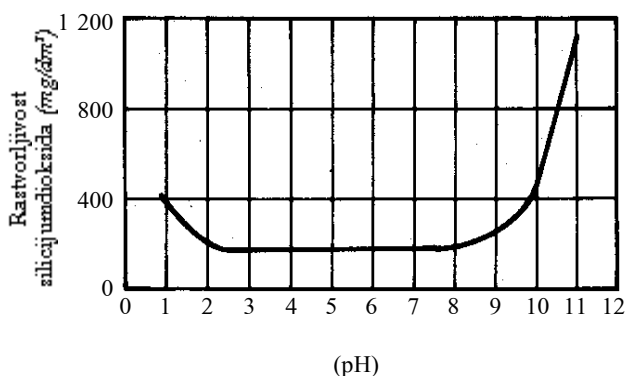
Zaprljanje smole jonima tvrdoće (kalcijum i magnezijum) potiče iz procesa regeneracije lužinom lošeg kvaliteta i primenom tvrde vode za rastvaranje. Zaprljanje silicijumom je najteži problem koji nastaje kod primene smola. Ovo zaprljanje je izazvano polimerizacijom silicijuma na zncima smole zbog niske temperature, suviše visoke koncentracije lužine ili sporog protoka ovog rastvora pri regeneraciji.

Zaprljanje smole silicijumom može biti takođe izazvano naglim padom *pH* rastvora lužine koja ulazi u sloj slabo bazne smole, ako je regeneracija jako i slabo bazne smole istovremeno u jednom toku. Ova pojava se svakako sprečava regeneracijom uz više temperature ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) i uz suvišak lužine, kao i optimiziranjem istovremene regeneracije jako i slabo baznih smola.

Simptomi zaprljanja ovih smola silicijumom su pad kvaliteta obrađene vode, izražen preranim probijem silicijuma u vodi i produženo vreme ispiranja. Temeljno skidanje silicijuma sa smole uspešno se sprovodi njenim potapanjem u lužinu zagrejanu do  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Istom cilju služi i potapanje smole u *HCl*.

Na slici 1 prikazan je efekat *pH* vrednosti na rastvorljivost silicijumdioksida ( $\text{mg/dm}^3$ ) na  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Na ordinati je data vrednost rastvorljivosti a na apscisi *pH*.



Slika 1.

Poseban je problem *koloidni silicijum* u sirovoj vodi. On je obično prisutan u kombinaciji sa  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i organskim materijama. Tačna kompozicija ovog kompleksnog jedinjenja zavisi od prirode tla i raznolika je kroz godišnja doba. Obični jonoizme-

njivači, kako porozni tako i makroporozni, ne uklanjaju koloidni silicijum iz vode. Koloidi imaju dimenzije u području 200-2 000 Å (1 Å=10<sup>-10</sup> m) i zbog njihove molekularne pokretljivosti, efektivan adsorbent mora imati prečnik pora deset puta veći.

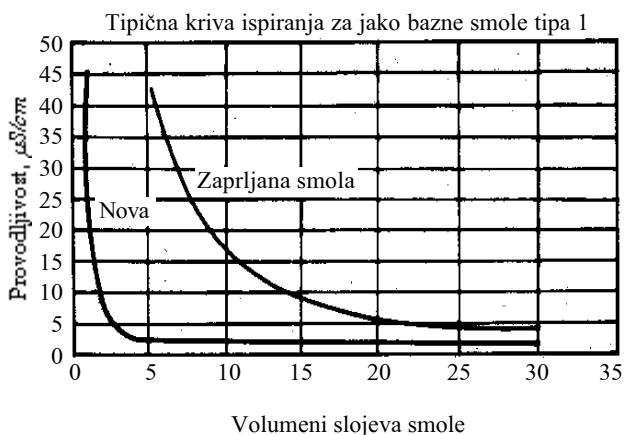
U praktičnom smislu, pore smole manje od 20 Å ne obezbeđuje adsorpciju koloida. Zbog čestog prisustva koloidnog silicijuma u vodama, proizvedene su naročite smole koje ga skidaju (primer smole Purolite A501P). Ove smole zahtevaju posebnu regeneracionu proceduru:

- 1-2 volumena rastvora 5 - 10 % HCl na 60 °C a potom,
- 2-3 volumena rastvora 4 % NaOH na 40 °C.

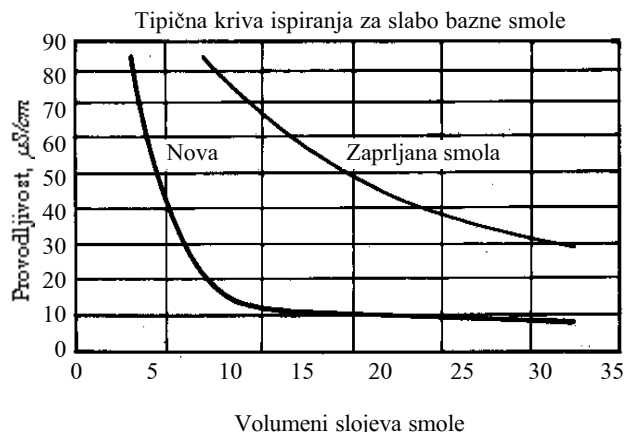
U prvom koraku skidaju se svi oksidi metala i veći deo silicijuma zadržanog tokom prethodnog ciklusa. U drugom koraku skida se silicijum koji je ostao posle prvog koraka.

Zaprljanje anjonskih smola organskim materijama izazvano je uključenjem velikih organskih molekula u pore zrnaca. Ove molekule tokom eksploatacije polako difunduju u dubinu pora zrnaca smole. Međutim, njihovo eluiranje(izvlačenje) tokom regeneracije je neefikasno zbog kratkog kontakta regeneranta sa smolom. Simptomi ovog zaprljanja su pad kvaliteta obrađene vode izražen visokom provodljivošću i probijem silicijuma i zahtevom za ekstremno dugim ispiranjem. Ovaj problem se ublažava izborom makroporoznih smola za obradu vode sa izrazito visokim nivoom organskih materija.

Na slikama 2 i 3 predstavljene su tipične krive ispiranja novih i zaprljanih jako i slabo baznih smola. Da bi se postigla tražena provodljivost vode, potrebna količina vode za ispiranje kod zaprljane smole je nekoliko desetina puta veća od potrebe kod nove smole.



Slika 2.



Slika 3.

Skidanje organskih materija efikasno je povremenim potapanjem smole u alkalni rastvor soli 2 % NaOH + 10 % NaCl zagrejan 45 do 60 °C.

Nakon ovih postupaka potapanja i ispiranja, smole se regenerišu dvostrukim količinama regeneransa.

Zaprljanja smola uljima je takođe čest slučaj. Tipičan je primer kod obrade (poliranja) pogonskih kondenzata. Ulje može dospeti na smolu i sa vazduhom kojeg koristimo za mešanje posle regeneracije mešanih slojeva.

Da se izbegne ovo zaprljanje, sirovi kondenzati se filtriraju kroz aktivni ugalj, a uređaji za snabdevanje vazduhom uredno se održavaju. Ovaj problem se uočava padom kvaliteta obrađene vode (visok probij natrijuma) i izrazitim problemom separacije mešanog sloja smola.

Za skidanje ulja sa smola mogu se upotrebiti površinski aktivna sredstva (nisko-peneća i nejonska). Ulja se inače teško skidaju i u slučaju nekoliko uzastopnih zaprljanja smole najbolje je istu zameniti.

Bio-zaprljanja smola potiču razvojem bakterijskog depozita u cevovodima, na sudovima i na površinama zrnaca smole. Simptomi ovog zaprljanja su visok pad pritiska kroz slojeve smole, lom zrnaca smole i simptomi pomenuti kod pojave organskih zaprljanja.

Ova zaprljanja se skidaju vazduhom i povratnim pranjem, te tretmanom smole sa algicidima i baktericidima, kao što su persirćetna kiselina i natrijumhipohlorit.

## 5. ČUVANJE SMOLA U UREĐAJIMA ZA VREME DUŽEG STAJANJA

Pojava bio - rasta (zaprljanja) na površini zrnaca smole i na sudovima, nastaje najčešće tokom dužeg zastoja uređaja za obradu vode, kondenzata ili drugih medija. Prethodno, izvesno zaprljanje smola, zapunjenost uređaja lošom vodom i veće temperatu-

re pogoduju procesu bio - rasta, odnosno bio - zaprljanja.

Najjednostavniji i efikasan način zaštite smola od pojave procesa bio - rasta je *potapanje u 10 % rastvor NaCl*. Ukoliko temperatura okoline padne ispod  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 10 % rastvor *NaCl* treba zameniti mešavinom vode i etilenglikola, kako bi se, pre svega, zaštitilo postrojenje.

Ponovno aktiviranja smola namenjenih za demineralizaciju vode i prečišćavanju kondenzata obavlja se ispiranjem i dvostrukom regeneracijom. Ovo se ne odnosi na smole za omekšavanje vode, njih je potrebno samo isprati.

*Rezervne zalihe smola* čuvaju se u zatvorenim skladištima (u originalnoj ambalaži), gde je temperiran ambijent.

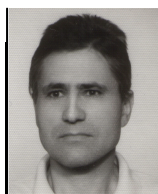
## 6. ZAKLJUČCI

*Jonoizmenjivačke smole su neophodan materijal koji se koristi kao ispuna u uređajima za demineralizaciju vode i prečišćavanje kondenzata. Kapacitet smola je ograničen i tesno vezan za kvalitet ulaznih voda i kondenzata. Zbog toga je poželjno obezbediti kontinualno dobru prethodnu obradu vode i kondenzata. Tako će raspoloživi kapacitet smola trajati u dužem vremenskom periodu. Ovome doprinosi blagovremeno hemijsko čišćenje smola i adekvatan tretman kod kraćih i dužih prekida rada postrojenja.*

## 7. LITERATURA

- [1] Informacije Puro-lite company i Rohm and Haas company

Rad je primljen u uredništvo 23. 02. 2004. godine



**Radoslav S. Maksimović** je rođen 1939. godine u Smolućoj kod Tuzle. Diplomirao na Tehnološkom fakultetu u Tuzli. Prva praktična iskustva kao srednjoškolac i inženjer stekao je, radeći preko 15 godina, u TE „Tuzla” (BiH). Kratko vreme je proveo na pripremi proizvodnje u TE „Ugljevik”, energetsom objektu u izgradnji.

U novoj TE-TO u Zrenjaninu od početka izgradnje je radio na mestu vodećeg inženjera za poslove hemije, a potom u eksploataciji na mestu rukovodioca pogona Hemijska priprema vode i poslova hemijsko tehnološke struke. U međuvremenu je objavio preko 20 stručnih saopštenja iz ove oblasti. Preveo je sa engleskog i štampao, uz podršku Zajednice jugoslavenske elektroprivrede, knjigu JONSKA IZMENA, principi i primena. Posebno interesovanje mu je šira oblast primene jonoizmenjivačkih smola.

# Osnovi analize elektroenergetskih mreža i sistema

**Autori: Milan S. Čalović i Andrija T. Sarić**

---

*Monografija je nastala kao rezultat višegodišnjeg pedagoškog, naučnoistraživačkog i univerzitetskog iskustva autora, obimnih naučnih istraživanja i rešavanja praktičnih problema iz oblasti elektroenergetskih sistema. Ona na sistematičan način tretira značajnu oblast analize elektroenergetskih mreža i sistema, koja se po pravilu izučava na svim elektrotehničkim fakultetima kod nas i u svetu. U njoj su na jednom mestu objedinjeni postupci analize i rešavanja najvažnijih statičkih i dinamičkih problema, što značajno obogaćuje literaturu iz elektroenergetike, bez sumnje.*

*Analiza elektroenergetskih mreža i sistema predstavlja osnov za mnoge elektroenergetske discipline, kao što su planiranje, projektovanje i eksploatacija elektroenergetskih sistema, proizvodnja, prenos, distribucija i korišćenje električne energije i mnoge druge. Analiza tretirana u ovoj knjizi bavi se trofaznim sistemima naizmeničnog napona, a zasniva se na fizičkoj interpretaciji pojava preko matematičkih modela, korišćenjem kompleksne algebre i diferencijalnih jednačina.*

*Matematičko modelovanje i rešavanje pomoću digitalnih računara danas je jedini praktični pristup analizi složenih elektroenergetskih sistema. Dostignuta je faza u kojoj se i studenti tokom svog univerzitetskog obrazovanja moraju obučavati da koriste savremenu tehniku i praksu analize velikih elektroenergetskih sistema. Slična potreba takođe je aktuelna i kod inženjera-praktičara. Međutim, mnogi od njih u svom obrazovanju nisu imali prilike da se upoznaju i primene računarski orijentisane metode analize, kao i da koriste gotove programske pakete za rešavanje pojedinih praktičnih problema. Kombinujući osnovne*

*principe analize, ilustrovane savremenim tehnikama za rešavanje problema, koji se nameću u svakodnevnoj praksi, ovom se knjigom popunjavaju te praznine.*

*Monografija, napisana na oko 780 strana, podeljena je u devet glava.*

*Prva („Modeli elemenata elektroenergetskih mreža i sistema”) i druga glava („Topološki model, graf modela i osnovne jednačine mreža”) predstavljaju uvod u materiju koja se obrađuje. U prvoj glavi opisani su modeli i definisani parametri osnovnih komponenata elektroenergetskih sistema (vodovi, transformatori, generatori, potrošači itd.), a u drugoj je dat pregled bazičnih topoloških modela, teorema, zakona i proračuna, koji se koriste pri proučavanju elektroenergetskih mreža i sistema.*

*Od treće do osme glave, proučavaju se pojedine uže oblasti analize elektroenergetskih sistema. Treća glava („Proračun tokova snaga i naponskih stanja”) tretira jedan od verovatno najviše proučavanih i dokumentovanih problema u analizi elektroenergetskih sistema. U suštini, on predstavlja proračun fazora napona u čvorovima elektroenergetske mreže u stacionarnom stanju sa sinusoidnom pobudom, pri čemu su konfiguracija i parametri mreže poznati, a terminalni (granični) uslovi unapred zadati. Taj proračun omogućava analizu tokova aktivnih i reaktivnih snaga po granama mreže, kao i napona u čvorovima i gubitaka aktivne i reaktivne snage. Obradena su dva osnovna problema u razvoju algoritama i računarskih programa: matematička formulacija i rešavanje problema. Matematička formulacija problema polazi od jednačina bilansa kompleksnih*



snaga u čvorovima mreže u stacionarnom stanju. Ona rezultuje sistemom nelinearnih, algebarskih, simultanih, realnih jednačina, za koje ne postoji opšte rešenje. Zato je jedino moguće istraživati numeričko rešenje problema, koje se obično svodi na iterativne postupke za rešavanje sistema nelinearnih algebarskih jednačina. Izloženo je više algoritama rešenja, koji se koriste u savremenoj praksi: Gaussov, Gaus-Seidelov, Newtonov, osnovni i raspregnuti Newton-Raphsonov, Brzi-raspregnuti (Stottov) i „jednosmerni” (DC) algoritam.

U četvrtoj glavi („Nesimetrična stanja u trofaznim mrežama”) objašnjene su dve osnovne grupe nesimetričnih stanja, koje su posledica kvarova – kratkih spojeva i prekida provodnika. Proučavanje ponašanja elektroenergetskih sistema izloženih tim kvarovima važno je sa gledišta planiranja i projektovanja objekata, kao i eksploatacije elektroenergetskih sistema. U prvom slučaju, radi izbora parametara opreme planiranih objekata (prvenstveno parametara prekidača), a u drugom, pored izbora parametara opreme, radi provere šeme, uzemljenja i zaštite elektroenergetskih postrojenja. Konačno, u domenu eksploatacije, na osnovu podataka o karakterističnim veličinama pri pojedinim kvarovima, biraju se tip i podešavanje elemenata relejne zaštite i vrši provera adekvatnosti donetih odluka u fazama planiranja i projektovanja elektroenergetskih sistema. Izložena materija posvećena je proučavanju prelaznih stanja, posle nastanka kratkog spoja ili prekida provodnika. Na opštem slučaju izgleda krive struje simetričnog kratkog spoja, definisane su njene dve osnovne komponente: aperiodična (jednosmerna) i naizmjenična komponenta. Dati su analitički izrazi za proračun tih komponenta i definicije parametara i karakterističnih veličina, shodno važećim preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC). Konstatovana je bitna važnost naizmjenične komponente, pa je u posebnoj glavi obrađen postupak proračuna te komponente i primena rezultata (uz korišćenje metoda simetričnih komponenta), pri proučavanju nesimetričnih stanja za slučaj kratkih spojeva. Slično je postupljeno i pri proučavanju nesimetričnih stanja pri prekidu provodnika. Takođe je izvršeno međusobno poređenje karakterističnih pokazatelja kratkog spoja, prema standardima IEC 909 i ANSI 141, Američke nacionalne institucije za standarde.

U petoj glavi („Stabilnost elektroenergetskih sistema”) analizirani su problemi (ne)stabilnosti elektroenergetskih sistema, prvenstveno iz ugla sposobnosti sinhronih mašina da zadrže sinhronizam pri pojavi različitih poremećaja: 1) malih (kontinualne promene opterećenja) i 2) velikih (ispadi iz pogona generatora, potrošača, vodova i transformatora, usled različitih uzroka, kao što su atmosferska pražnjenja, kratki spojevi itd). Pošto odziv sistema na velike poremećaje uključuje veliki broj aparata i uređaja ugrađenih u sistem (proizvodni agregati sa svojim sistemima za regulaciju brzine i pobude, elementi prenosne mreže, uređaji relejne zaštite i automatike itd.), rešavanje problema stabilnosti u tim uslovima predstavlja vrlo složen zadatak. Detaljno su obrađene dve osnovne kategorije stabilnosti: statička i tranzijentna. Statička stabilnost se odnosi na sposobnost elektroenergetskog sistema da očuva sinhronizam pri malim i sporim poremećajima (kao što su postepene promene opterećenja). Pri tome je kao posebna kategorija stabilnosti pri malim poremećajima razmatrana dinamička stabilnost. Analizirana je i tranzijentna stabilnost, koja se bavi proučavanjem efekata velikih i iznenadnih poremećaja, kao što su promene opterećenja, konfiguracije mreže i razni tipovi kvarova, čija je krajnja posledica ispad iz pogona pojedinih važnih uređaja (generatori, vodovi, transformatori, potrošači), ili čak prestanak snabdevanja električnom energijom delova elektroenergetskog sistema. Studije tranzijentne stabilnosti neophodne su da bi se utvrdilo da li sistem može da izdrži tranzijentne uslove posle nastanka specifikovanih velikih poremećaja. Ovakve analize vrše se kako u periodu planiranja proizvodnih i prenosnih kapaciteta, tako i posle završene izgradnje, u eksploataciji elektroenergetskih sistema. One su važne, jer daju podatke za izbor tipa i podešavanja zaštitnih releja, kritičnog vremena isključenja prekidača i systemske automatike, kao i za izbor naponskih nivoa vodova i prenosnih kapaciteta međusobnih spojnih veza. Razmatrani su problemi ugaone stabilnosti (sposobnost sinhronih mašina da održavaju sinhronizam analizirana je na osnovu promene uglova rotora) i naponsko-reaktivne stabilnosti (sposobnost elektroenergetskog sistema da održava prihvatljive vrednosti napona u svim čvorovima).

U šestoj glavi („Strujna opteretivost prenosnih vodova”) analizirane su prenosne sposobnosti vodova, sa stanovišta dozvoljenog zagrevanja

provodnika, dozvoljenih padova napona i granica statičke stabilnosti. Svaki od ta tri faktora određuje jedno granično strujno opterećenje. Dozvoljeno zagrevanje provodnika određuje termičku granicu opterećenja voda. Dozvoljeni pad napona definiše najveću struju koju vod može podnositi, a da ne ugrozi naponske prilike u sistemu, a preko njih i naponsku stabilnost. Granica statičke stabilnosti je ograničavajući faktor vodova najviših napona u prenosnim mrežama. Ona je funkcija razlike uglova napona na predajnom i prijemnom kraju voda. Analizirana je zavisnost opteretivosti voda s obzirom na različite definisane kriterijume.

Sedma glava („Pokretanje velikih motora”) tretira probleme stavljanja u pogon velikih asinhronih motora (pogotovo ako se to sprovodi njihovim direktnim uključanjem na mrežu). Samo priključenje može izazvati ozbiljne poremećaje na samom motoru i drugim bliskim lokalnim potrošačima, pa čak i čvorovima mreže električki udaljenim od mesta priključenja motora. U principu, studija pokretanja motora sprovodi se uvek kada je njegova nazivna snaga veća od 30 % snage napojnog transformatora, ukoliko pri tome nema generatorskih kapaciteta vezanih na zajedničke sabirnice. Iste studije ponekad je potrebno sprovesti i kada su u pitanju manji motori, zavisno od uslova priključenja. Obradena je pojava naponskih propada (kao najuočnijeg efekta pri pokretanju velikih motora), posmatrana sa stanovišta samih motora, ali i napojne mreže na koju su motori priključeni.

Osma glava („Viši harmonici”) obrađuje tretman viših harmonika (sinusoidne komponente periodičnih naponskih i/ili strujnih talasa, čija je učestanost jednaka celobrojnom umnošku osnovne učestanosti sistema) u elektroenergetskom sistemu. Oni se pojavljuju kao posledica nelinearnih impedansi i elektronskih prekidačkih elemenata u sistemu (koji su sve češći u savremenim mrežama), koji kada se priključe na mrežu osnovne učestanosti, prouzrokuju izobličenje strujnih talasa. Obradeni su primeri elemenata koji generišu harmonike: statički energetski konvertori (ispravljači, invertori i drugi beskontaktni prekidački uređaji), statički uređaji za sigurnosno napajanje, fluorescentne lampe, tiristorski kontrolisani uređaji (osim tiristorski kontrolisanih kondenzatora) i svi drugi elementi sa nelinearnom naponsko-strujnom karakteristikom. Pojava harmonika u elektroenergetskom sistemu može prouzrokovati niz neželjenih efekata, pa je neophodno u svim

sumnjivim situacijama sprovesti harmonijsku analizu. Glavni cilj je da se utvrdi efekat harmonika na elektroenergetski sistem, a ne poreklo (izvori) viših harmonika. Ovi efekti manifestuju se u povećanim aktivnim gubicima, pojavama rezonansi, uticaju na telekomunikacione vodove itd. Kada neželjeni efekti viših harmonika prevaziđu granicu tolerancije, potrebno je preduzeti mere za njihovo otklanjanje ili filterovanje. Svi ti problemi objašnjeni su detaljno u ovoj glavi.

Pored ovih osam (osnovnih) glava, u sedam priloga uneti su neki značajni materijali, koji ilustruju osnovni tekst knjige. Ovi prilozi mogu biti od velike praktične koristi svim inženjerima koji se praktično bave proučavanjem pojava u elektroenergetskim sistemima.

Uz svaku glavu dato je više reprezentativnih i korisnih „ilustrativnih primera” (ukupno 92), kroz čije rešavanje je pokazan način primene prikazanih metoda i modela u praktičnim proračunima realnih problema analize elektroenergetskih sistema. Time se čitaocima daje dovoljan broj rešenih edukativnih problema, koji će im pomoći da samostalno rešavaju slične praktične probleme u svojim profesionalnim aktivnostima. Svakako da je ovo jedan od posebnih kvaliteta knjige.

Iz napred izloženog, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- 1. Tekst obuhvata sve značajne probleme analize elektroenergetskih sistema – proizvodno – prenosnih i distributivnih mreža.**
- 2. Kada su u pitanju proizvodno-prenosne mreže, obrađeni su statika i dinamika.**
- 3. Tekst je primeren svim inženjerima koji se bave rešavanjem problema iz elektroenergetike.**
- 4. Tekst je takođe primeren studentima elektrotehnike (elektroenergetike), pa se može koristiti na našim univerzitetima kao udžbenik iz više predmeta elektroenergetike, a posebno iz predmeta koji se neposredno odnose na analizu proizvodno-prenosnih i distributivnih mreža.**
- 5. Urađeni „ilustrativni primeri” daju posebnu težinu napisanom tekstu.**

Na kraju, ovu vrednu knjigu, koja je bez sumnje obogatila stručnu literaturu iz elektroenergetike na srpskom jeziku, toplo preporučujem svim stručnjacima koji se bave problemima elektroenergetskih sistema.

Prof. dr Vladimir Strezoski  
Fakultet tehničkih nauka Novi Sad

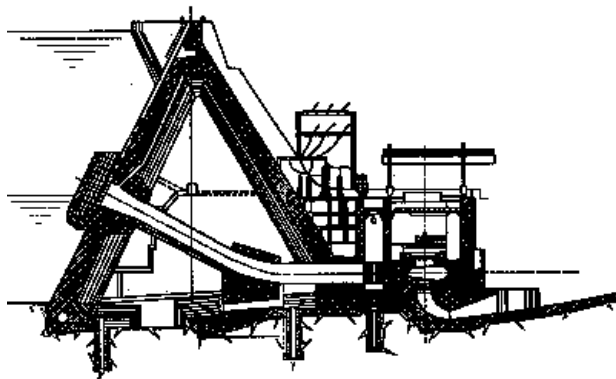
# Hidroenergetsko korišćenje voda

Autora prof. dr Branislava Đorđevića

Izdavač Građevinski fakultet, Beograd, 2001, ISBN 86-5718-017-9  
Obim: 542 strane, 346 ilustracije, 51 bibliografska jedinica

Profesor dr Branislav Đorđević, jedan od najpoznatijih jugoslovenskih stručnjaka u oblasti hidroenergetike, objavio je izuzetnu monografiju pod nazivom „Hidroenergetsko korišćenje voda”. Oblast hidroenergetike relativno je slabo obrađena u domaćoj stručnoj literaturi, pa je izlazak jedne ovakve knjige, u stručnim krugovima, sa nestrpljenjem očekivan. Ova knjiga predstavlja prvi deo dvotomne monografije o hidroenergetskom korišćenju voda. U njoj su date osnove hidroenergetike (hidroenergetski potencijali i njihovo mesto u okviru kompleksne energetike, fizičke osnove iskorišćenja vodnih snaga, tipovi hidroelektrana, njihove dispozicione, ekonomske i energetske karakteristike, turbine, generatori i metode izbora tipa i parametara agregata). U drugoj knjizi, pod naslovom „Objekti hidroelektrana”, razmatraju se svi elementi hidroenergetskih postrojenja, od vodozahvata i zatvaračnica, preko objekata derivacije (pod pritiskom i sa slobodnim tečenjem), do mašinskih zgrada raznih tipova, uključujući i reverzibilne hidroelektrane.

Knjiga je podeljena u dvanaest poglavlja. U prvom poglavlju autor veoma jasno predočava sve brže zaoštavanje problema vode, energije i životne sredine, koji postaju



najkrupniji globalni problem planete. Sistematizuju se bazne energetske kategorije, kao i energetske potencijali sveta i Jugoslavije. U drugom delu daju se fizičke osnove iskorišćenja vodnih snaga: energija vodenog toka, energija tečnosti u hidrauličkim mašinama, kao i gubici u energetskej transformaciji.

Posebna pažnja posvećena je različitim tipovima hidroelektrana, što je veoma detaljno obrađeno u okviru trećeg poglavlja. Tipovi hidroelektrana sistematizovani su prema načinu koncentracije pada i prema položaju konstrukcije mašinske zgrade. Veoma podrobna i jasna objašnjenja upotpunjena su velikim brojem crteža (preko 70 skica poprečnih i podužnih preseka i dispozicija raznih sistema), tako da čitalac stiče potpuno

jasnu predstavu, ne samo o pojedinim tipovima hidroelektrana, nego i njihovim prednostima i manama u zavisnosti od dispozicije sistema i uslova na terenu.

U četvrtom poglavlju razmatraju se metodološki aspekti određivanja hidroenergetskog potencijala. U ovom delu knjige se, pored hidroenergije, prvi put u našoj literaturi, na tehnički egzaktan način razmatraju i drugi obnovljivi vidovi energije (energija mora, sunca, vetra, geotermalna energija i energija korišćenja biomase) i upoređuju se njihovi energetski efekti. Sledeća tri poglavlja posvećena su elektroenergetskim i ekonomskim karakteristikama hidroelektrana, kao i karakteristikama elektroenergetskog sistema. Detaljno su prikazane različite vrste dijagrama opterećenja (dnevni, nedeljni, mesečni, godišnji), mogućnosti popravljanja njihovih karakteristika, kao i načini pokrivanja ovih dijagrama u mešovitom elektroenergetskom sistemu. Prikazani su i principi regulacije i načini obezbeđivanja rezervne snage u sistemu. Posebna pažnja posvećena je ekonomskim karakteristikama elektrana: struktura troškova, analiza godišnjih troškova, kao i metodama i parametrima za ekonomsku analizu projekata.

Osmo poglavlje bavi se veoma aktuelnim problemom vrednovanja i optimalnog dimenzionisanja hidroelektrana u zavisnosti od prilika u elektroenergetskom sistemu i tipa hidroelektrane (protočna ili akumulaciona). Akumulacione hidroelektrane razmatrane su detaljnije u okviru devetog poglavlja. U tom delu, obrađuju se karakteristike akumulacionih bazena (geometrijske karakteristike, radne karakteristike i gubici), definišu se zadaci regulisanja rečnih protoka i opisuju se metode kojima se ti zadaci rešavaju.

U poslednja tri poglavlja knjige razmatraju se sklopovi hidroagregata, sa svim

pratećim elementima. Pojednini tipovi turbina, sa domenima upotrebe, osnovnim i pratećim (dovodnim i odvodnim) elementima sistematizovani su u desetom poglavlju. U okviru tog dela, prikazani su radni procesi u akcijskim i reakcijskim turbinama i data je njihova matematička formalizacija. Veliki broj slika i crteža (njih stotinjak) čitaocu potpuno jasno dočaravaju različite tipove turbina, tok vode u njima, način njihovog rada, kao i probleme koji se javljaju. Razmatrana je i veoma značajna problematika uticaja kavitacije, ponašanje turbina u promenljivim pogonskim uslovima, kao i regulacija rada turbina. U narednom delu detaljno su razmatrani hidrogeneratori (opisani su različiti tipovi, u zavisnosti od načina prenošenja opterećenja i sistema hlađenja) i sklopovi hidroagregata. Poslednje dvanaesto poglavlje bavi problematikom izbora tipa, parametara i broja agregata. Prikazani su domeni upotrebe pojedinih tipova turbina sa velikim brojem različitih dijagrama, nomograma i tabela, koji omogućavaju izbor najpovoljnijeg tipa turbine i njenih osnovnih parametara, kao i definisanje spirale, difuzora, generatora i ostalih pratećih sadržaja.

Knjiga je pisana veoma pregledno i sistematično sa velikim brojem skica i crteža, kao i aktuelnih tabela koje se koriste za izbor pojedinih tipova i parametara hidroagregata. Zbog toga je knjiga profesora Đorđevića namenjena širokom krugu čitalaca, od studenata do iskusnih inženjera i jedna je od onih knjiga koja bi se morala naći na stolu svakog stručnjaka koji se bavi problemom hidroenergetike.

**Knjiga se može nabaviti na Građevinskom fakultetu u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73 (kabinet 152), tel. 3218-559.**

Prof. dr Miroslav Benišek  
Doc. dr Tina Dašić