



# Elektroprivreda

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

Godina Year	LVI	April-Jun April-June	Broj No.	2
----------------	-----	-------------------------	-------------	---

Sadržaj	Strana Page	Content
<i>Aleksandar P. Bojković</i>		
IZBOR METODE KONTROLE PARCIJALNIH PRAŽNENJA KOD STATORSKE IZOLACIJE OBRJNIH MAŠINA	3	THE CHOICE OF METHOD FOR PARTIAL DISCHARGE TESTING OF STATOR INSULATION IN ROTATING MACHINERY
<i>Snežana Mijailović, Zoran Vujasinović i Mladen Apostolović</i>		
PRIMENA METODA ZA UPRAVLJANJE ZAGUŠENJIMA U PRENOSNOJ MREŽI U JUGOISTOČNOJ EVROPI	9	APPLICATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS IN TRANSMISSION NETWORK IN SOUTH-EAST EUROPE
<i>Dragan S. Popović, Jugoslav K. Dujčić i Selimir S. Kurešević</i>		
KOMBINOVANI ALGORITAM ZA OPTIMALNU REKONFIGURACIJU DISTRIBUTIVNIH MREŽA	26	COMBINED ALGORITHM FOR OPTIMAL RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION NETWORKS
<i>Ljubivoje Popović</i>		
ANALITIČKA METODA ZA ODREĐIVANJE KRITIČNIH ZEMLJOSPOJEVA NA NADZEMNIM VODOVIMA VISOKIH NAPONA	39	ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINATION OF CRITICAL GROUND FAULTS ON THE OVERHEAD LINES OF HIGH VOLTAGES
<i>Milenko B. Đurić</i>		
MODIFIKOVANI FURJEVOV ALGORITAM ZA MERENJE OSNOVNOG HARMONIKA SIGNALA	51	MODIFIED FOURIER ALGORITHM FOR THE FIRST HARMONIC MEASUREMENT OF THE PERIODIC SIGNALS
<i>Žarko Markov</i>		
PROCENA UTICAJA SMETNJI NA KVALITET TELEFONSKIH VEZA U PAKETSKOJ MREŽI ELEKTROPRIVREDE SRBIJE	57	ESTIMATION OF TELEPHONE SPEECH SIGNAL IMPAIRMENT DUE TO DISTURBANCES OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY OF SERBIA INFORMATION PROTOCOL IN NETWORK
<i>Risto S. Janevski</i>		
METODE ZA ODREĐIVANJE CENE MAZUTA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE U TERMOCENTRALAMA TEČNIH GORIVA	62	METHODS FOR DETERMINATION OF THE PRICE OF THE FUEL OIL FOR ELECTRIC POWER PRODUCTION IN THERMAL POWER PLANTS ON LIQUID FUEL
<i>Miodrag Arsić, Stojan Sedmak i Vujadin Aleksić</i>		
OCENA INTEGRITETA I PRODUŽENJE RADNOG VEKA ROTORNIH BAGERA	75	INTEGRITY ASSESSMENT AND PROLONGATION OF ROTOR DREDGERS WORKING LIFE
<i>II deo</i>		<i>Part II</i>
<i>Đuro Radinović</i>		
DOSTIGNUĆA U DUGOROČNOJ PROGNOZI VREMENA I NJIHOVA PRIMENA U ELEKTROPRIVREDI	89	ACHIEVEMENTS IN LONG-TERM WEATHER FORECASTING AND THEIR APPLICATION IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

**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, Beograd;

Radomir Naumov, dipl. ing., član, Ministar za rudarstvo i energetiku u Vladi Republike Srbije, 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, 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, pomoćnik ministra za rudarstvo i energetiku u Vladi Republike Srbije, Beograd;

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

Mladen Šerventi, dipl. ek., 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

---

Aleksandar P. Bojković

# Izbor metode kontrole parcijalnih pražnjenja kod statorske izolacije obrtnih mašina

Stručni rad  
UDK: 621.313.1

---

Rezime:

*U novije vreme se u našoj elektroprivredi pojavila, potpuno nepotrebno, dilema oko načina kontrole parcijalnih pražnjenja kod statorske izolacije generatora i visokonaponskih motora. Pored klasičnih metoda ispitivanja na mašinama van pogona (off-line), sve šire se primenjuju ispitivanja na mašinama u pogonu (on-line), što je samo po sebi dobro, ali ne i kada se negira potreba za daljim ispitivanjima na mašinama van pogona. U radu su prikazane mogućnosti i ograničenja obe metode, odnosno njihove prednosti i mane. Ukazano je da postoje situacije kada ispitivanje on-line postupkom nije moguće ili bi moglo imati štetne posledice. Objektivno sagledavanje iznetih činjenica u radu dovodi do zaključka da dve metode ispitivanja ne isključuju jedna drugu, već naprotiv, da su komplementarne, tj. da se najbolji uvid u stanje izolacionog sistema postiže kada se primenjuju obe metode.*

**Ključne reči:** *obrtne mašine, statorski namotaj, izolacioni sistem, parcijalna pražnjenja, off-line merenje, on-line merenje*

---

Abstract:

## THE CHOICE OF METHOD FOR PARTIAL DISCHARGE TESTING OF STATOR INSULATION IN ROTATING MACHINERY

*Recently, quite unnecessarily, a dilemma arose in the electric power industry about the way of the partial discharge testing on stator insulation systems of generators and high voltage motors. In addition to conventional methods of testing during standstill (off-line), there is a continuous expansion of testing during operation (on-line), which is good, but does not justify opinions that off-line measurements are not necessary any longer. The paper presents the scope and limitations of two methods, i.e. their advantages and shortcomings. It is explained that on-line measurement is not possible or could have detrimental consequences in some circumstances. Objective judgment of the facts leads to a conclusion that two methods do not exclude each other, but on the contrary, that they are complementary, which means that the best insight into the condition of the insulation system is available when both methods are applied.*

**Key words:** *rotating machinery, stator winding, insulation system, partial discharge, off-line measurement, on-line measurement.*

---

Aleksandar P. Bojković, dipl. ing. – Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a

## 1. UVOD

Širom sveta je veoma izražena tendencija posvećivanja sve veće pažnje pravilnom održavanju elektroenergetske opreme, sa trojakim ciljem:

- sprečavanja havarija i povećanja pouzdanosti snabdevanja električnom energijom,
- produženja i optimalnog iskorišćenja potencijalnog radnog veka opreme, i
- sniženja troškova održavanja opreme, a time i ukupnih troškova eksploatacije.

Sve to u praksi daje opipljive finansijske efekte, što je imperativ u uslovima deregulacije i stvaranja tržišta električne energije, na kojem konkurencija može zatvoriti čak i dobro očuvane proizvodne kapacitete.

Pored generatora, u proizvodnim kapacitetima (pre svega u TE i NE), ali i kod velikih industrijskih potrošača, nalazi se veliki broj visokonaponskih motora, čiji pouzdan rad je veoma značajan.

- Kod navedenih obrtnih mašina jedan od vitalnih elemenata je izolacioni sistem statorskog namotaja. Parcijalna pražnjenja, koja nastaju u njemu usled nesavršenosti materijala, tehnologije ili konstrukcije (kvalitet izrade) i usled procesa koji su izazvani električnim, toplotnim, mehaničkom i hemijskim naprezanjima (starenje) često u presudnoj meri određuju:
- da li elementi (štapovi) i kompletan statorski namotaj novih mašina zadovoljavaju uslove kvaliteta i mogu biti prihvaćeni od strane kupca,
  - da li je mašina sposobna za pouzdan rad,
  - potrebu, redosled i obim remontnih radova, u skladu sa efikasnijom i ekonomičnijom koncepcijom održavanja po stanju,
  - tempo kojim se odvija starenje izolacionog sistema, dajući doprinos određivanju preostalog radnog veka, a time i opredeljenju za revitalizaciju i njen obim.

Naravno, poznato je da postoji i čitav niz drugih ispitivanja koja čine program preventivne kontrole obrtnih mašina, ali se slobodno može reći da bi on bez kontrole parcijalnih pražnjenja bio manjkav, odnosno mnogo manje efikasan.

## 2. OSNOVNE PODELE METODA ISPITIVANJA PARCIJALNIH PRAŽNENJA

Postoje različite mogućnosti klasifikacije metoda za detekciju i merenje parcijalnih pražnjenja, kao npr. na:

- električne metode (zasnovane na visokofrekventnim impulsima koji se prostiru kroz namotaje od mesta pražnjenja ili na elektromagnetnim talasima koji se prostiru kroz okolnu sredinu),
- neelektrične metode (zasnovane na detekciji ozona, akustičkih pojava u oblasti ultrazvuka i čujnog

šuma, vizulnih efekata - svetlost ili pojava belog praha).

Kod prve grupe električnih merenja intenziteta parcijalnih pražnjenja, kod koje postoji neposredna galvanska veza mernog uređaja sa objektom koji se ispituje, postoje dve osnovne merne šeme. Kod jedne je merna impedansa uključena redno sa objektom koji se ispituje (između njega i uzemljenja). Ovu šemu nije moguće primeniti kod obrtnih mašina. Kod njih se primenjuje priključenje merne impedanse, paralelno sa objektom koji se ispituje, preko visokonaponskog spreznog kondenzatora.

Dalje, električna merenja se mogu podeliti na još dve podgrupe, u zavisnosti od karakteristika mernog uređaja, tj. da li uređaj koristi uskopojasne filtre i pojačavače ili širokopojasne. Prednost širokopojasnih uređaja je da vernije odražavaju pojavu koju prate, ali su mnogo podložniji uticaju smetnji, koje se kod uskopojasnih uređaja mogu mnogo lakše eliminisati pravilnim izborom centralne frekvencije. S druge strane, izbor uzanog mernog opsega, reda nekoliko kHz, iz čitavog spektra signala, od nekoliko kHz do par stotina MHz, može ponekad dovesti u pitanje validnost merenja.

Vraćajući se na opštu klasifikaciju metoda ispitivanja parcijalnih pražnjenja, napominjemo da je moguća i sledeća podela:

- na metode koje registruju globalno intenzitet parcijalnih pražnjenja, i
- na metode koje omogućavaju lociranje mesta pražnjenja (pomoću ultrazvuka, sonde za hvatanje elektromagnetnih signala itd.).

Međutim, u ovom radu se tretira treći vid podele, zasnovan na stanju mašine koja se ispituje, odnosno podele na:

- merenja na mašini van pogona (off-line), i
- merenja na mašini u pogonu (on-line).

U oba slučaja tretiraju se električna merenja parcijalnih pražnjenja, s tim što su off-line merenja povremena, odnosno periodična, pošto su vezana za zastoj mašine (tako da se najčešće obavljaju prilikom remonta), dok se on-line merenja mogu izvoditi znatno češće, pa i kontinualno. No, najbitnija razlika je u tome što se off-line merenja izvode pomoću dovedenog napona iz stranog izvora, pri čemu je čitav namotaj podvrgnut punom ispitnom naponu, dok se on-line merenja izvode pri radnom naponu, čija veličina duž namotaja ravnomerno opada ka zvezdištu.

## 3. OFF - LINE MERENJA PARCIJALNIH PRAŽNENJA

U nizu slučajeva, off-line merenja su jedino moguća:

- pri ispitivanju štapova statorskog namotaja u okviru kontrole kvaliteta njihove izrade,

- pri prijemnim ispitivanjima kompletnih statorskih namotaja kod proizvođača (uglavnom kod turbogeneratorskih i visokonaponskih motora),
- pri ispitivanjima po završetku montaže, a pre puštanja generatora u pogon,
- pri ispitivanjima u toku opravke ili revitalizacije generatora, kako štapa za ulaganje, tako i kompletnog namotaja,
- pri ispitivanjima posle havarija ili drugih vanrednih događaja (npr. pogrešna sinhronizacija) radi utvrđivanja stanja generatora, odnosno da li sme da bude pušten u rad.

Svi napred navedeni slučajevi su značajni s tačke gledišta korisnika obrtnih mašina i nijedan korisnik se ne bi odrekao navedenih ispitivanja, čiji integralni deo predstavlja merenje parcijalnih pražnjenja. Stavljajući u pogon nove mašine ili mašine koja je pretrpela abnormalna naprezanja bez detaljnih ispitivanja moglo bi dovesti do havarije i težih oštećenja.

Što se tiče preventivne kontrole obrtnih mašina u eksploataciji, off-line metoda se izvodi u uslovima manjeg prisustva smetnji od okolnih postrojenja, ali i u uslovima koji se bitno razlikuju od pogonskih

(raspodela električnog napreznja izolacionog sistema duž namotaja, temperatura, opterećenje). Ispitivanja se obično vrše na mašinama koje su na ambijentnoj temperaturi, a kod velikih turbogeneratorskih i bez vodonika pod pritiskom, tj. u prisustvu vazduha pod normalnim atmosferskim pritiskom. Neki od uslova ispitivanja pri off-line merenjima uvećavaju intenzitet parcijalnih pražnjenja (npr. jednoliko električno naprezanje izolacionog sistema ili odsustvo vodonika pod pritiskom), a drugi ga umanjuju (npr. hladna mašina), ali je dominantan uticaj onih faktora koji uvećavaju intenzitet izmerenih pražnjenja. Ovo dokazuje eksperiment koji je izveden 2001. godine na 4 mala hidrogeneratorska, od kojih su 2 snage 3,2 MVA, a 2 snage 5,6 MVA [1]. Rezultati eksperimenata su prikazani u tabeli 1.

*Istim mernim uređajima*, od kojih jedan meri prividno naelektrisanje  $Q$  (pC), a drugi kvadratnu veličinu  $D$  ( $C^2/s$ ), pri čemu oba zadovoljavaju uslove koje propisuje standard za merenje parcijalnih pražnjenja [2], izvedene su dve serije merenja:

- klasično off-line merenje pri karakterističnim vrednostima ispitnog napona  $0,6 U_n$  (3,6 kV) i  $1,0 U_n$  (6 kV),

Tabela 1.

Uporedni prikaz rezultata merenja faktora dielektričnih gubitaka, kapacitivnosti i parcijalnih pražnjenja na četiri generatora

Generator	Faza	$\Delta tg \mathbf{d}_{max}/0,2 U_n$ (%)		$\Delta C/C$ (%) 0,2/1,0	Parcijalna pražnjenja				
		0,2/0,6	0,6/1,0		off-line				on-line $Q$ (p.C.) pri oko 4,2 kV
					$A$ (dB)		$Q$ (pC)		
					0,6	1,0	0,6	1,0	
1.	U	0,35	12,70	1,79	26,0	71,9	14 000	80 000	1 200
	V	0,41	12,40	1,59	12,0	60,9	2 500	75 000	2 000
	W	0,40	13,10	1,77	7,0	61,4	1 100	80 000	2 000
2.	U	0,30	10,54	5,43	35,8	69,7	1 800	30 000	1 500
	V	0,36	11,30	6,17	34,8	68,2	2 800	40 000	1 750
	W	0,35	12,10	4,98	36,4	71,3	3 500	50 000	1 750
3.	U	1,58	19,45	1,26	17,7	59,9	7 000	55 000	3 000
	V	2,36	21,70	1,49	28,3	61,0	8 000	55 000	2 000
	W	1,49	17,23	1,66	26,7	61,0	8 000	55 000	2 500
4.	U	2,21	36,00	8,73	25,8	69,4	25 000	>100 000	5 000
	V	3,25	35,73	9,81	31,8	>75,5	12 000	>100 000	7 500
	W	2,76	36,00	10,02	35,4	>75,5	10 000	>100 000	6 500

- on-line merenje u praznom hodu pri najvišem naponu koji se mogao postići forsiranjem pobude (oko 4,2 kV); na forsiranje pobude se moralo ići pošto se pri  $0,6 U_n$  nije mogla dobiti ustaljena vrednost pražnjenja, što je karakteristično za slučaj kada je ispitni napon blizak naponu otpočinjanja parcijalnih pražnjenja  $U_i$ ; vrednosti koje su dobijene on-line merenjem su date u poslednjoj koloni tabele 1.

Takođe je obavljeno snimanje karakteristike  $tg\delta=f(U)$  u rasponu od 0,2 do 1,0  $U_n$ .

U tabeli 1 su prikazani:

- maksimalan priraštaj faktora dielektričnih gubitaka po naponskom ispitivanju  $0,2 U_n$  ( $Dtg_{max}/0,2U_n$ ) za opsege od 0,2 do 0,6 i od 0,6 do 1,0  $U_n$ ,
- priraštaj kapacitivnosti ( $DC/C$ ) između 0,2 i 1,0  $U_n$ ,
- intenzitet parcijalnih pražnjenja  $A$  (dB), koji se dobija proračunom iz izmerene kvadratne veličine  $D(C^2/s)$ , uzimajući u obzir prigušenje mernog kola, smetnje, kapacitivnost objekta i vršeci poređenje sa usvojenim referentnim nivoom ( $d_0=10^9 C^2/sF$ ), pri 0,6 i pri 1,0  $U_n$ , pri off-line merenju,
- intenzitet parcijalnih pražnjenja izražen preko prividnog naelektrisanja  $Q(pC)$ , pri 0,6 i 1,0  $U_n$  pri off-line merenju, odnosno pri 4,2 kV pri on-line merenju u praznom hodu.

Tabela 1 pokazuje da kod sva 4 hidrogeneratora na kojima je vršen eksperiment rezultati merenja off-line metodom daju veće vrednosti intenziteta parcijalnih pražnjenja nego pri merenju on-line metodom. Ovo je naročito izrazito za generatore 3 i 4, pri čemu je generator 4 u tako lošem stanju da intenzitet parcijalnih pražnjenja prevazilazi merni opseg oba primenjena instrumenta pri 1,0  $U_n$ . Nalaz da off-line merenje daje veće vrednosti nego on-line merenje u potpunoj je suprotnosti sa rezultatima eksperimenta koji je citiran u [3], u kojem je učinjena suštinska greška time što su upoređivani rezultati merenja koji su izvedeni pomoću *dva različita uređaja*, različite osetljivosti, opsega mernih frekvencija itd. S druge strane, rezultat našeg merenja je očekivan i potpuno logičan, imajući u vidu razliku između dve metode ispitivanja u pogledu električnih napreznaja izolacionog sistema.

Nešto teže je objasniti rezultate merenja istim PDA-6D instrumentom [3], pri kojima je za off-line merenje dobijen intenzitet pražnjenja od 200-400  $mV$  (zavisno od faze ili paralelne grane), dok su u normalnom pogonu (on-line) vrednosti dostizale do 3 600  $mV$ , odnosno reda veličine viši nivo. Prema autorima, radi se o ekstremno visokim vrednostima intenziteta parcijalnih pražnjenja u on-line režimu, koja „ukazuju na podmakli stadijum oštećenja namotaja u fazama”. Uprkos tome, generator je i dalje u pogonu, mada je od merenja prošlo više od 6 go-

dina. Nameće se zaključak da su na rezultate merenja u on-line režimu uticale smetnje, koje su bitno uvećale izmereni nivo pražnjenja i doprinele pesimističkoj proceni.

Uzged napominjemo da tabela 1 pokazuje da između priraštaja faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti s jedne strane, i intenziteta parcijalnih pražnjenja sa druge strane, dobra korelacija postoji tek kod mašina u jako lošem stanju (generator 4).

#### 4. PREDNOSTI I MANE OFF-LINE I ON-LINE METODE

Prednosti i mane off-line metode su prikazane u tabeli 2, a prednosti i mane on-line metode u tabeli 3. U obe tabele prve stavke u kolonama „Prednosti” i „Mane” su istovetne, što zvuči paradoksalno, ali to zapravo nije, pošto se metoda ne može procenjivati apstraktno, nego u realnom kontekstu. Kod off-line metode prednost dovođenja jednog ispitnog napona na čitav namotaj je što se na taj način kontroliše i stanje dela namotaja koji gravitira ka zvezdištu, što pri ispitivanju indukovanim naponom nije slučaj. Kako sem električnog polja svi ostali faktori koji dovede do starenja deluju na čitav namotaj, a pojedini proizvođači obrtnih mašina imaju praksu da vrše selekciju štapova i lošije ugrađuju u zoni zvezdišta, jasan je interes za kontrolom čitavog namotaja. U protivnom je moguće neprijatno iznenađenje proboja u zoni zvezdišta pri zemljospoju u mreži, iako je namotaj po on-line kontroli u dobrom stanju.

S druge strane, postoji rizik proboja slabog štapa pri ispitivanju, koji u normalnom pogonu (bez pojave zemljospoja) ne bi bio ugrožen, što u nekim situacijama predstavlja nedostatak. Takav je slučaj kod hidrogeneratora kada se očekuje nailazak velikih voda, odnosno, kada su u pitanju turbogeneratori, u slučaju loše hidrologije, koja zahteva što veću raspoloživost termokapaciteta. Ipak, napajanje iz izvora male snage garantuje pri off-line merenju manji obim oštećenja u slučaju proboja nego u slučaju kvara u pogonu, a time i kraće trajanje opravke.

Prednost off-line metode je u mogućnosti prevazilaženja problema prigušenja impulsa koji nastaju na mestu pražnjenja u zoni zvezdišta priključivanjem sprežnog kondenzatora i merne aparature na izvod zvezdišta. Istovremeno se slabljenje impulsa pri prostiranju kroz namotaj može koristiti za prigušenje smetnji priključivanjem izvora ispitnog napona i sprežnog kondenzatora na suprotne krajeve namotaja.

Trenutno je kod nas osnovni problem kod off-line ispitivanja parcijalnih pražnjenja zastarelost postojeće opreme, koja je nabavljena pre 20 godina, pa i 30 godina. U međuvremenu je ostvaren ogroman

Tabela 2.

OFF-LINE METODA			
Prednosti		Mane	
1.	Jednako električno naprezanje celog namotaja	1.	Jednako električno naprezanje celog namotaja
2.	Mala energija luka i oštećenje ako pri ispitivanju dođe do proboja	2.	Potreba za izvorom napajanja bez parcijalnih pražnjenja koji može biti velike snage, u zavisnosti od kapaciteta objekta koji se ispituje
3.	Manja izloženost smetnjama tokom merenja	3.	Potreba za zaustavljanjem mašine radi ispitivanja, tj. mogućnosti da se ispitivanja izvode uglavnom prilikom remonta
4.	Mogućnost priključenja merne aparature sa strane linijskog izvoda ili zvezdišta	4.	Zastarelost postojeće ispitne opreme u zemlji
5.	Određivanje veličina kao što su napon otpočinjanja parcijalnih pražnjenja $U_i$ i napon gašenja parcijalnih pražnjenja $U_e$ [2]		
6.	Veće iskustvo sa primenom metode i viši stepen standardizacije		

Tabela 3.

ON-LINE METODA			
Prednosti		Mane	
1.	Nejednako električno naprezanje namotaja	1.	Nejednako električno naprezanje namotaja
2.	Mogućnost ispitivanja bez ometanja normalnog pogona mašine	2.	Veća opasnost od uticaja smetnji
3.	Nepotreban izvor ispitnog napona	3.	Nemogućnost kontrole stanja dela namotaja u zoni zvezdišta priključenjem merne aparature na priključak zvezdišta
4.	Mogućnost kontinualnog praćenja parcijalnih pražnjenja u pogonu ili vrlo učestale kontrole, što pruža veću šansu za blagovremeno otkrivanje kvara prema nagloj promeni parcijalnih pražnjenja, a time i veću šansu da se izbegne havarija	4.	Nemogućnost određivanja napona otpočinjanja parcijalnih pražnjenja $U_i$ i napona gašenja parcijalnih pražnjenja $U_e$
5.	Centralizovani monitoring, uz olakšanu mogućnost poređenja rezultata na mašinama istog tipa	5.	Manje iskustvo i stepen standardizacije metode

napredak na ovom polju. Pored kvantitativnog određivanja intenziteta parcijalnih pražnjenja, savremeni uređaji integrisanim softverskim paketima za obradu i analizu detektovanih impulsa usled parcijalnih pražnjenja omogućuju preciznije lociranje mesta pražnjenja (u šupljinama unutar izolacije, u šupljinama uz bakar provodnika, između poluprovodnog premaza namotaja i zida žljeba, tj. paketa limova). Ovi softverski paketi su nastali proučavanjem karakteristika parcijalnih pražnjenja na veštački stvorenim defektima kod maketa izolacionih sistema. Prikupljanje i čuvanje podataka o ispitivanjima u elektronskom obliku omogućava usavršavanje dijagnostike putem poređenja dobijenih rezultata sa rezultatima ranijih ispitivanja na generatorima istog tipa, sa primenjenim istim izolacionim sistemom, čiji istorijat i kvarovi su poznati.

Određivanje napona otpočinjanja parcijalnih pražnjenja  $U_i$  i napona gašenja parcijalnih pražnjenja  $U_e$  značajno je i za procenu kvaliteta nove izolacije i za praćenje njenog ponašanja u pogonu. Kriva  $Q=f(U)$  ima histerezisni oblik, tako da je  $U_e < U_i$ . Zato je kod nove kvalitetne izolacije potrebno da obe vrednosti napona budu više od faznog napona. To garantuje ne samo odsustvo štetnog delovanja parcijalnih pražnjenja pri normalnom pogonu, već i gašenje parcijalnih pražnjenja usled prenapona posle prestanka delovanja prenapona. Vremenom, usled starenja se visina napona  $U_i$  i  $U_e$  snižava.

Prisustvo vodonika pod pritiskom kod velikih turbogeneratorsa znatno podiže visinu napona  $U_i$  i  $U_e$ , što je razlog za znatno manju ugroženost turbo-

generatora velikih snaga od štetnog delovanja parcijalnih pražnjenja.

## 5. ZAKLJUČAK

*Usporedna analiza prednosti i slabih strana dve metode kontrole parcijalnih pražnjenja kod obrtnih mašina pokazuje da off-line i on-line merenja nisu konkurencija jedno drugom, nego dve komplementarne metode. Dakle, treba uvoditi on-line kontrolu parcijalnih pražnjenja, naročito kod hidrogeneratorsa kod kojih su rizici od štetnog delovanja parcijalnih pražnjenja daleko veći. Međutim, ne treba prekidati sa dosadašnjom praksom off-line merenja prilikom remonta, pošto ona otkriva neke pojave koje ostaju skrivene pri on-line kontroli. Da bi se od off-line merenja postigla što veća korist, neophodno je osavremenjavanje opreme za ova ispitivanja.*

## 6. LITERATURA

- [1] IZVEŠTAJ INSTITUTA „NIKOLA TESLA” broj 401136, urađen za JP „Drinske hidroelektrane”, Bajina Bašta, deo preduzeća „Elektromorava” - Čačak 2001. godina
- [2] IEC 60270 (2000-12): PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS
- [3] D. Pamučar, S. Stamenov, M. Kotlica: MERENJA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA NA STATORSKIM NAMOTAJIMA GENERATORA U JP „ĐERDAP” 24. Savetovanje JUKO CIGRE, R 11-10, Vrnjačka Banja, 1999

Rad je primljen u uredništvo 12. 05. 2004. godine



**Aleksandar P. Bojković** je rođen 1943. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1970. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Po odsluženju vojnog roka zaposlio se 1971. godine u Centru „Elektromerenja” Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla”, gde i sada radi na poslovima preventivne kontrole obrtnih mašina, energetskih i mernih transformatora. Učestvovao je u razvoju i uvođenju u praktičnu primenu kontrole stanja ulja i gasnohromatografske analize kod energetskih i mernih transformatora, kao i u izradi standarda i tehničkih preporuka iz svih navedenih oblasti.

Kao autor ili koautor je objavio izvestan broj radova na međunarodnim stručnim skupovima i veći broj radova na domaćim savetovanjima (pretežno CIGRE, gde je u nekoliko navrata dobio diplomu za najzapaženiji referat).



---

*Snežana Mijailović,  
Zoran Vujasinović i Mladen Apostolović*

# **Primena metoda za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži u jugoistočnoj Evropi**

Stručni rad  
UDK: 621.31

---

## *Rezime:*

U radu je ukratko izložen predlog udruženja zemalja operatora prenosnog sistema Evropske unije po pitanju trostepenog procesa upravljanja zagušenjima na vremenskom horizontu od najavljanja transakcije dan unapred do njene realizacije. Zatim je dat prikaz dosadašnjih aktivnosti na uvođenju najpodesnije metode za upravljanje zagušenjima u okviru započetog procesa kreiranja regionalnog tržišta električne energije u regionu jugoistočne Evrope. Opisana je procedura proračuna i harmonizacije neto prenosnog kapaciteta, kao i procedura prognoze zagušenja dan unapred. Na kraju rada date su smernice i opisani dalji koraci na primeni jedinstvene metodologije za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži jugoistočne Evrope.

***Ključne reči: region jugoistočne Evrope, upravljanje zagušenjima, alokacija prenosnih kapaciteta, NTC, DCF***

---

## *Abstract:*

### ***APPLICATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS IN TRANSMISSION NETWORK IN SOUTH-EAST EUROPE***

Within this paper the short description is given about the European Transmission System Operators proposal of the three-step congestion management process, at the time horizon from the announcement of the transaction at day-ahead, until the moment of its realization. Also, there is an overview of the present activities related to the implementation of the most suitable method for Congestion Management, in the frame of the ongoing process of creation of the Regional Electricity Market within the South-east European region. The procedure for calculation and harmonization of Net Transfer Capacity is presented, as well as the procedure of Day Ahead Congestion Forecast. Finally, the guidelines and further steps for the implementation of common methodology for Congestion Management in transmission network of South-East Europe are given.

***Key words: South-east European region, Congestion Management, transmission capacity allocation, NTC, DCF***

---

## **1. UVOD**

Proces restrukturiranja i liberalizacije elektroenergetskog sektora u zemljama Evrope je doveo u pitanje tradicionalne načine upravljanja prenosnom mrežom i otvorio mnogobrojne dileme vezane za

obezbeđenje sigurnosti napajanja potrošača i upravljanje zagušenjima u mreži u uslovima otvorenog tržišta električne energije. Ove nove okolnosti na deregulisano tržištu su postavile zahteve pred operatore prenosnog sistema (TSO - Transmission System Operator) da, poštujući tržišne principe, pronađu na-

---

*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*

čine otklanjanja zagušenja prenosnih kapaciteta do kojih dolazi kada prenosni sistem ne može da funkcioniše sigurno, pri određenim rasporedima proizvodnje i potrošnje diktiranim radom slobodnog tržišta. Drugim rečima, potrebno je pronaći nove tehničke i organizacione okvire za upravljanje mrežom u uslovima mnogo obimnijih i teže predvidljivih transakcija električne energije, koje su posledica stalnih promena cena ponude i potražnje na tržištu električne energije.

U cilju kreiranja novih tehničkih metoda koje prate posledice deregulacije elektroenergetskog sektora, formirano je udruženje operatora prenosnog sistema zemalja Evropske unije (European Transmission System Operators – ETSO). Ovo udruženje je do sada objavilo nekoliko dokumenata vezanih za razne tehničke aspekte funkcionisanja tržišta električne energije, među kojima su i oni koji se bave problemom zagušenja u visokonaponskoj prenosnoj mreži Evropske unije i metodama za njihovo otklanjanje [1–4]. Pošto je ceo proces deregulacije 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 razvijenim metodama i procedurama, i da će se ovaj proces i dalje razvijati u cilju dobijanja rešenja koja bi omogućavala nesmetan i efikasan rad tržišta s jedne, te sigurnu eksploataciju elektroenergetskog sistema s druge strane.

Detaljniji uvid u svaku od metoda upravljanja zagušenjima, odnosno alokacije prenosnih kapaciteta, kao i njihova uporedna analiza data je u referencama [5, 6]. Radi se o metodama:

- alokacije neto prenosnih kapaciteta po principu prve prijave („first come, first served”)
- alokacije neto prenosnih kapaciteta sa proporcionalnim smanjivanjem transakcija („pro-rata”)
- eksplicitne aukcije
- implicitne aukcije
- razdvajanja/spajanja tržišta
- redišpečinga
- koordinisane aukcije.

Potpisivanjem zajedničkih deklaracija i memorandumu o kreiranju regionalnog tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi [7–10], zemlje Balkana su se obavezale da će pored organizovanja svih neophodnih institucija u cilju funkcionisanja tržišta u skladu sa Direktivom Evropske unije [11], implementirati i sva tehnička pravila i procedure razvijene u poslednjih nekoliko godina u okviru ETSO organizacije. Iz tog razloga su započete aktivnosti u cilju primene adekvatne metode za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži jugoistočne Evrope [12].

U radu je prezentovan ETSO predlog trostepenog procesa upravljanja zagušenjima i prikazane su

dileme i neophodne akcije koje je potrebno sprovesti, kako bi se odredila najpovoljnija metoda za alokaciju prenosnih kapaciteta.

Zatim je dat prikaz postojeće procedure za proračun prenosnog kapaciteta (NTC - Net Transfer Capacity) koji se u Evropi računa na sezonskom nivou i javno objavljuje na ETSO web-sajtu, kao i način njene primene u zemljama Balkana [13–19]. Ova procedura je neophodna za grubi uvid u mogućnosti razmene električne energije između susednih elektroenergetskih sistema i/ili regiona i otkrivanje uskih grla u elektroenergetskom sistemu i elemenata koji uzrokuju ta zagušenja na dužem vremenskom horizontu. Osim toga, NTC se kao mera prenosnih mogućnosti koristi kod većine postojećih metoda alokacije kapaciteta u Evropi. Tada je ovaj sezonski NTC obavezujući i upotrebljava se kod alokacije kapaciteta. Na nekim tržištima se komercijalni, obavezujući NTC računa i objavljuje češće (mesečno, nedeljno, dnevno ili satno).

Kao naredni korak, opisana je procedura prognoze zagušenja dan unapred (DAFC - Day Ahead Congestion Forecast), koja se takođe primenjuje u regionu jugoistočne Evrope [20]. Ova procedura omogućava prognozu tokova snaga i naponskih prilika u mreži i služi za prepoznavanje zagušenja narednog dana na bazi AC (naizmjenična struja – Alternative current – AC) proračuna tokova snaga, a samim tim i za procenu sigurnosti rada povezanih elektroenergetskih sistema dan unapred.

Na kraju rada, sagledavajući iskustva u dosadašnjoj primeni, kao i postojeći nivo razvijenosti izloženih procedura u okviru regiona jugoistočne Evrope, date su smernice i neophodni koraci za dalju razradu i poboljšanje ovih procedura kao sastavnog dela procesa upravljanja zagušenjima koji treba da se u narednom periodu definiše za zemlje regiona u okviru procesa kreiranja regionalnog tržišta električne energije [21, 22].

## **2. PROCEDURA ZA UPRAVLJANJE ZAGUŠENJIMA U ZEMLJAMA UDRUŽENJA OPERATORA PRENOSNOG SISTEMA ZEMALJA EVROPSKE UNIJE**

Posmatrajući globalni proces upravljanja zagušenjima na vremenskom horizontu od najavljuvanja transakcije dan unapred pa do njene realizacije, kao najefikasnija vremenska raspodela pojedinih mehanizama najčešće se pominje primena trostepenog procesa opisanog u ETSO dokumentu [1]:

**(I) Alokacija prenosnih kapaciteta** - uobičajeno najkasnije tokom jutra prethodnog dana u odnosu na dan za koji se planira. Tokom tog koraka, TSO procenjuju raspoložive prenosne kapacitete između

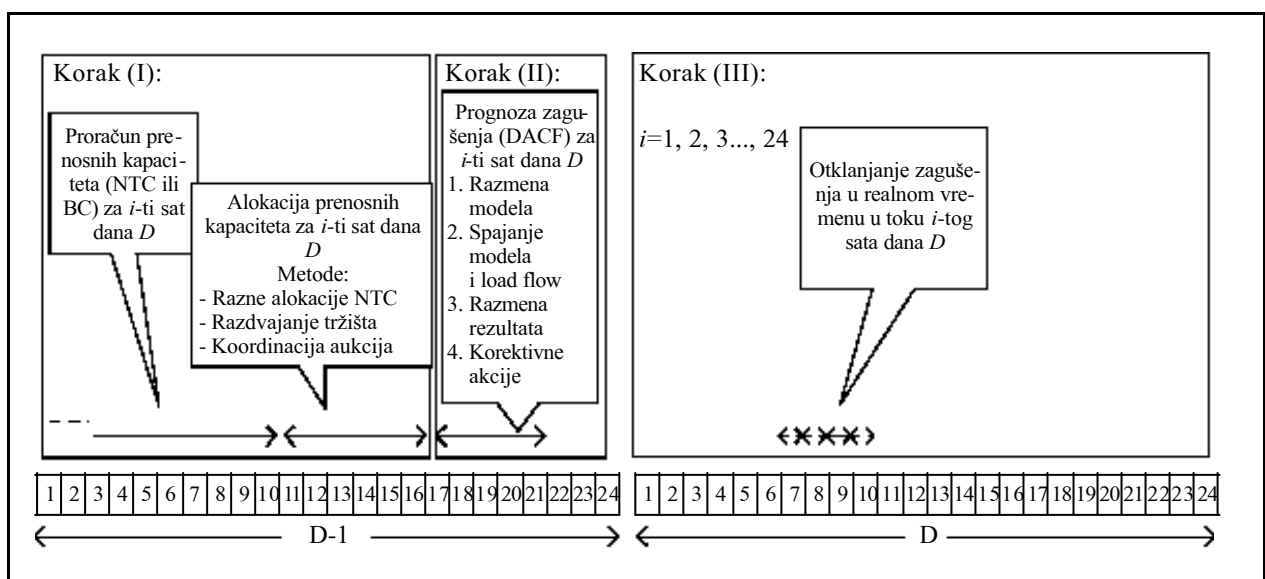
oblasti i objavljuju ih. Nakon prikupljanja zahteva za prenosnim pravom od učesnika na tržištu, primenjuju se razni mehanizmi za alokaciju kada ti zahtevi prekorače raspoložive prenosne kapacitete.

U okviru ETSO prakse za prvi vremenski korak - alokaciju prenosnih kapaciteta, razvijene su, primenjuju se ili su u fazi razrade razne metode alokacije prenosnih kapaciteta (metode alokacije NTC-a, metode razdvajanja/spajanja tržišta i koordinisanih aukcija [1–6]). Za sve metode alokacije prenosnih kapaciteta (izuzev za metodu koordinisanih aukcija) bazna pretpostavka je poznavanje neto prenosnog kapaciteta (NTC) kao maksimalnog programa razmene koji može da se ostvari između dva sistema/oblasti bez ugrožavanja postavljenih kriterijuma sigurnosti. Objavljivanje NTC kojim se određuje maksimalni dozvoljeni nivo razmene između dve oblasti je jedan od zahteva koji predstavlja minimum informacija neophodan učesnicima na tržištu da bi sagledali mogućnosti za ostvarivanje transakcija. Kod metode koordinisane aukcije, koja alokira transakcije posmatrajući njihov uticaj na fizičke tokove snaga na pojedinim elementima prenosne mreže, potrebno je poznavanje fizičkog kapaciteta uskog grla (BC - „Bottleneck capacity”, u nekim dokumentima nazivan i „Border Capacity”).

**(II) Prognoza zagušenja (DACF)** - po podne tokom prethodnog dana. Nakon alokacije kapaciteta, precizno su poznate potrošnje-proizvodnje po čvorovima za sutrašnji dan, tako da se formiraju modeli elektroenergetskih sistema za proračun tokova snaga, na osnovu kojih se analizira sigurnost mreže, tj. pronalaze se ranije neotkrivena mesta zagušenja u mreži.

Drugi korak se odnosi na prognozu zagušenja (DACF) u okviru kog se razmenjuju modeli prognoziranog stanja prenosnih elektroenergetskih mreža dan unapred. Preduslov za izradu pojedinih modela je završen proces alokacije prenosnih kapaciteta, gde se sada poznaje tačan raspored proizvodnje i potrošnje, pa je moguće formirati „vozni red” za svaki od sistema. Zavisno od potreba, TSO-ovi sakupljaju i povezuju dobijene modele formirajući jedinstveni model UCTE interkonekcije, analiziraju tokove snaga i sagledavaju moguća zagušenja u mreži, koja nisu izbegnuta u procesu alokacije kapaciteta. DACF procedura je u stalnom procesu razvoja, pri čemu se prvenstveno misli na sve učestaliju razmenu modela. Ovaj korak nije u celosti obavezujući za TSO-ove u UCTE interkonekciji, tako da se u narednom periodu mora posvetiti neophodna pažnja razvoju obavezujuće procedure za sve TSO-ove, posebno u delu koji se odnosi na analize sigurnosti, kao i poboljšanju same metodologije u cilju dobijanja pouzdanih informacija o stanju sistema dan unapred. Poznavajući karakteristike redispečinga kao metode upravljanja zagušenjima, prvenstveno orijentisane ka otklanjanju zagušenja nakon procesa alokacije, ona bi se mogla koristiti kao alat za rešavanje zagušenja prepoznatog (prognoziranog) u toku DACF proračuna.

**(III) Otklanjanje zagušenja u realnom vremenu** - realno vreme. Kada se i pored dva prethodna planerska koraka tokom odvijanja operativnog pogona sistema u realnom vremenu ipak pojavi neko zagušenje, javlja se potreba za brzom primenom mehanizama za eliminaciju zagušenja, pre nego što ono dovede do ugrožavanja sigurnosti rada.



Slika 1. Vremenski raspored trostepenog procesa upravljanja zagušenjima

Otklanjanje zagušenja u realnom vremenu, kao treći i poslednji korak u procesu upravljanja zagušenjima je bio poznat i u vertikalno organizovanim elektroprivredama. Izazov koji je stvorilo formiranje otvorenog tržišta električne energije je da moguće dispečerske akcije, koje treba da sprovede operativno osoblje TSO-a u eliminisanju uočenih nesigurnosti u sistemu, moraju biti u skladu sa tržišnim pravilima. I kod ovog koraka metoda redispečinga se nameće kao logičan izbor, pri čemu je tehnika redispečinga, odnosno promena angažovanja izvora u cilju otklanjanja nesigurnog stanja u mreži veoma poznata iz dispečerske prakse svih tradicionalno organizovanih elektroprivreda. Razlika u primeni redispečinga kod deregulisanog tržišta je ta da sada treba pronaći drugačije organizacione okvire da bi TSO koji generalno (više) nije vlasnik proizvodnih kapaciteta mogao da ih angažuje u cilju otklanjanja zagušenja. U te svrhe se prave novi zakonski okviri i potpisuju ugovori između TSO-ova i vlasnika proizvodnih kapaciteta.

Vremenski raspored procedura I, II i III prikazan je na slici 1.

### **3. RAZVOJ REGIONALNOG TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE U JUGOISTOČNOJ EVROPI**

Zemlje jugoistočne Evrope, i ako nisu u redu za brzi prijem u članstvo Evropske Unije, moraju da se prilagode novonastaloj situaciji u elektroenergetskom sektoru i usklade svoju organizaciju, pravila i način rada sa evropskom Direktivom o kreiranju tržišta električne energije. Iz tih razloga, septembra 1999. godine potpisana je Deklaracija o namerama za osnivanje konkurentnog regionalnog tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi [7], a zatim juna 2000. godine, potpisan je Atinski memorandum o razumevanju [8] kojim je preporučena izrada nove deklaracije u okviru koje bi se detaljno precizirale faze razvoja regionalnog tržišta električne energije. Pristup ovom tržištu je otvoren za sve zemlje regiona, ukoliko procene da je to u skladu sa njihovim interesima. Dalji proces se intenzivira potpisivanjem Memoranduma o kreiranju regionalnog tržišta električne energije i njegovom uključivanju u interno tržište Evropske unije [9], 15. novembra 2002. godine, od strane resornih ministara svih zemalja u regionu. Novim Memorandumom [10], potpisanim 9. decembra 2003. godine uvodi se i tržište gasa, kao i zahtevi za uvođenjem zaštite životne sredine, i poslednje procene su da će tranzicioni period za uspostavljanje tržišta električne energije trajati do 2007. godine.

Osnivanje regionalnog tržišta električne energije između ostalog pretpostavlja i usvajanje i prime-

nu metoda otklanjanja zagušenja, razvijenih u zemljama Evropske unije. Na nivou kontinentalne Evrope još uvek ne postoji jedinstvena metodologija upravljanja zagušenjima. U ETSO dokumentima su dati opisi postojećih metoda za otklanjanje zagušenja, kao i predlozi za nove metode, ali se predlog jedinstvene metode još uvek iščekuje. Bez obzira što takva metodologija ne postoji, javlja se potreba da postojeće metodologije budu kompatibilne jedna sa drugom. Razlog leži u potrebi da se u prenosnoj mreži sa velikim međusobnim uticajem kakva je ona u kontinentalnoj Evropi (a to se odnosi i na mrežu Balkana), spreči da transakcije na jednom delu mreže dovedu do fizičkih zagušenja na sasvim drugom delu. Radovi na razvoju takve metode su u toku. Za sada su neke od predloženih metoda u eksperimentalnoj primeni u pojedinim regionima sve dok se ne razreše sve postojeće dileme o njihovoj praktičnoj primenljivosti na širem području.

Sve što je rečeno o primeni osnovnih metoda u radu [6] na sisteme zapadne i centralne Evrope, uglavnom važi i za područje jugoistočne Evrope. Naime, kao i u ostatku Evrope, elektroenergetski sistemi u regionu jugoistočne Evrope su međusobno jako povezani, te je primena partikularnih metoda (razni vidovi raspregnute alokacije NTC-a), pa i metode razdvajanja tržišta kakva postoji u Skandinaviji, otežana zbog prisustva značajnih kružnih tokova snaga. Tako bi se metode koje se oslanjaju na alokaciju NTC-a uspešno mogle primeniti samo u iznimnim slučajevima nekih koliko-toliko izolovanih rubnih područja (Turska, delimično Grčka).

Pored navedene sličnosti sa zapadnom i centralnom Evropom u pogledu jake međupovezanosti sistema, dodatna otežavajuća okolnost za region jugoistočne Evrope je relativna nerazvijenost tržišta električne energije, gde su zemlje regiona tek krenule u proces liberalizacije tržišta, neke više, neke manje. Međutim, okolnost da je region gotovo „prazan papir” u pogledu liberalizacije, možda u jednom delu može da se iskoristi kao prednost. Naime, otvara se mogućnost da se i pozitivna i negativna iskustva evropskih zemalja kritički sagledaju kod primene u regionu, izbegavajući stranputice na koje su oni eventualno naišli u razvoju svog tržišta.

#### **3.1. Iskustva jugoistočne Evrope u pogledu upravljanja zagušenjima**

Poslednjih godina TSO jugoistočne Evrope, kroz zajednički rad u regionalnim organizacijama (SUDEL, SETSO, SECI, SEETEC, SEERF itd.) napreduju u pripremi regionalnog tržišta električne energije, u čemu je od velike pomoći i učešće eksperata iz zemalja sa oboda regiona jugoistočne Evrope,

koje su članice Evropske Unije ili će to postati tokom 2004. godine (Austrija, Italija, Mađarska, Slovenija).

U razvoju pojedinih segmenata budućeg tržišta već su postignuti značajni rezultati, kao što je proračun NTC, procedura prognoze zagušenja dan unapred (DACF), istraživanje pogodnih metoda alokacije kapaciteta i dr.

ETSO predlog trostepenog procesa, već opisan u drugom poglavlju, najčešće pominje kao najbolje rešenje za upravljanje zagušenjima regionu jugoistočne Evrope, na vremenskom horizontu od najavljanja transakcije (dan unapred) pa do njene realizacije u realnom vremenu:

- Alokacija prenosnih kapaciteta - ujutro tokom prethodnog dana
- Prognoza zagušenja (DACF) - po podne tokom prethodnog dana
- Upravljanje u realnom vremenu.

Shodno ovom trostepenom procesu, odvija se i razvoj pojedinih modula procesa otklanjanja zagušenja u regionu jugoistočne Evrope. Prvi korak određivanja najpodesnije metode za alokaciju prenosnih kapaciteta je započeo i prepoznaju se dva moguća rešenja. U skladu sa poslednjim odlukama Atinskog foruma, održanog oktobra 2003. godine u Sofiji, predstavnici ETSO i CEER organizacija su se dogovorili da je u narednom periodu neophodno ispitati mogućnosti za uvođenje jedne od dve moguće metode - *metode koordinisanih aukcija ili metode razdvajanja/spajanja tržišta* [12].

Bez obzira koja od metoda za alokaciju prenosnih kapaciteta u jugoistočnoj Evropi bude usvojena, proračun indikativnih sezonskih vrednosti NTC i njihovo objavljivanje na zajedničkom ETSO veb sajtu je prihvaćeno kao obaveza u okviru regiona. Takođe, zemlje u regionu su razvile drugi korak u upravljanju zagušenjima - prognozu zagušenja (DACF) do nivoa razvijenog u zemljama zapadne Evrope, a po učestalosti razmene modela i na višem nivou od pojedinih zemalja zapadne Evrope. U narednim poglavljima biće objašnjen proces proračuna NTC, koji se u regionu proračunava u skladu sa ETSO preporukama [13, 14], te procedura prognoze zagušenja [20].

### **3.2. Procedura i iskustva u proračunima neto prenosnog kapaciteta**

NTC (Net Transfer Capacity) predstavlja procenjenu vrednost razmene između dve oblasti respektujući ograničenja za fizički prenos električne energije. NTC je definisan preko totalnog prenosnog kapaciteta (TTC - Total Transfer Capacity), umanjenog za marginu sigurnosti (TRM - Transmission Reliability Margin) -  $NTC = TTC - TRM$ .

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. Proračun NTC zahteva aktivnu razmenu informacija između TSO.

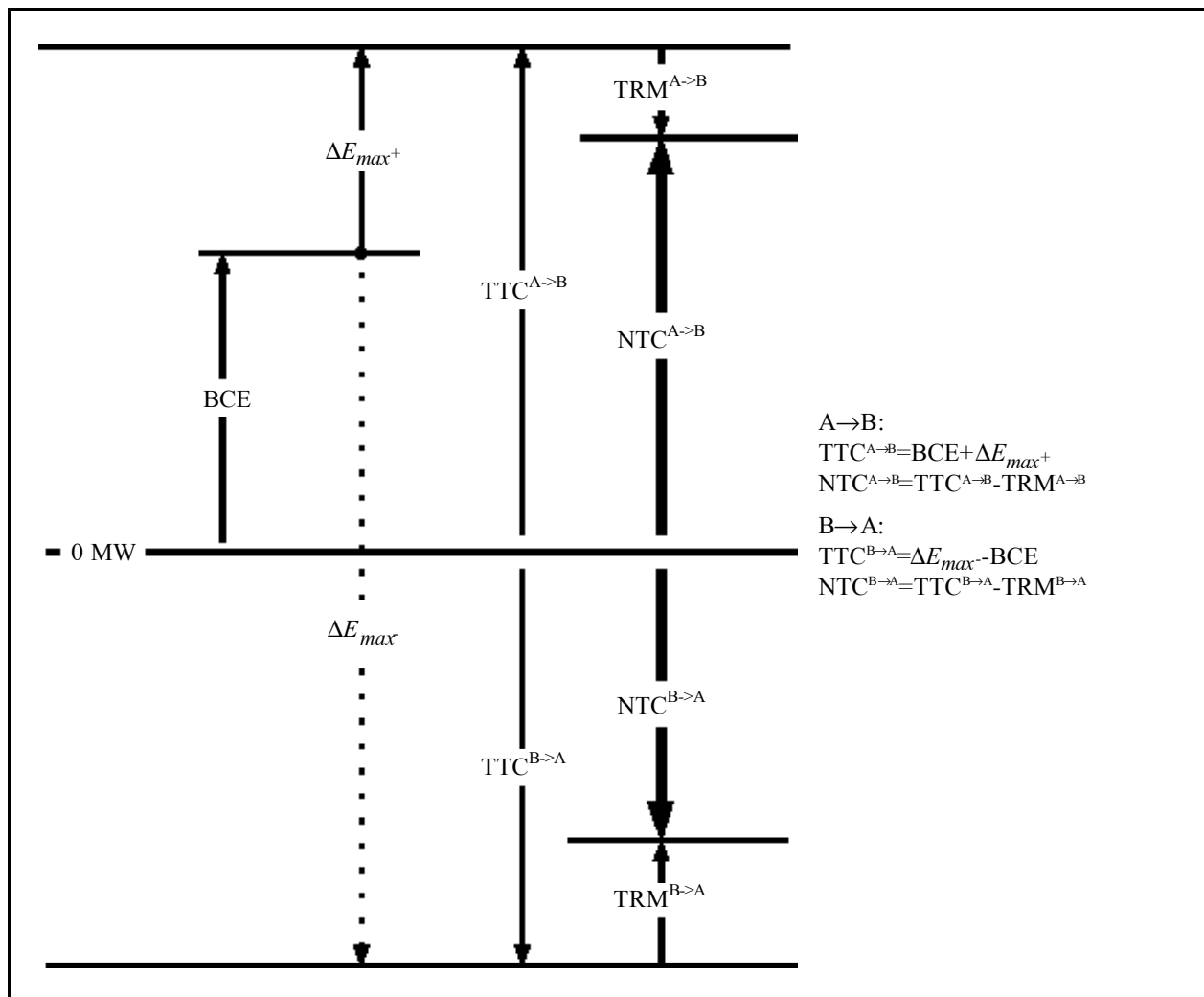
NTC se na razvijenim tržištima koristi kao ograničenje kod nekoliko metoda alokacije. Kada je zahtev za prenos određenim kapacitetima ispod nivoa vrednosti NTC, ne pojavljuju se dodatni troškovi prenosa i samim tim se ne aktivira mehanizam za raspodelu troškova, odnosno prenosni kapaciteti se besplatno koriste od strane učesnika na tržištu. U suprotnom slučaju, kada su zahtevi za korišćenjem određenog prenosnog kapaciteta iznad proračunate vrednosti NTC, potrebno je usvojiti neku od alokacionih metoda po kojoj će se odrediti prioritet za korišćenje prenosnog kapaciteta do vrednosti NTC (princip prve prijave, proporcionalno smanjivanje transakcija, eksplicitne ili implicitne aukcije).

Slično praksi evropskih zemalja, model koji se u okviru jugoistočne Evrope koristi za proračun NTC je standardni UCTE model koji se svake sezone, na nivou UCTE zemalja formira za sledeću sezonu. Za svaki elektroenergetski sistem/region se računa NTC prema susednim sistemima/regionima i zatim se dobijene vrednosti harmonizuju u cilju dobijanja jedne usaglašene vrednosti [15-19].

Važno je napomenuti da s obzirom na nerazvijenost tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi ove vrednosti NTC nemaju obavezujući karakter. Postojeći nivo razmene podataka u jugoistočnoj Evropi omogućuje proračun NTC-a na mnogo kraćem vremenskom horizontu (mesečnom, sedmičnom, dnevnom). Međutim, pošto za sada ne postoji dogovor oko metode alokacije kapaciteta koja bi koristila takve NTC, pa ni jasan stav da će buduća metoda alokacije uopšte da se oslanja na programska ograničenja tipa NTC, oni se regularno računaju samo na sezonskom nivou.

Proračun NTC za JIEL blok se radi korišćenjem klasične metodologije za proračun tokova aktivnih i reaktivnih snaga i naponskih prilika Njutr-Rapson. Proračun NTC vrši se simuliranjem razmena električne energije između susednih sistema, pri čemu je JIEL blok (Srbija i Crna Gora, Makedonija, a do ponovnog povezivanja i Republika Srpska) posmatran zajedno, tj. računa se NTC između JIEL bloka kao grupe i pojedinačnih susednih sistema (Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije). NTC vrednosti između pojedinih članica JIEL bloka se takođe povremeno računaju.

U formiranom sezonskom modelu obično već postoje neke planirane razmene između sistema, koje predstavljaju najbolju estimaciju razmena u inter-



Slika 2. Grafička interpretacija proračuna NTC

konekciji. Na osnovu njih definišu se bazne razmene, („Base Case Exchange” - BCE) na svakoj granici za koju se računa NTC (slika 2).

Treba napomenuti da BCE nije fizička razmena snage na interkonektivnim vodovima između dva sistema, nego prognozirani program razmene između tih sistema, što je u skladu sa postojećom praksom ugovaranja tranzitnih puteva za programe razmena.

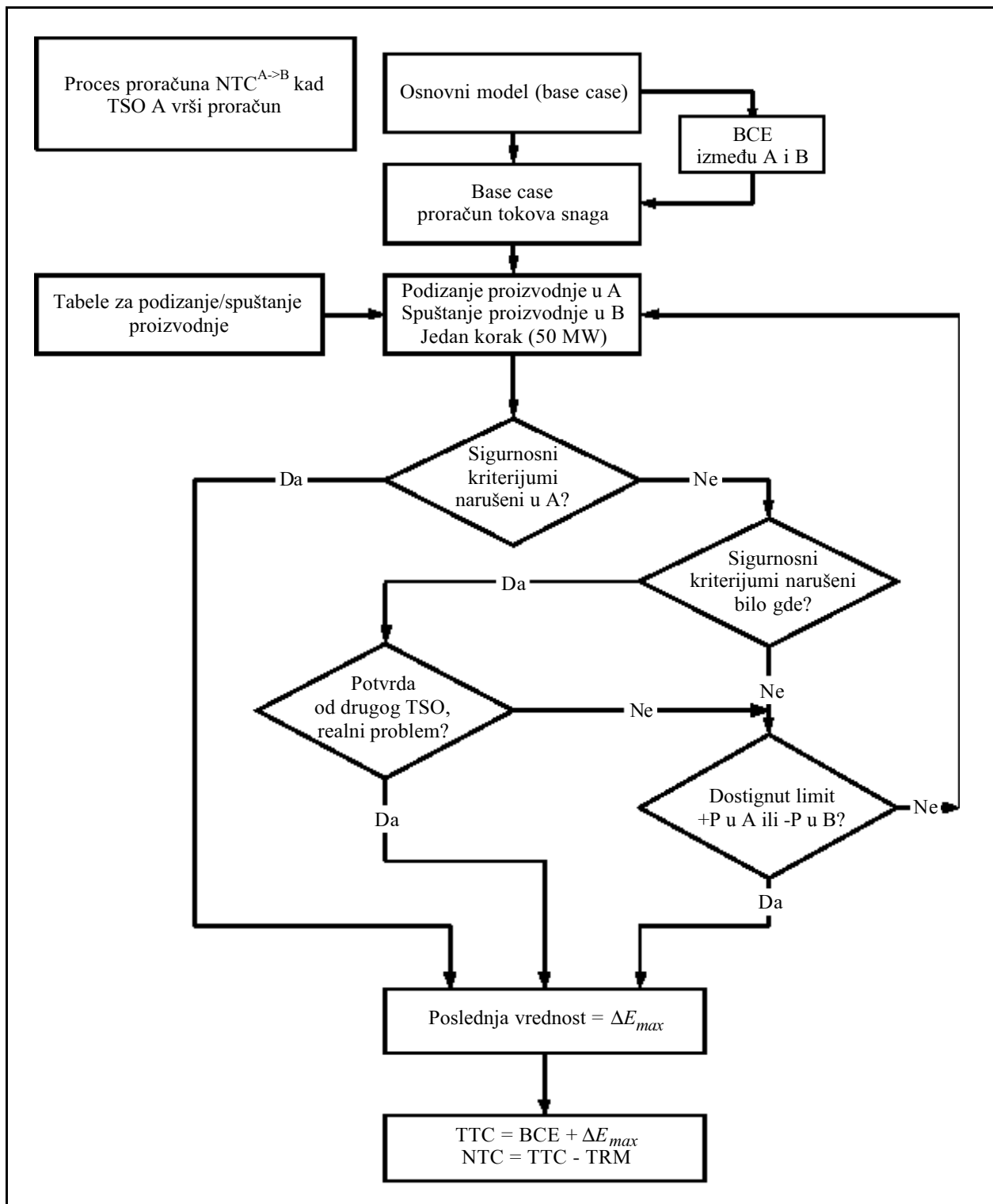
Tako na primer, pretpostavimo neku postojeću BCE između sistema A i B, i to u pravcu  $A \rightarrow B$ . Ako se računa NTC u istom pravcu, u sistemu A se postepeno povećava proizvodnja sa dogovorenim korakom (od npr. 50 MW), a u sistemu B se istovremeno smanjuje za isti iznos. Postoji više načina angažovanja izvora kod podizanja/spuštanja proizvodnje pri proračunu NTC:

- prema listi prioriteta (redosled+aktivna snaga), koja se razmenjuje zajedno sa modelom
- proporcionalno angažovanju u baznom režimu (base case)

– proporcionalno rezervi pojedinih elektrana

Iako je po mišljenju autora treći način angažovanja elektrana najpodesniji, jer dovoljno dobro uvažava ponašanje sistema, a ne zahteva dodatne podatke osim modela (u UCTE formatu), do sada se redovno koristio prvi način, odnosno angažovanje prema listi prioriteta. Angažovana snaga i redosled angažovanja jedinica koje učestvuju u podizanju/spuštanju proizvodnje se razmenjuju zajedno s modelom.

Pri svakom inkrementu razmene (50 MW) proverava se sigurnost interkonekcije respektujući  $n-1$  kriterijum. Postupak se nastavlja dok se ne naruši neki od sigurnosnih kriterijuma. Pritom se uvažava mogućnost korektivne (dispečerske) akcije, a ako se otkrije narušavanje sigurnosnih kriterijuma u nekom drugom sistemu, ono se uvažava samo ako operator tog sistema u bilateralnom kontaktu potvrdi fizički smisao dobijenog rezultata (slika 3).



Slika 3. Algoritam proračuna NTC između sistema A i B

Na taj način se dolazi do veličine  $\Delta E_{max}^+$  u pravcu A→B. Kada se sabere  $\Delta E_{max}^+$  i BCE, dobija se TTC (Total Transfer Capacity), koji predstavlja totalni iznos snage koja može da se isporučiti iz sistema A u sistem B bez narušavanja sigurnosnih kriteriju-

ma, direktno i/ili preko „trećih sistema”. Dalje, kada se od TTC oduzme TRM dobije se NTC.

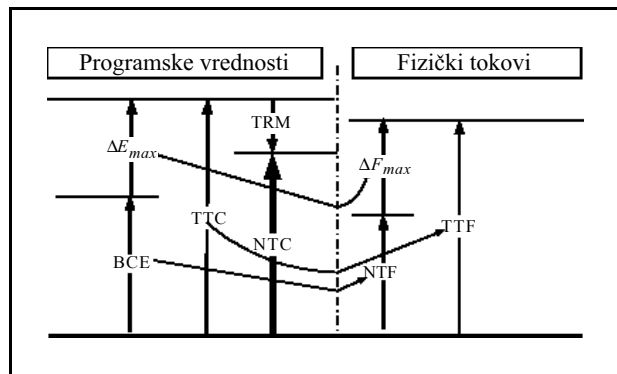
Proračun za suprotni pravac B→A, radi se na isti način, samo što se BCE oduzme od  $\Delta E_{max}^-$ .

TRM (Transmission Reliability Margin) je veličina koja predstavlja neophodnu rezervu u prenosnom kapacitetu za rad primarne i sekundarne regulacije, eventualne havarijske isporuke, te koja uvažava netačnosti u proračunu vezane za nepreciznost ulaznih podataka i nepredvidljivost ponašanja sistema. Na nivou jugoistočne Evrope je dogovoreno da se za vrednost TRM usvoji vrednost od 100 MW na granicama gde postoje 400 kV povezni dalekovodi, a 50 MW na granicama gde postoje 220 kV dalekovodi (JIEL blok - Albanija).

Pošto u datim izrazima i slikama figurišu samo aktivne snage u smislu programskih vrednosti ili ograničenja, potrebno je dati i objašnjenje fizičkih vrednosti aktivnih snaga koje odgovaraju gore prikazanim programskim veličinama. Tako **programu** razmene BCE preko određene granice na kojoj se računa NTC u osnovnom modelu, odgovara **fizički** tok snage NTF (Notified Transmission Flow) kao zbir tokova aktivnih snaga na poveznim dalekovodima na toj granici (slika 4). Kod petljastih interkonekcija se ove dve veličine redovno razlikuju, a najčešće je  $BCE > NTF$ , pošto se deo programa redovno zatvara i preko trećih, „bočnih” sistema. Logično, kod radikalno vezanih sistema bez bočnih veza (npr. Francuska-Španija), BCE i NTF su jednaki po vrednosti. To istovremeno govori i na kojim granicama alokacija NTC-a u bilo kom obliku može da bude uspešan metod, zbog nepostojanja kružnih tokova snaga.

Dalje, porastu programa razmene između dva sistema  $\Delta E$ , odgovara porast toka snage na direktnoj granici među njima  $\Delta F$ , odnosno za maksimalni sigurni dodatni program razmene  $\Delta E_{max}$  fizički pandan je  $\Delta F_{max}$ . I na kraju, TTC-u, odnosno zbiru  $BCE + \Delta E_{max}$  odgovara zbir  $NTF + \Delta F_{max}$  označen sa TTF (Total Transmission Flow), kao fizički tok snage na granici pri dostignutom programu TTC.

Međusobni odnos ovih veličina prikazan je na slici 4.



Slika 4. Programske i proračunske vrednosti razmena snaga između sistema A i B

U tabeli 1 dati su rezultati internog proračuna NTC između JIEL bloka i susednih sistema za zimski režim 2004. godine. Pošto se proračuni rade simultano u svim sistemima, rezultate je potrebno harmonizovati, pri čemu je osnova harmonizacije već prikazana na slici 3, gde se sa TSO u čijoj mreži je otkriveno preopterećenje preispituje validnost tog rezultata. Po urađenoj harmonizaciji, objavljuje se tabela 2.

Proces harmonizacije NTC dat je na primeru usaglašavanja vrednosti NTC između JIEL bloka i Bugarske (tabele 1 i 2). U internoj tabeli 1, respektujući kriterijum sigurnosti  $n-1$ , otkrivena su preopterećenja u bugarskoj mreži i s obzirom na to da nije bila jasna priroda uočenih nesigurnosti, pripremljen je izveštaj za više koraka (NTC između 268 MW i 518 MW). Potom su kolege iz Bugarske dale informaciju da se prvih nekoliko uočenih preopterećenja lako rešava dispečerskom akcijom, pa je na kraju zajednički usvojena vrednost NTC od 500 MW (tabela 2).

U slučaju razlika u rezultatima (kada nije došlo do harmonizacije), generalno se uzima manja od dve vrednosti. Tako na primer, u slučaju izvoza iz Rumunije u JIEL blok, u tabeli 1 je prikazana vrednost NTC od 750 MW, izračunata od strane predstavnika JIEL bloka. Pošto je rumunska vrednost bila niža (700 MW), ona je prikazana u konačnoj tabeli 2.

Nakon harmonizacije rezultata, dobijene su vrednosti NTC prikazane u okviru tabele 2. U toj tabeli su prikazane usaglašene vrednosti NTC za zimski režim 2004. godine za jugoistočnu Evropu. Ove vrednosti se, u skladu sa ETSO procedurom, sezonski objavljuju na ETSO veb sajtu (www.etsonet.org). U zimskom režimu 2004. godine pretpostavljeno je da neće doći do ponovnog povezivanja interkonekcije UCTE i to je razlog zašto u tabeli ne postoje vrednosti NTC-a između Hrvatske i Mađarske ka JIEL bloku.

### 3.3. Procedura prognoze zagušenja (DACF)

Kao što je rečeno, prognoza zagušenja je predviđena kao drugi korak u procesu upravljanja zagušenjima dan unapred. Izvodi se dan pre realizacije transakcija (D-1) po podne, po prijemu prognoziranih modela mreža svih sistema u interkonekciji.

U ovo doba, nakon alokacije prenosnih kapaciteta, poznaju se proizvodnje i potrošnje svakog sistema za naredni dan, sa velikim stepenom sigurnosti. Formiraju se prognozirani modeli sistema (forecast models), međusobno razmenjuju i radi se dodatna analiza sigurnosti. Na taj način, otkrivaju se problemi u radu sistema koji nisu mogli biti otkriveni pri proračunu prenosnih kapaciteta (npr. NTC proračuni), niti izbegnuti pri njihovoj alokaciji, pre svega



zbog nepoznavanja pravog rasporeda proizvodnje i potrošnje u toku prvog koraka. Ukoliko se otkriju moguća zagušenja, moraju se preduzeti dodatne mere za siguran rad sistema, npr. redispečing proizvodnih kapaciteta.

U dosadašnjoj praksi, DACF procedura postoji na više nivoa, pri čemu učesnici razmenjuju modele mreže na različitim vremenskim horizontima, shodno svojim mogućnostima:

1. DACF utorkom-za sredu u 10:30 h.
2. DACF utorkom-za sredu u 3:30 h i 10:30 h.
3. DACF radnim danom za sledeći radni dan u 10:30 h i utorkom za sredu u 3:30 h.
4. DACF svakim danom za sledeći dan u 10:30 h i utorkom za sredu u 3:30 h.
5. DACF svakim danom za sledeći dan u 3:30 h i 10:30 h.
6. ...

7. DACF svakim danom za sledeći dan, za sva 24 sata.

U prva dva koraka, dogovorno na nivou UCTE interkonekcije, sreda je izabrana za tipičan dan.

Poslednji korak predstavlja krajnji cilj DACF procedure u ovom obliku, gde bi učesnici u interkonekciji dan unapred razmenili 24 modela za 24 sutrašnja časa, čime bi se dostigla mogućnost modelovanja interkonekcije za čitav sutrašnji dan. Za sada nema zemalja u Evropi koje obavljaju razmenu na ovom nivou, ali u planu je da i to uskoro počne. U austrijskom TSO-u (APG) je u toku razvoj računarskog programa i procedura za početak primene DACF na ovom poslednjem nivou, što se očekuje tokom marta 2004. godine.

Zemlje jugoistočne Evrope uglavnom simultano napreduju u skraćivanju vremenskog horizonta slanja DACF modela, prelazeći sa jednog na drugi

Tabela 1.

Rezultati proračuna NTC za JIEL blok

Pravac	Kritični ispad:	Kritični element:	$\Delta E_{max}$ MW	BCE MW	TTC MW	TRM MW	NTC MW	NTF MW	TTF MW	$\Delta F_{max}$ MW	Primedba:	
RO->JIEL	Nema kritičnih ispada	/	600	250	850	100	750	290,6	702,0	411,4		
	400 kV Đerdap-PD Fier	400 kV Kozloduj-Cincareni 103 %	650	250	900	100	800	-290,6	729,0	438,4		
JIEL->RO	Nema kritičnih ispada, dostignut limit + $P_{max}$ u JIEL bloku		1 350	-250	1 100	100	1 000	-290,6	610,5	901,1		
JIEL->BG	Nema kritičnih ispada	/	550	-182	368	100	268	-122,4	96,0	218,4	Čeka se potvrda od NEK-a	
	400 kV Mizia-Carevac	220 kV G. Oriahovitsa-Pleven 103 %	600	-182	418	100	318	-122,4	120,8	243,2		
	400 kV Mizia-Carevac	220 kV G. Oriahovitsa-Pleven 110 %	700	-182	518	100	418	-122,4	158,1	280,5		
	400 kV Mizia-Carevac	220 kV G. Oriahovitsa-Pleven 114 %	750	-182	568	100	468	-122,4	179,9	302,3		
	TF 400/220 kV/kV Stolnik	TF 220/110 kV/kV Stolnik 102 %	800	-182	618	100	518	-122,4	205,0	327,4		
BG->JIEL	Nema kritičnih ispada	/	1 000	182	1 182	100	1 082	122,4	517,2	394,8		
	400 kV Đerdap-PD Fier	400 kV Niš-Sofija 102 %	1 050	182	1 232	100	1 132	122,4	541,1	418,7		
	400 kV Niš-Sofija	400 kV Đerdap-PD Fier 104 %	1 050	182	1 232	100	1 132	122,4	541,1	418,7		
JIEL->GR	200 kV Prizren-Glogovac	220 kV Podgorica-V. Dejes 101 %	350	100	450	100	350	188,6	336,6	148,0	Prihvatljivo/uz korektivne dispečerske akcije	
	400 kV Dubrovo-Solun	150 kV Bitola-Meliti 104 %	350	100	450	100		188,6	336,6	148,0	Prihvatljivo/uz korektivne dispečerske akcije	
	400 kV Blagoevgrad-Solun	400 kV Dubrovo-Solun 107 %	400	100	500	100		400	188,6	358,8	170,2	Nisko podešena zaštita na Dubrovo-Solun
	220 kV Prizren-Glogovac	220 kV Podgorica-V. Dejes 105 %	400	100	500	100		400	188,6	358,8	170,2	
GR->JIEL	Nema kritičnih ispada, dostignut limit + $P_{max}$ u Grčkoj		1 050	-100	950	100	850	-188,6	268,3	456,9	DP limit u Grčkoj	
JIEL->AL	200 kV Prizren-Glogovac	220 kV Podgorica-V. Dejes 101 %	150	200	350	50	300	95,2	199,4	104,2	Prihvatljivo/uz korektivne dispečerske akcije	
	200 kV Prizren-Glogovac	220 kV Podgorica-V. Dejes 111 %	200	200	400	50	350	95,2	229,3	134,1	Nije prihvatljivo	
	400 kV Elbasan-Kardia	220 kV Podgorica-V. Dejes 110 %	200	200	400	50	350	95,2	229,3	134,1	Nije prihvatljivo	
AL->JIEL	Nema kritičnih ispada, dostignut limit + $P_{max}$ u Albaniji		650	-200	450	50	400	-95,2	350,4	445,6	DP limit u Albaniji	

## Bilateralne vrednosti NTC u jugoistočnoj Evropi za zimski režim 2004. godine

Indikativne vrednosti za Neto Prenosni Kapacitet (NTC) u JI Evropi, zima 2004, radni dan, vršni sati (neobavezujuće vrednosti)			
NTC vrednosti su izračunate na osnovu UCTE referentnog modela za zimu 2004, posmatrajući odvojeno 1. i 2. UCTE sinhronu zonu			
Od:	Prema:	NTC (MW)	Izračunali:
Austrija	Italija	220	APG (AT) i GRTN (IT)
	Slovenija	/	/
	CENTREL (CZ+HU)	1 100	APG (AT)
	SUDEL (IT+SLO)	600	APG (AT)
	Mađarska	150	MAVIR (HU)
CENTREL (CZ+HU)	Austrija	400	APG (AT)
SUDEL (IT+SLO)	Austrija	bez realnog ograničenja	APG (AT)
Mađarska	Austrija	700	MAVIR (HU)
	Hrvatska	600	MAVIR (HU) i CROISMO (HR)
Italija	Austrija+Slovenija	bez realnog ograničenja	GRTN (IT)
Italija+Slovenija	Grčka	500	GRTN (IT) i HTSO (GR)
	Austrija	bez realnog ograničenja	GRTN (IT)
Slovenija	Italija	480	ELES (SLO) i GRTN (IT)
	Austrija	bez realnog ograničenja	ELES (SLO)
	Hrvatska	bez realnog ograničenja	CROISMO (HR) i ELES (SLO)
Hrvatska	Mađarska	300	CROISMO (HR) i MAVIR (HU)
	BiH (na 1 UCTE zoni)	400	CROISMO (HR) i ZEKC (BiH)
	JIEL blok*	500	EKC (SCG)
	Slovenija	bez realnog ograničenja	CROISMO (HR) i ELES (SLO)
JIEL blok*	Rumunija	1 000	EKC (SCG) i TEL (RO)
	Bugarska	500	EKC (SCG) i NEK (BG)
	Grčka	350	EKC (SCG)
	Albanija	300	EKC (SCG) i KESH (AL)
Rumunija	JIEL blok*	700	TEL (RO) i EKC (SCG)
	Bugarska	750	TEL (RO) i NEK (BG)
	JIEL blok*	1 000	TEL (RO)
Bugarska	JIEL blok*	1 050	NEK (BG) i EKC (SCG)
	Rumunija	700	NEK (BG) i TEL (RO)
	JIEL blok*	1 000	NEK (BG)
	Grčka	/	/
	Turska	/	/
Grčka	JIEL blok*	850	EKC (SCG)
	Bugarska	bez realnog ograničenja	NEK (BG)
	MK + BG + AL	600	HTSO (GR)
	Albanija	250	KESH (AL)
	Italija	330	HTSO (GR) i GRTN (IT)
Albanija	JIEL blok*	370	KESH (AL) i EKC (SCG)
	Grčka	250	KESH (AL)
JIEL blok*	Rumunija	1 350	TEL (RO)
MK + BG + AL	Grčka	500	HTSO (GR)
Turska	Bugarska	/	/
BiH (na 1 UCTE zoni)	Hrvatska	350	ZEKC (BiH) i CROISMO (HR)

\*JIEL blok\* – Srbija i Crna Gora, Makedonija, deo Bosne i Hercegovine u okviru 2. UCTE sinhronne zone (ERS)

korak, i trenutno ih razmenjuju svakog dana za sledeći dan u 10:30 h, uz dodatnu razmenu noćnog modela za sredu u 3:30 h, koja se vrši utorkom.

Ovde će ukratko biti opisani detalji DACF procedure čije su osnovne postavke opisane u dokumentu [20]. Opis je dat na primeru razmene modela utorkom za sredu u 10:30 h.

1. U utorak nakon zatvaranja voznih redova, svi „učesnici” naprave model svog sistema koji predstavlja prognoziranu situaciju za sutra - u sredu, u 10:30 h. Model treba da sadrži mrežu 400 i 220 kV, bez ekvivalenata, kao i delove mreža nižih napona (110, 120, 150 kV) tamo gde one imaju značajniji prenosni uticaj. Najčešći način pravljenja ovakvog modela je na bazi izabranog preseka stanja („snapshot”) iz prošlosti koji odgovara željenom prognoziranom momentu. Npr. na snapshot-u od ponedeljka u 10:30 h se izvrši promena angažovanja proizvodnih čvorova i promene topologije shodno planu za sredu u 10:30 h, modelovane potrošnje (uglavnom tokovi preko transformacija 400/x kV/kV i 220/x kV/kV) se prilagode tako da se uvaži novo prognozirano stanje konzuma i uticaj niženaponske mreže (kao što su promene angažovanja elektrana na 110 kV) tj. da se zadovolji jednačina:

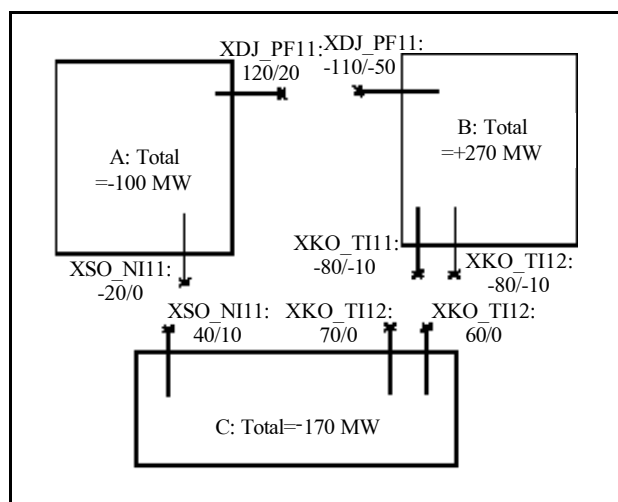
$$P_{potr.}(j) = P_{gen.}(i) + P_{razmene} + P_{gubici}$$

2. Modelovanje očekivanog uvoza/izvoza, odnosno balansa sistema se vrši tako što učesnik „preseče” sve povezne vodove sa drugim sistemima na njihovoj električnoj polovini i modeluje aktivna i reaktivna injektiranja u tim čvorovima (tzv.  $x$  - čvorovi), pri čemu zbir aktivnih injektiranja treba da odgovara ukupnom očekivanom totalu razmene između tretiranog i ostalih sistema, a u skladu sa voznim redovima. Ta injektiranja se grubo raspodele po  $x$ -čvorovima prema iskustvu, da bi se omogućilo da učesnik preliminarno propusti tokove snaga za svoj izolovani sistem, radi provere konvergencije i otkrivanja eventualnih grešaka. Iznosi ovih injektiranja nemaju uticaj na konačne tokove snaga, jer će ona pri spajanju sa modelima susednih sistema biti uklonjena. Lista imena  $x$ -čvorova je usaglašena među učesnicima da bi se omogućilo njihovo automatsko prepoznavanje u računarskom programu i povezivanje sistema u njima.
3. Svaki učesnik propusti tokove snaga za tako modelovan sopstveni sistem, proveri konvergenciju, otkrije i otkloni eventualne greške.
4. Takav model učesnik konvertuje u UCTE format za razmenu podataka i postavi ga na ftp<sup>1)</sup>-server

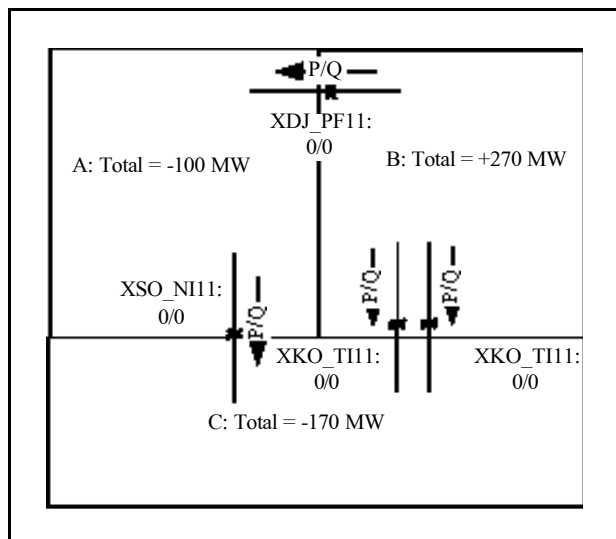
<sup>1)</sup> File Transfer Protocol

ETRANS-a najkasnije do 18:00 u utorak popodne. U Drugoj UCTE sinhronoj zoni ova razmena se obavlja elektronskom poštom, zbog trenutne nedostupnosti ftp-servera. Na taj način sve datoteke sa modelima postaju dostupne svim učesnicima na bazi reciprociteta.

5. Sada svaki učesnik preuzme modele svih ostalih sistema ili samo onih od uticaja na njegovu mrežu i poveže ih sa svojim sistemom, kao i susedne sisteme međusobno preko  $x$ -čvorova, istovremeno ukidajući injektiranja u njima.
6. Ako postoje sistemi koji ne učestvuju u DACF razmeni modela, a od uticaja su na sistem nekog učesnika, učesnik uzme poslednji dostupan model sistema ne-učesnika, prilagodi ga tako da zatvori njegov očekivani total (pomerajući proizvodnje i/ili potrošnje, u skladu sa dostupnim informacijama o tom sistemu), te onda i model sistema ne-učesnika spoji sa ostalima. Na taj način dobije se model čitave interkonekcije (odnosno dela interkonekcije od uticaja), za sutrašnju sredu u 10:30 h. Na slikama 5 i 6 prikazan je postupak formiranja modela na primeru interkonekcije od tri sistema.
7. Na modelu interkonekcije svaki učesnik proračuna tokove snaga i izvrši analizu sigurnosti, odnosno proveru  $n-1$  kriterijuma, najmanje za ispade elemenata u svom delu mreže, a poželjno i za ispade u drugim sistemima, koji su od uticaja na njegov sistem. Na taj način identifikuju se moguća zagušenja na osnovnom modelu ili pri proveru sigurnosti.
8. Rezultate proračuna, odnosno eventualna identifikovana zagušenja svaki učesnik pošalje na ftp-server (ili razmeni elektronskom poštom), najkasnije do 20:00 u utorak uveče.



Slika 5. Modeli tri sistema pre povezivanja, sa grubo raspoređenim programima razmena na  $x$ -čvorovima

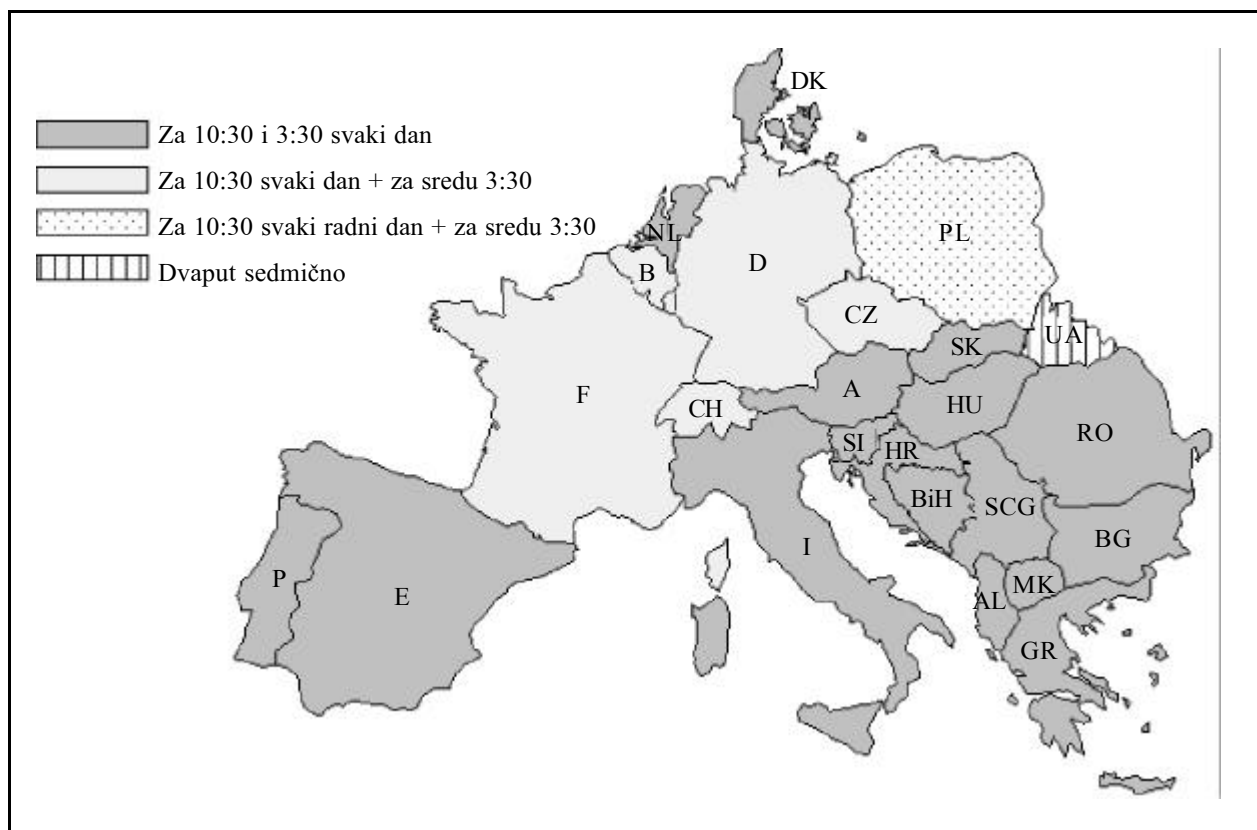


Slika 6. Model spojene interkonekcije nakon povezivanja, sa ukinutim injektiranjima u x-čvorovima (0/0). Interkonektivnim dalekovodima sada poteknu stvarni tokovi snaga (P/Q).

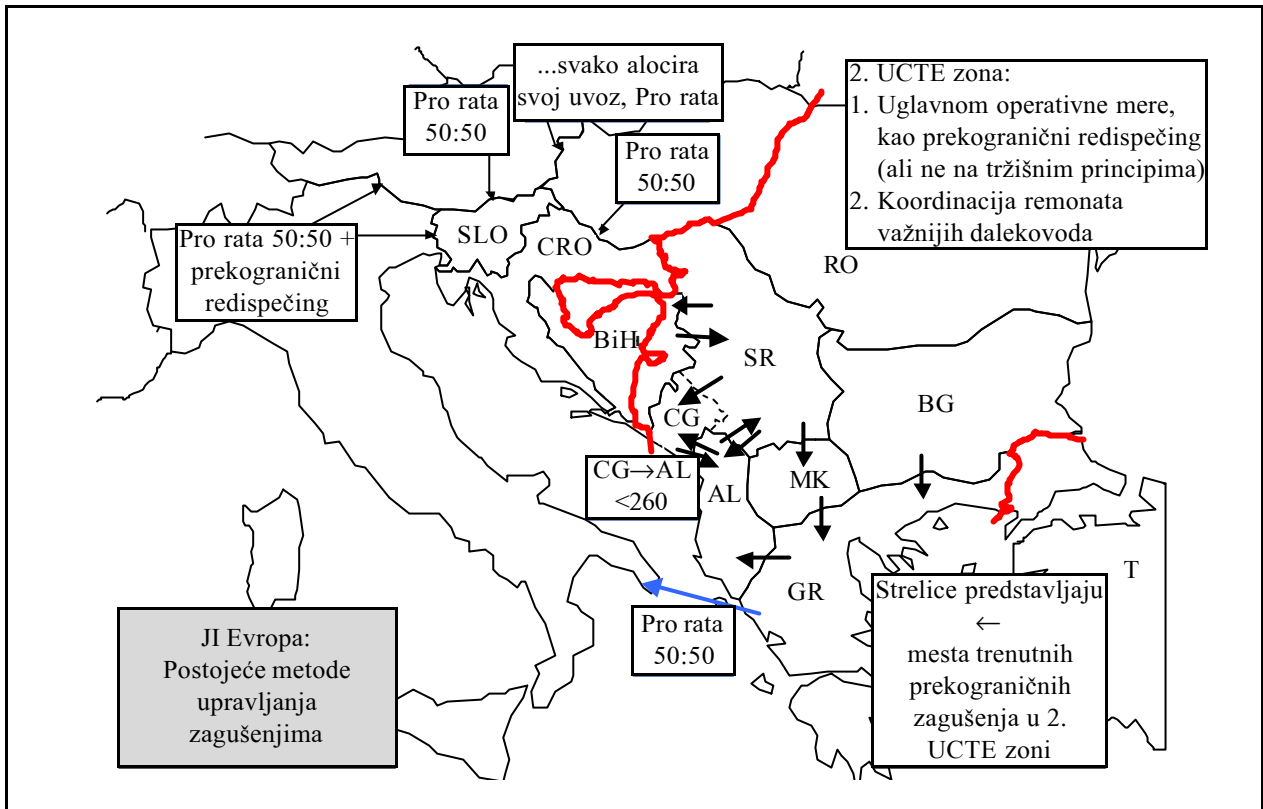
Verifikacija i razmena rezultata proračuna, kao poslednji korak DACF procedure je još uvek u razvoju kako u Prvoj, tako i u Drugoj UCTE sinhronoj zoni jer se rezultati proračuna ne razmenjuju re-

dovno, već se u slučaju otkrivanja pojedinih teških stanja, učesnici međusobno obaveštavaju. U Drugoj zoni, usled nerazvijenosti tržišta, čak i po otkrivanju zagušenja metodom DACF procedure, ne postoje adekvatni mehanizmi za njihovu eliminaciju i izbegavanje kritičnih stanja, pa se prepušta TSO u regionu da eventualno reaguju. Drugim rečima, nije razvijena obavezujuća procedura među TSO u interkonekciji, na osnovu koje bi se definisali mehanizmi delovanja učesnika u pravcu otklanjanja nesigurnosti otkrivenih u toku DACF proračuna. Takođe, pored uvođenja obavezujućih procedura u otklanjanju zagušenja, u narednom periodu potrebno je raditi i na konstantnoj proveru i poboljšanju prognoziranih modela, jer se često dešava u praksi da prognozirana stanja mreže i proračuni tokova snaga ne odgovaraju stvarnim, realizovanim vrednostima. Za ovu proveru se još uvek razvijaju kriterijumi koji bi pokazali valjanost prognoziranih DACF modela.

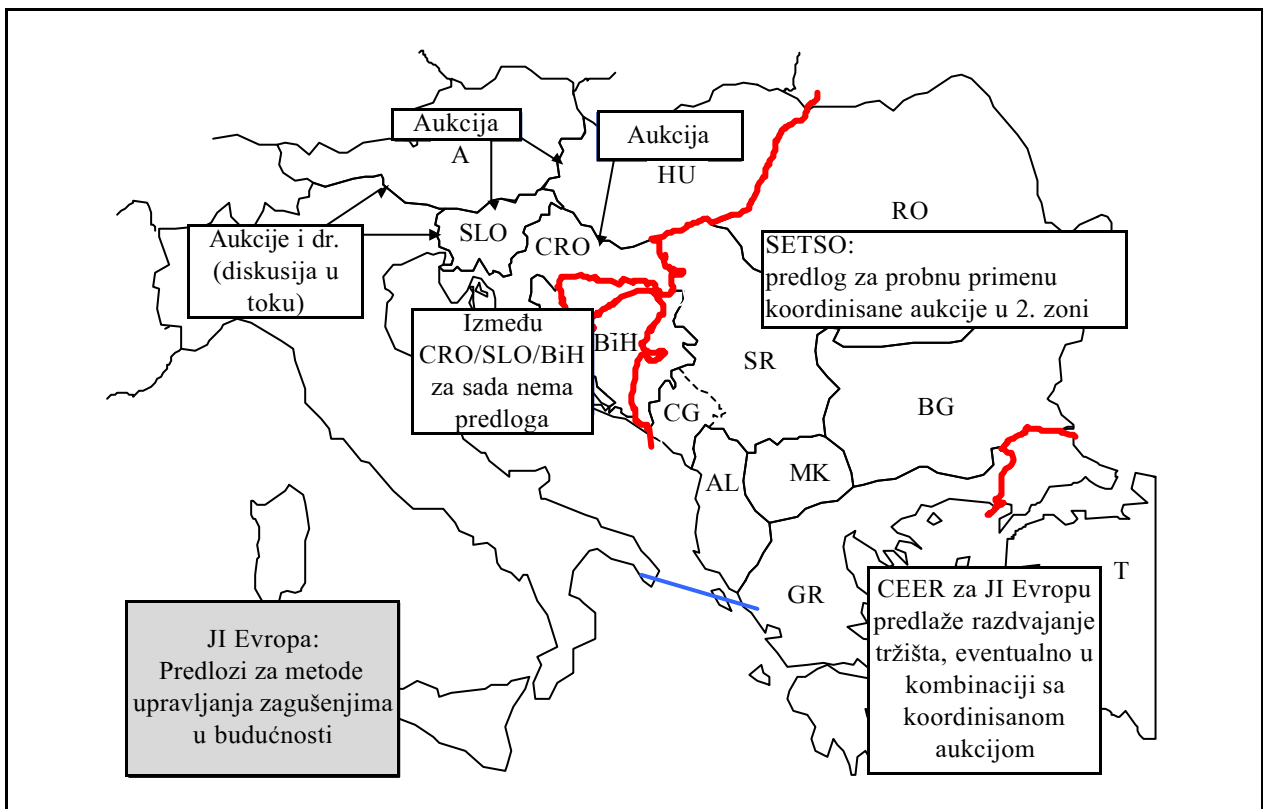
Na slici 7 prikazano je stanje razmene podataka DACF u zemljama Evrope u februaru 2004. godine. Imajući u vidu značaj sagledavanja mogućeg stanja prenosne mreže dan unapred, na području jugoistočne Evrope se značajno poboljšala razmena modela sa prognoziranom potrošnjom, proizvodnjom i topo-



Slika 7. Status primene DACF u zemljama Evrope, stanje u martu 2004. godine



Slika 8. Trenutno primenjivane metode alokacije kapaciteta/otklanjanja zagušenja u JI Evropi



Slika 9. Predlozi za metode koje bi se ubuduće primenjivale u regionu jugoistočne Evrope

logijom mreže. Tako su se podaci početkom 2003. godine razmenjivali samo za sredu u 10:30 h, od 1. oktobra 2003. godine je započeo proces razmene DACF modela za svaki radni dan u 10:30 h i sredu u 3:30 h, a od 1. januara 2004. godine za svaki dan u 10:30 h i sredu u 3:30 h.

Poslednji korak unapređenja DACF procedure u jugoistočnoj Evropi se realizuje od 1. marta 2004. godine, od kada je započeta svakodnevna razmena modela za 3:30 h i 10:30 h.

Tokom procesa razmene DACF modela i njegove primene u cilju određivanja potencijalnih zagušenja u prenosnoj mreži jugoistočne Evrope, prepoznat je problem tačnosti dobijenih modela i upotrebljivosti rezultata. Redovan postupak poboljšanja kvaliteta DACF modela je upoređivanje prognoziranih DACF modela i stvarnih realizovanih operativnih stanja (snapshot) kako bi se sagledale eventualne greške u prognoziranim modelima i dobijale što je moguće preciznije informacije o stanju u prenosnoj mreži dan unapred. Nameće se i potreba da svaki učesnik u DACF proceduri ima odgovarajući softverski paket prilagođen ovoj proceduri, a bilo bi poželjno i da svi učesnici imaju isti softver, u cilju dobijanja jednoznačnih rezultata i lakše razmene i provere modela.

Osim toga, potrebno je da sve zemlje Balkana ostvare pristup jedinstvenom ftp serveru radi odlaganja svojih modela i preuzimanja modela ostalih učesnika, što bi bila alternativa trenutnoj razmeni modela putem elektronske pošte.

#### **4. DALJI KORACI NA UVOĐENJU METODE ZA ALOKACIJU KAPACITETA U JUGOISTOČNOJ EVROPI**

U okviru jugoistočne Evrope započeo je proces izbora odgovarajuće metode za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži, pri čemu je težište dato na izbor metode alokacije prenosnih kapaciteta. Do sada su samo zemlje na obodu regiona (Austrija, Italija, Slovenija, Mađarska, Hrvatska) započele sa primenom neke od postojećih metoda, uglavnom alokacije NTC uz proporcionalno smanjivanje- „pro-rata” (Austrija-Italija, Austrija-Slovenija, Slovenija-Italija Mađarska-Hrvatska, kabl Italija-Grčka), pri čemu TSO dele NTC 50:50, pa svaki alocira polovinu vrednosti NTC. Na granici Austrije i Mađarske svaki TSO alocira svoj uvoz, i to takođe uz proporcionalno smanjivanje (slika 8).

Imajući u vidu dosadašnja iskustva zemalja zapadne i centralne Evrope, činjenicu da često korišćene metode raspregnute alokacije NTC na granicama pojedinih zemalja nisu do kraja ispratile de-

šavanja u okviru postojeće operativne prakse, kao i činjenicu da u zemljama jugoistočne Evrope uglavnom nije razvijeno zakonodavstvo u elektroenergetskom sektoru u skladu sa zakonodavstvom Evropske unije, polazi se od ideje da je bolje primeniti jednu od metoda koja predstavlja korak dalje u odnosu na te „bilateralne” metode, ali i zahteva veći stepen saradnje i harmonizacije. Naime, polazeći od činjenice da će sve zemlje jugoistočne Evrope paralelno razvijati sopstvena zakonska i tehnička pravila u okviru budućeg regionalnog tržišta, pošlo se od ideje da se zajednički izabere i razvije jedinstvena metoda kojom bi se otklonili nedostaci primećeni u okviru bilateralnih metoda. Zbog toga je izbor pao na razvoj i primenu ili *koordinisanih aukcija* ili na metodu *razdvajanja/spajanja tržišta*. Daljim proučavanjima postojećih metoda, a obuhvatajući specifičnosti regiona i sagledavajući postojeća zagušenja u mreži Balkana, uz tesnu saradnju stručnjaka iz TSO i regulatora, doneće se konačna odluka o metodi koja će se primenjivati u okviru regionalnog tržišta električne energije jugoistočne Evrope.

Savet evropskih regulatora za energetiku (CEER - Council of European Energy Regulators), kao telo koje okuplja regulatore Evropske unije, i elektroenergetski forum regulatora jugoistočne Evrope (SEEERF - South east Europe Electricity Regulatory Forum), kao rešenje za jugoistočnu Evropu predlažu primenu metode razdvajanja/spajanja tržišta eventualno u kombinaciji sa metodom koordinisanih aukcija. Međutim, poznavajući već pominjane osobine ovog regiona u smislu jake međupovezanosti sistema, organizacija Operatora sistema prenosa za jugoistočnu Evropu (Transmission System Operators South East European System SETSO TF)) je predložila da se istraže mogućnosti primene metode koordinisane aukcije. U toku su pripreme za projekat probne primene koordinisane aukcije prenosnih kapaciteta, koji bi u prvom trenutku obuhvatio zemlje sadašnje druge UCTE sinhronne zone (što je zbog nepovezanosti sa glavnim delom UCTE mreže jednostavnije za primenu). Na slici 9 prikazani su predlozi dobijeni od strane TSO za metode koje bi se ubuduće primenjivale u regionu jugoistočne Evrope.

#### **5. ZAKLJUČAK**

*Uvođenje otvorenog tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi i njegova priprema za uključivanje u evropsko tržište zahtevaju niz aktivnosti u cilju primene jedinstvene metode za upravljanje zagušenjima u prenosnoj mreži. Sagledavajući dosa-*

dašnje aktivnosti kroz trostepeni proces upravljanja zagušenjima u zemljama jugoistočne Evrope, može se zaključiti da je do sada sprovedena procedura za proračun NTC na sezonskom nivou između svih balkanskih zemalja, kao i razmena DACF na dnevnom nivou.

Proračunate vrednosti NTC za područje jugoistočne Evrope se usaglašavaju između TSO i počev od septembra 2003. godine u skladu sa ETSO procedurom, sezonski objavljuju na ETSO veb sajtu. Prve vrednosti objavljene na ovom veb sajtu vezane za ovaj region odnose se na usaglašene vrednosti NTC za letnji režim 2003. godine i za zimski režim 2004. godine.

Imajući u vidu značaj mogućnosti sagledavanja stanja prenosne mreže dan unapred, na području jugoistočne Evrope započeta je razmena modela mreže (DACF procedura), tako da se počev od 1. januara 2004. godine podaci razmenjuju za svaki dan u 10:30 h i sredu u 3:30 h, a od 1. marta 2004. godine svakodnevno za 3:30 h i 10:30 h. Na taj način procedura razmene DACF u okviru jugoistočne Evrope došla je na nivo koji je dostigao mali broj zemalja zapadne Evrope. Sledeći i najteži korak, koji je za sada neizvestan zbog tehnološke opremljenosti TSO (stanje SCADA, EMS i telekomunikacione opreme) je početak razmene DACF modela na satnom nivou, a u planu je i da se težište stavi na redovnu upotrebu razmenjivanih modela u proveru sigurnosti interkonekcije.

Dalje proučavanje mogućih metoda za alokaciju prenosnih kapaciteta u jugoistočnoj Evropi, određivanje postojećih zagušenja u prenosnoj mreži Balkana, kao i donošenje usaglašenih pravnih i organizacionih okvira u tesnoj saradnji TSO i regulatora, uticaće na pravilan izbor metode za alokaciju i njeno efikasno sprovođenje u praksi. Imajući u vidu dosadašnja saznanja i iskustvo koje postoji u zemljama zapadne Evrope, čini se da je potrebno napraviti izbor između metode koordinisanih aukcija i metode za razdvajanje/spajanje tržišta. Obe metode su pogodne zbog njihove mogućnosti da simultano alociraju prenosne kapacitete na svim granicama, a to je osobina koja se u mrežama sa jakom međupovezanošću (kakva je i mreža jugoistočne Evrope) nameće kao osnovni preduslov za efikasnost primene izabrane metode alokacije.

U svetlu izbora najpodesnije metode za upravljanje zagušenjima, u toku su pripreme za projekat probne primene metode koordinisane aukcije prenosnih kapaciteta, koji bi u prvom periodu obuhvatio zemlje sadašnje druge UCTE sinhronone zone.

## 6. LITERATURA

- [1] ETSO, EVALUATION OF CONGESTION MANAGEMENT METHODS FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION, November 1999
- [2] ETSO, RECONCILIATION OF MARKET SPLITTING WITH CO-ORDINATED AUCTION CONCEPTS, February 2002
- [3] ETSO, CO-ORDINATED AUCTIONING, A MARKET BASED METHOD FOR TRANSMISSION CAPACITY ALLOCATION IN MESHED NETWORKS, Final Report, April 2001
- [4] ETSO, CO-ORDINATED USE OF POWER EXCHANGES FOR CONGESTION MANAGEMENT (MARKET SPLITTING&MARKET COUPLING), April 2001
- [5] Branko i Vesna Stojković, DEREGULACIJA TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE - TEHNIČKI I PRAVNI ASPEKTI, EPCG, A.D. Nikšić, 2002. godine
- [6] S. Mijailović, Z. Vujasinović, M. Apostolović, PREGLED AKTUELNIH METODA ZA UPRAVLJANJE ZAGUŠENJIMA U EVROPI, Elektropriroda, 2004. godine, rad prihvaćen za objavljivanje
- [7] DEKLARACIJA O NAMERAMA ZA OSNIVANJE KONKURENTNOG REGIONALNOG TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE U JUGOISTOČNOJ EVROPI, septembar 1999. godine
- [8] Atinski memorandum o razumevanju, jun 2000. godine
- [9] MEMORANDUM O KREIRANJU REGIONALNOG TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE I NJEGOVOU UKLJUČIVANJU U INTERNO TRŽIŠTE EVROPSKE UNIJE, novembar 2002. godine
- [10] MEMORANDUM O KREIRANJU REGIONALNOG TRŽIŠTA ENERGIJE I NJEGOVOU UKLJUČIVANJU U INTERNO TRŽIŠTE EVROPSKE UNIJE, decembar 2003. godine
- [11] DIREKTIVA 96/92/EC O UNUTRAŠNEM TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE U EVROPSKOJ UNIJI, Brisel, 1996. godine
- [12] SETSO TASK FORCE, POSITION PAPER ON CONGESTION MANAGEMENT IN SOUTH-EASTERN EUROPE REGION, October 2003
- [13] ETSO, DEFINITIONS OF TRANSFER CAPACITIES IN LIBERALIZED ELECTRICITY MARKETS, Final Report, April 2001
- [14] ETSO, PROCEDURES FOR CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENTS, October 2001.
- [15] Z. Vujasinović, D. P. Popović, DOSADAŠNJA ISKUSTVA I NOVI ZAHTEVI KOD PROGNOZE ZAGUŠENJA I PRORAČUNA GRANIČNIH PRENOSNIH MOGUĆNOSTI U OKVIRU DRUGE UCTE SINHRONE ZONE, 11. simpozijum JUKO CIGRE, H. Novi, 2002. godine; časopis Elektropriroda, br. 3, 2002, str. 28-33.

- [16] P. Stančević, Z. Vujasinović, D. Pupovac, SIGURNOSNI KRITERIJUMI KOD PRORAČUNA PRENOSNIH MOGUĆNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, 11. simpozijum JUKO CIGRE, H. Novi, 2002. godine
- [17] Dragan P. Popović, Đorđe M. Dobrijević, (Nikola Tesla Institute), Snežana V. Mijailović, Zoran Ž. Vujasinović (Electricity Coordinating Center), AUTOMATIC CROSS-BORDER TRANSMISSION CAPACITY ASSESSMENT IN THE OPEN ELECTRICITY MARKET ENVIRONMENT, CIGRE, Paris France, 2004, rad prihvaćen za objavljivanje
- [18] 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
- [19] D. P. Popović, Đ. Dobrijević, N. Mijušković, D. Vlaisavljević, S. Mijailović, ANALYTICAL TOOLS FOR THE TRANSFER CAPABILITY EVALUATION OF BALKAN INTERCONNECTION, Paper 39.206, CIGRE, Paris, France, August 2000
- [20] UCTE WG Operation&Security, SG Network Models&Forecast Tools, LOAD FLOW AND CONGESTION FORECAST, 2003
- [21] Mladen Apostolović, Nešo Mijušković, ELIMINISANJE ZAGUŠENJA - ISKUSTVA NORDIJSKIH DRŽAVA, 26. Savetovanje JUKO CIGRE Banja Vrućica - Teslić 25.-30. maj 2003. godine
- [22] Z. Vujasinović, N. Filipović, MODELOVANJE I ANALIZA PRENOSNE MREŽE JUGOISTOČNE EVROPE KAO MODULI PROCESA UPRAVLJANJA ZAGUŠENJIMA, 26. savetovanje JUKO CIGRE Banja Vrućica - Teslić, maj 2003. godine

Rad je primljen u uredništvo 27. 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. Kopedresnik 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 razmenu 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. godine 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 je prvenstveni zadatak razvoj pomenutih aktivnosti u regionu jugoistočne Evrope. Uključen je u analize vezane za rekonekciju dveju UCTE sinhronnih 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 uklapanje hidroelektrana Buk Bijela i Srbinje u elektroenergetsku mrežu.

---

*Dragan S. Popović,  
Jugoslav K. Dujić i Selimir S. Kurešević*

# **Kombinovani algoritam za optimalnu rekonfiguraciju distributivnih mreža**

Originalni naučni rad  
UDK: 621.311.1; 621.316

---

*Rezime:*

*U ovom radu je opisan kombinovani algoritam za optimalnu rekonfiguraciju distributivnih mreža. Data je opšta postavka problema određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže i pregled metodologije za njeno rešavanje. Zatim su predstavljeni osnovni algoritmi za proračun optimalne konfiguracije: metod najmanjih struja i metod izmene grana. Nakon toga, predstavljen je kombinovani metod, kojim se kombinuju najbolje osobine oba osnovna postupka. Razmatranja su ilustrovana rezultatima dobijenim na realnoj distributivnoj mreži.*

**Ključne reči:** *rekonfiguracija distributivne mreže, metod najmanjih struja, metod izmene grana*

---

*Abstract:*

## **COMBINED ALGORITHM FOR OPTIMAL RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION NETWORKS**

*Combined algorithm for optimal reconfiguration of distribution networks is presented in this paper. The problem of determination of optimal configuration of distribution network is presented and an overview of methodologies for its solution is given. Basic algorithms for calculation of optimal configuration are presented: method of least currents and branch exchange method. Then, the combined method is developed and described, incorporating best characteristics of these basic methods. Considerations are supported by results obtained on a real distribution network.*

**Key words:** *reconfiguration of distribution networks, method of least currents, branch exchange method*

---

## **1. UVOD**

Rekonfiguracija distributivne mreže je jedna od najznačajnijih upravljačkih funkcija u planiranju pogona distributivnih mreža. Ova funkcija se sastoji u određivanju optimalne konfiguracije distributivne mreže, sa aspekta korisnički specificiranog optimizacionog kriterijuma. Pod konfiguracijom mreže se u ovom slučaju podrazumevaju statusi uključenosti rasklopnih uređaja, koji određuju topologiju u raz-

matranoj distributivnoj mreži. Rekonfiguracija distributivne mreže se uobičajeno vrši na godišnjoj ili sezonskoj osnovi. Međutim, s obzirom na to da opterećenje u distributivnoj mreži kontinualno varira, rekonfiguracija na godišnjoj ili sezonskoj osnovi često je suviše gruba i nedovoljna da bi se realizovali puni efekti ove upravljačke funkcije. Razvojem i primenom SCADA i distributivnog menadžment sistema otvara se široka osnova za primenu rekonfiguracije i u realnom vremenu.

---

*Dr Dragan S. Popović, Jugoslav K. Dujić, dipl. ing. Selimir S. Kurešević, dipl. ing.  
– Fakultet tehničkih nauka, 21 000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6*

Operativne performanse koje se rekonfiguracijom mogu optimizirati su: ekonomičnost, sigurnost, pouzdanost, kvalitet napona, itd. Izbor operativnih performansi može biti različit u zavisnosti od tipa mreže. Npr., uobičajeno je da se rekonfiguracija vrši radi smanjenja gubitaka aktivne snage. Međutim, ovakav vid rekonfiguracije je od posebnog interesa kod potencijalno upetljenih, teško opterećenih gradskih kablovskih mreža. Pod potencijalno upetljenim distributivnim mrežama se podrazumevaju mreže sa relativno mnogo potencijalnih bočnih veza za rezerviranje napajanja. Nasuprot tome, kod vangradskih distributivnih mreža koje pokrivaju široka geografska područja, velika je dužina izvoda, mala potencijalna upetljanost mreže i nisko opterećenje izvoda. Pored toga, takve vangradske mreže se prvenstveno realizuju vazдушnim vodovima čija je stopa ispada za red veličine veća nego kod kablovskih vodova. Kod takvih mreža je od primarnog interesa obezbediti konfiguraciju sa najvećom pouzdanošću i eventualno dobrim naponskim prilikama, dok su gubici aktivne snage u drugom planu. Konačno, i iste mreže mogu imati različite zahteve u zavisnosti od radnog režima (stepena opterećenosti, napona u prenosnoj mreži itd.). Pored toga, često je odgovarajućom raspodelom opterećenja po napojnim transformatorima i izvodima moguće odložiti investicije za ugradnju novih napojnih transformatora i izvoda. Zatim, raspodelom opterećenja moguće je ravnomernije raspodeliti rezervu u sistemu i na taj način povećati sigurnost pogona. Konačno, raspodelom važnih potrošača po transformatorima i izvodima je moguće minimizirati neisporučenu energiju važnim potrošačima.

U ovom radu je prvo data opšta postavka problema određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže i pregleda metodologije za njeno rešavanje. Zatim su specificirani optimizacioni kriterijumi koji se koriste pri rekonfiguraciji distributivne mreže i predstavljeni osnovni algoritmi za proračun optimalne konfiguracije mreže: metod najmanjih struja i metod izmene grana. Nakon toga, predstavljen je kombinovani metod, kojim se kombinuju najbolje osobine oba postupka. Konačno, primenom ovih algoritama rešen je problem optimalne rekonfiguracije u razmatranoj test mreži.

## 2. METODOLOGIJA ZA REKONFIGURACIJU

Problem određivanja optimalne konfiguracije je kompleksan, kombinatoran, nelinearan i diskretan optimizacioni problem. Pored toga, ovaj problem se značajno usložnjava ako se želi uvažavanje svih relevantnih tehničkih ograničenja i različitih optimizacionih kriterijuma. Konačno, u realnim primenama

ovaj problem je ogromnih dimenzija, što ga samim tim čini još kompleksnijim. Za rešenje ovog problema se primenjuju tri grupe metoda [1]:

1. Optimizacione metode [1,2],
2. Kombinatorno pretraživanje [1,4,7,8],
3. Heurističke metode [1–6,9–14].

Optimizacione procedure, koje bi potpuno odgovarale prirodi problema rekonfiguracije mreže, teško je egzaktno primeniti pod realnim uslovima. Nelinearnost i diskretna priroda problema, kao i njegova velika dimenzionalnost izuzetno sužavaju izbor optimizacionih procedura. Za realne distributivne mreže, koje su izuzetno velikih dimenzija (i do više desetina hiljada čvorova), izvršavanje jednog optimizacionog algoritma može trajati i po nekoliko meseci. Dalje, čest je slučaj da različite optimizacione procedure uopšte ne konvergiraju. Konačno, nije moguće uvažiti sva relevantna ograničenja. Kao posledica ovoga ne postoji adekvatni optimizacioni algoritam koji se pokazao kao uspešan u problemu rekonfiguracije mreže.

Kombinatorno pretraživanje svih mogućih konfiguracija je veoma zahtevno u pogledu vremena i memorije. Naime, moguće konfiguracije mreže određene su svim mogućim kombinacijama svih statusa  $n$  rasklopnih uređaja u mreži i iznose  $2^n$ . Za realne distributivne mreže (sa oko 1 000 i više rasklopnih uređaja) ovakve analize bi trajale nekoliko godina, čak i uz upotrebu najmodernijih računara. Međutim, većina teoretski mogućih konfiguracija mreže, nema fizičkog smisla. Npr. sve konfiguracije u kojima svi potrošači nisu napajani, ili povezanost u mreži nije radijalna, ili u kojoj su narušena strujna ili naponska ograničenja, nisu od interesa.

Iz ovih razloga se u praksi najčešće koriste heuristički algoritmi. Suština ovih algoritama je da se maksimalnim poznavanjem fizike problema na najkraći način dođe do kvalitetnih radijalnih konfiguracija. Heuristički algoritmi se mogu podeliti u dve velike grupe:

1. Algoritmi „najmanjih struja” [1,2,6],
2. Algoritmi „izmene grana” [3–5].

Algoritam „najmanjih struja” je jedan od najstarijih i najčešće korišćenih algoritama za određivanje optimalne rekonfiguracije. Suština ovog algoritma je da se ciljna radijalna konfiguracija određuje iz upetljane mreže u kojoj je simulirano zatvaranje svih normalno otvorenih (NO) rasklopnih uređaja. U tako upetljanoj mreži se simulira sekvencijalno otvaranje rasklopnih uređaja (jedan po jedan) u granama sa najmanjom strujom, sve dok se ne dostigne radijalna konfiguracija mreže. Ovaj algoritam je izvorno definisan za određivanje optimalne konfiguracije mreže sa aspekta minimalnih gubitaka aktivne snage. Međutim, primenom različitih modifikacija

na model mreže, on se može koristiti i za optimizaciju debalansa opterećenja, napona i pouzdanosti napajanja. Pored toga, algoritam daje globalni optimum, bez obzira na početnu tačku. Nedostatak ovog algoritma je njegovo dugo vreme obrade na velikim mrežama, ali s obzirom da se rekonfiguracija mreže ne vrši često, kao i na efikasnost savremenih računara, ovaj nedostatak nije od velikog značaja. Veći nedostatak je što ovaj algoritam kao izlaz ne daje manipulacije sortirane po efektivnosti, kao i što nije moguće kombinovati kriterijume za ocenu performansi radijalne konfiguracije.

Algoritam „izmene grana” je baziran na aproksimativnim relacijama koje procenjuju promenu vrednosti kriterijumske funkcije kada dva rasklopna uređaja, jedan normalno otvoren i jedan normalno zatvoren (NZ) rasklopni uređaj, promene statuse uključenosti. Osnovna prednost ovog algoritma leži u njegovoj efikasnosti koja je bazirana na činjenici da nije potrebno računati celokupni režim nakon promene statusa uključenosti razmatranog para rasklopnih uređaja. Pored toga, algoritam izmene grana se vrlo jednostavno primenjuje za bilo koji od optimizacionih kriterijuma [16]. Osnovni nedostatak ovih algoritama je da se njihovom primenom dobija konačno rešenje koje zavisi od početnog rešenja, odnosno kao rešenje se dobija lokalni minimum.

U praksi, prilikom rekonfiguracije distributivne mreže, koja se obično vrši na sezonskom nivou, ali su mogući i češći intervali, nije uvek zahtevan pogon sa punom optimalnom konfiguracijom. Za praktične potrebe dovoljno je da je konfiguracija mreže „dovoljno dobra” sa aspekta zadatih kriterijuma, ali tako da se iz postojeće konfiguracije u takvu „dovoljno dobru” može preći sa malim brojem manipulacija rasklopnom opremom. Drugim rečima, jedan od zahteva koji se postavlja pred algoritam rekonfiguracije je da kao rezultat da listu manipulacija sortiranu po benefitu koji donose, tako da korisnik iz liste može odabrati samo one koje „u dovoljnoj meri” doprinose poboljšanju postojećeg pogona. Algoritam izmene grana ima dobru osobinu da kao izlaz daje optimalan redosled (sortiranu listu) manipulacija, dok to nije slučaj s algoritmom najmanjih struja (koji startuje iz upetljane mreže).

U rekonfiguraciji distributivne mreže koriste se sledećih šest optimizacionih kriterijuma:

1. Minimalni gubici aktivne snage,
2. Debalans opterećenja na VN/SN transformatorima,
3. Debalans opterećenja na izvodima,
4. Kritični pad napona,
5. Pouzdanost napajanja,
6. Troškovi manipulacija. Ovaj kriterijum ima smisla samo kada se kombinuje sa nekim od prethod-

nih, sa ciljem da se dobije „dovoljno dobra” konfiguracija u odnosu na kriterijume (1-5), ali da se pri tom minimiziraju troškovi (broj) manipulacija rasklopnom opremom.

U narednoj tački su detaljno predstavljani svi navedeni kriterijumi.

### 3. KRITERIJUMI ZA OCENU PERFORMANSI RADIJALNE KONFIGURACIJE

Globalne performanse jedne radijalne konfiguracije mreže se ocenjuju na osnovu sledećih kriterijuma.

#### 1. Minimalni gubici aktivne snage

Gubici aktivne snage u ( $h$ )-toj radijalnoj konfiguraciji definisani su relacijom (1):

$$IL^{(h)} = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^{n_{FS_i}^{(h)}} 3r_{ij} (J_{ij}^{(h)})^2, \quad (1)$$

gde je:

$r_{ij}$  – otpor ( $j$ )-te sekcije koja pripada ( $i$ )-tom izvodu,

$n_F$  – ukupan broj izvoda,

$n_{FS_i}^{(h)}$  – ukupan broj sekcija ( $i$ )-tog izvoda u ( $h$ )-toj radijalnoj konfiguraciji,

$J_{ij}^{(h)}$  – aktuelna struja ( $i$ )-te sekcije, ( $j$ )-tog izvoda u ( $h$ )-toj radijalnoj konfiguraciji, respektivno.

Gornja relacija predstavlja ukupne gubitke aktivne snage u razmatranoj mreži. Niža vrednost ovog kriterijuma znači manje gubitke aktivne snage, a samim tim i ekonomičniji pogon.

#### 2. Debalans opterećenja na VN/SN transformatorima

Debalans opterećenja na VN/SN transformatorima u ( $h$ )-toj radijalnoj konfiguraciji definisan je relacijom (2):

$$IT^{(h)} = \frac{1}{n_{TR}} \sum_{i=1}^{n_{TR}} \frac{S_{TR_i}^{(h)}}{S_{TR_i}^n} \left| \sum_{j=1}^{n_{TR}} \frac{S_{TR_j}^{(h)}}{S_{TR_m}^n} \right|, \quad (2)$$

gde je:

$n_{TR}$  – broj napojnih transformatora,

$S_{TR_i}^n, S_{TR_i}^{(h)}$  – nominalna i aktuelna snaga ( $i$ )-tog VN/SN transformatora u ( $h$ )-toj radijalnoj konfiguraciji, respektivno.

Gornja relacija predstavlja sumu odstupanja relativnog opterećenja pojedinačnih VN/SN transfor-

matora od srednjeg opterećenja svih VN/SN transformatora. Niža vrednost IT indeksa ukazuje na bolji debalans opterećenja po napojnim transformatorima, pa je stoga sigurnost pogona veća.

### 3. Debalans opterećenja na izvodima

Debalans opterećenja na izvodima u  $(h)$ -toj radialnoj konfiguraciji je definisan relacijom (3):

$$IF^{(h)} = \frac{1}{n_F} \sum_{i=1}^{n_F} \frac{J_{F_i}^{(h)}}{J_{F_i}^n} \left| \frac{\sum_{j=1}^{n_F} J_{F_j}^{(h)}}{\sum_{m=1}^{n_F} J_{F_m}^n} \right|, \quad (3)$$

gde je:

$n_F$  – ukupan broj izvoda,

$J_{F_i}^n, J_{F_i}^{(h)}$  – nominalna i aktuelna struja  $(i)$ -tog izvoda u  $(h)$ -toj radialnoj konfiguraciji, respektivno.

Gornja relacija je definisana kao suma odstupanja relativnog opterećenja pojedinačnih izvoda od srednje vrednosti opterećenja svih izvoda. Niža vrednost indeksa pokazuje da opterećenja pojedinačnih izvoda manje odstupaju od srednje vrednosti opterećenja svih izvoda u mreži. U tom slučaju, bolji je debalans između izvoda, bolja raspodela rezerve u mreži, pa je i pogon sigurniji.

### 4. Kritični pad napona

Kritični pad napona u  $(h)$ -toj radialnoj konfiguraciji je definisan sledećom relacijom:

$$IV^{(h)} = \max_{\substack{i=1, n_F; \\ k=1, n_{FT_i}^{(h)}}} \frac{V_{r,i}^{(h)} - V_{ik}^{(h)}}{V_{r,i}^{(h)}}, \quad (4)$$

gde je:

$n_{FT_i}^{(h)}$  – broj distributivnih transformatora na  $(i)$ -tom izvodu za  $(h)$ -tu varijantu,

$V_{r,i}^{(h)}$  – napon korena (SN napojnih sabirnica)  $(i)$ -tog izvoda u  $(h)$ -toj varijanti,

$V_{ik}^{(h)}$  – aktuelni napon  $(k)$ -tog distributivnog transformatora na  $(i)$ -tom izvodu u  $(h)$ -toj varijanti.

Gornji indeks je definisan kao vrednost maksimalnog relativnog pada napona između korena i jednog distributivnog transformatora. Manje vrednosti indeksa IV označavaju manji pad napona, odnosno kvalitetnije naponske prilike.

### 5. Pouzdanost napajanja

Pouzdanost napajanja u  $(h)$ -toj radialnoj konfiguraciji je definisana relacijom (5):

$$ENS^{(h)} = \sum_{j=1}^{N_{cv}} P_j^{(h)} \sum_{i=1}^{n_F} T_{ji}^{(h)}, \quad (5)$$

gde je:

$ENS^{(h)}$  – očekivana godišnja neisporučena energija u  $(h)$ -toj konfiguraciji,

$P_j^{(h)}$  – prosečna godišnja aktivna snaga potrošnje  $(j)$ -tog čvora u  $(h)$ -toj konfiguraciji,

$T_{ji}^{(h)}$  – trajanje otkaza  $(j)$ -tog čvora, usled otkaza  $(i)$ -te grane u  $(h)$ -toj konfiguraciji,

$D_j^{(h)}$  – skup indeksa grana koje se nalaze na izvodu kom pripada  $(j)$ -ti čvor u  $(h)$ -toj konfiguraciji,

$N_{cv}^{(h)}$  – broj potrošačkih čvorova u mreži,

$I_{i,ekv}^{(h)}$  – ekvivalentni intenzitet otkaza  $(i)$ -te grane, u  $(h)$ -toj konfiguraciji [15].

Gornja relacija predstavlja očekivanu vrednost godišnje neisporučene energije. Niža vrednost ENS indeksa ukazuje na niže vrednosti očekivane neisporučene energije, što dalje znači veću pouzdanost. Ovo je najopštiji kriterijum.

Kada se trajanje svih otkaza izjednači prema relaciji (6):

$$T_{ji}^{(h)} = 1, \quad \text{za } i = 1, \dots, n_F; j = 1, \dots, n_{FT_i}; k = 1, \dots, n_{FT_i}, \quad (6)$$

tada relacija (5) daje očekivanu godišnju neisporučenu snagu.

Konačno, ukoliko se sve godišnje potrošnje izjednače prema relaciji (7):

$$P_j^{(h)} = 1, \quad \text{za } i = 1, n_F; k = 1, n_{FT_i}, \quad (7)$$

tada relacija (5) daje očekivanu godišnju stopu otkaza.

### 6. Troškovi manipulacija

Troškovi manipulacija za prelazak u  $(h)$ -tu radialnu konfiguraciju su definisani relacijom (8):

$$IC^{(h)} = \sum_{i=1}^{n_F} c_i, \quad (8)$$

gde su:

$c_i$  – troškovi  $(i)$ -te manipulacije,

$a_c^{(h)}$  – skup neophodnih manipulacija za prelazak u  $(h)$ -tu radialnu konfiguraciju.

Gornja relacija predstavlja sumu fiktivnih troškova manipulacija. Uvođenjem ovih fiktivnih troškova, moguće je potencirati samo manipulacije sa određenim rasklopnim uređajima (tj. daljinski kontrolisanim opremom). Niža vrednosti indeksa IC implicite indicira manje vreme potrebno za realiza-

ciju željene radijalne konfiguracije, stoga je manji i iznos neisporučene energije.

#### **Integralni kriterijum**

Konačno, kriterijumsku funkciju je moguće formulisati i kao sumu ponderisane kombinacije gore navedenih kriterijuma. Integralna kriterijumska funkcija je definisana relacijom (9), [16]:

$$I^{(h)} = p_1 IL^{(h)} + p_2 IT^{(h)} + p_3 IF^{(h)} + p_4 IV^{(h)} + p_5 ENS^{(h)} + p_6 IC^{(h)}, \quad (9)$$

gde su:

$p_i$  za  $i=1, \dots, 6$ , korisnički definisani težinski faktori.

### **4. ALGORITMI ZA OPTIMALNU REKONFIGURACIJU**

#### **4.1. Algoritam „najmanjih struja”**

Algoritam „najmanjih struja” se koristi za određivanje konfiguracije distributivne mreže sa najmanjim gubicima aktivne snage. Glavna ideja ovog algoritma je da se pogon mreže sa najboljim performansama ostvaruje u slučaju kada je „sav bakar upotrebljen”, tj. kada su svi vodovi u potencijalno upetljanoj distributivnoj mreži pod naponom. U tom slučaju, gubici su minimalni, naponi su najviši itd. Međutim, poznato je da je trajan upetljan pogon u distributivnoj mreži zabranjen. Stoga je neophodno odrediti koje rasklopne uređaje u mreži treba otvoriti tako da konfiguracija postane radijalna, a da se performanse pogona mreže najmanje degradiraju u odnosu na optimalnu upetljanu mrežu. Odgovor je jednostavan: potrebno je otvoriti rasklopne uređaje u granama u kojima je najmanja vrednost struje. Na ovaj način, radijalizacijom mreže se „najmanje bakra” stavlja van pogona, a postignuta je konfiguracija koja je „najsličnija” početnoj optimalnoj upetljanoj konfiguraciji.

Algoritam se sastoji od sledećih koraka:

1. Inicijalizacija algoritma (učitavanje svih potrebnih podataka).
2. Simulacija zatvaranja svih NO rasklopnih uređaja, čime se dobija maksimalno moguća upetljana mreža.
3. U tako dobijenoj upetljanoj mreži vrši se proračun tokova snaga.
4. Na osnovu rezultata proračuna pronalazi se grana sa najmanjom strujom i u toj grani se otvara rasklopni uređaj.
5. Zatim se ponovo vrši proračun tokova snaga nad tako dobijenom novom konfiguracijom mreže.
  - a. Ukoliko nema prekoračenja (strujnih i naponskih), dobijeni rasklopni uređaj se proglašava optimalnim, „zaključava” se (odnosno, pamti se kao optimalan i izbacuje iz daljeg razmatranja) i po-

novo se prelazi na korak 3, radi traženja novog optimalnog NO uređaja. Algoritam se zaustavlja kada je dostignuta radijalna konfiguracija.

- b. Ukoliko postoje prekoračenja, dobijeni uređaj se ostavlja zatvorenim, „zaključava se” i prelazi se na korak 4, radi pronalazačenja drugog rasklopnog uređaja za otvaranje (koji neće prouzrokovati prekoračenja).

Ovaj opšti algoritam je isti, bez obzira na to koji kriterijum se koristi kao osnova za optimizaciju. Modifikacije algoritma se, pre svega, odražavaju u načinu proračuna tokova snaga:

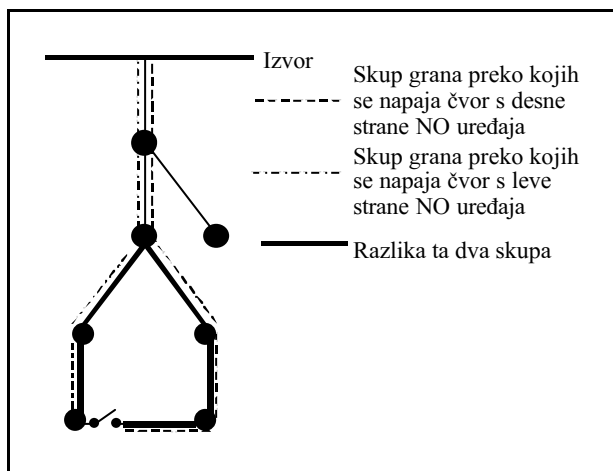
1. Pri određivanju konfiguracije sa najmanjim gubicima aktivne snage, svi vodovi i transformatori u mreži se predstavljaju samo svojim rezistansama.
2. U slučaju kada se određuje konfiguracija mreže sa najboljim naponima, svi vodovi i transformatori se predstavljaju svojim impedansama.
3. U slučaju kada se određuje konfiguracija mreže sa aspekta balansa, grane mreže se smatraju bezimpedantnim (kratke veze). Pošto je tada rešenje problema tokova snaga u upetljanoj mreži neodređeno, dodatno se rešava kvadratni optimizacioni problem tako da se od svih rešenja (u kojima je zadovoljen I Kirhofov (Kirchhoff) zakon, dok se II i ne razmatra, jer je automatski zadovoljen) odabere ono u kojima je kriterijum balansa opterećenja (izvoda, transformatora, ili njihove kombinacije) najbolji. Tako dobijene struje po granama predstavljaju ulaz u naredni korak algoritma.
4. Konačno, u slučaju kada se određuje konfiguracija mreže sa najvećom pouzdanošću, onda se svi vodovi i transformatori predstavljaju svojim intenzitetima otkaza.

#### **4.2. Algoritam „izmene grana”**

Algoritam „izmene grana” se koristi za to da se na brz i jednostavan način ispituju promene vrednosti zadate kriterijumske funkcije usled promene lokacije NO rasklopnih uređaja u mreži. Tačnije, u ovom algoritmu se simulira „izmena mesta” NO rasklopnog uređaja i sa njim spregnutog NZ rasklopnog uređaja. Pod spregnutim rasklopnim uređajima se podrazumeva onaj par NZ rasklopnog uređaja i NO rasklopnog uređaja čijom se izmenom mesta zadržava napajanje svih čvorova u mreži. Ova promena se proračunava na bazi jednostavne relacije u kojoj figurišu samo vrednosti iz baznog režima mreže. Na ovaj način, izbegava se potreba za proračunom kompletnog režima za novu konfiguraciju mreže, koja nastaje u tom slučaju. U okviru algoritma moguće je ispitati da li su svi NO rasklopni uređaji na optimalnim pozicijama. Ovaj postupak „izmene” se vrši sve

dok se tim izmenama postiže poboljšanje kriterijumske funkcije.

1. Algoritam startuje inicijalizacijom postupka.
  2. Bira se NO rasklopni uređaj koji se obrađuje. Ukoliko (više) ne postoji nijedan NO uređaj, proračun je završen i dobijena je optimalna konfiguracija.
  3. Za odabrani NO rasklopni uređaj, proračunava se kriterijumska funkcija za svaki sa njim spregnuti NZ rasklopni uređaj.
    - a. Ukoliko se pronađe barem jedan NZ rasklopni uređaj za koji se dobija poboljšanje kriterijumske funkcije prelazi se na četvrti korak algoritma. NZ uređaj za koji se dobija najveće poboljšanje kriterijumske funkcije se pamti.
    - b. U suprotnom se prelazi na izbor sledećeg NO rasklopnog uređaja (korak 2).
- Tačniji, ali sporiji proračun se dobija ako se koraci 2-3 ponove za svaki postojeći NO uređaj. U tom slučaju, kao rezultat ovog koraka dobija se **par** NO i NZ uređaja za koji je priraštaj kriterijumske funkcije maksimalan. Ova modifikacija ima pogodnost da se kao rezultat dobija sortirani spisak manipulacija, tako da prve manipulacije u listi daju najveće poboljšanje, dok je popravka kriterijuma sa onim na kraju liste marginalna.
4. Vršiti se izmena mesta pronađenih uređaja, tj. NZ rasklopni uređaj pronađen u prethodnom koraku se otvara i „zaključava” (izbacuje iz daljeg razmatranja), dok se odgovarajući NO uređaj zatvara (ali ne zaključava).
  5. S obzirom na to da je topologija mreže tim operacijama promenjena, vrši se prenumeracija čvorova i grana mreže, kako bi odslikala novodobijenu konfiguraciju.



Slika 1. Skup grana u koje je dozvoljeno pomeriti NO rasklopni uređaj

6. U šestom koraku algoritma vrši se proračun toka i snaga za novodobijenu radijalnu konfiguraciju prema algoritmu izloženom u glavi 2.

Ovde je potrebno napomenuti da postoje izvesna ograničenja kada se bira smer pomeranja NO rasklopnog uređaja. NO rasklopni uređaj se pomera duž određenog pravca sve dokle god se tim pomeranjem ostvaruje poboljšanje kriterijumske funkcije, ili dok se ne nađe na drugi NO rasklopni uređaj. Takođe, nije dozvoljeno pomeranje NO rasklopnog uređaja koje bi dovelo do prestanka napajanja dela mreže. Skup grana u koje je dozvoljeno pomeriti NO rasklopni uređaj jednak je razlici (striktnije rečeno, uniji razlika) skupova grana preko kojih se napajaju čvorovi koji se nalaze na dvema stranama NO uređaja u radijalnoj mreži, slika 1.

Generalno, algoritam izmene grana za rekonfiguraciju distributivnih mreža se koristi za sledećih šest kriterijuma:

$$IL^{(h)} \quad IL^{(h-1)} \quad IL, \quad (10)$$

$$IT^{(h)} \quad IT^{(h-1)} \quad IT, \quad (11)$$

$$IF^{(h)} \quad IF^{(h-1)} \quad IF, \quad (12)$$

$$IV^{(h)} \quad IV^{(h-1)} \quad IV, \quad (13)$$

$$ENS^{(h)} \quad ENS^{(h-1)} \quad ENS, \quad (14)$$

$$IC^{(h)} \quad IC^{(h-1)} \quad IC, \quad (15)$$

gde je:

$IL^{(h-1)}, IL^{(h)}$  – vrednost kriterijuma za minimizaciju gubitaka aktivne snage u  $(h-1)$ , odnosno  $(h)$  konfiguraciji, respektivno,

$IT^{(h-1)}, IT^{(h)}$  – vrednost kriterijuma ravnomerne raspodele opterećenja po napojnim transformatorima u  $(h-1)$ , odnosno  $(h)$  konfiguraciji, respektivno,

$IF^{(h-1)}, IF^{(h)}$  – vrednost kriterijuma ravnomerne raspodele opterećenja po izvodima u  $(h-1)$ , odnosno  $(h)$  konfiguraciji, respektivno,

$IV^{(h-1)}, IV^{(h)}$  – vrednost kriterijuma kritičnog pada napona u  $(h-1)$ , odnosno  $(h)$  konfiguraciji, respektivno,

$ENS^{(h-1)}, ENS^{(h)}$  – vrednost kriterijuma pouzdanosti napajanja u  $(h-1)$ , odnosno  $(h)$  konfiguraciji, respektivno,

$IC^{(h-1)}, IC^{(h)}$  – vrednost kriterijuma troškova manipulacije u  $(h-1)$ , odnosno  $(h)$  konfiguraciji, respektivno.

Superskriptom „ $(h)$ ” je označena konfiguracija nakon „izmene” mesta NO rasklopnog uređaja i NZ rasklopnog uređaja, a superskriptom „ $(h-1)$ ” je označena konfiguracija pre „izmene” mesta NO rasklopnog uređaja i NZ rasklopnog uređaja. Promena vrednosti odgovarajuće veličine označena je sa  $\Delta$ .

Opšti primer primene aproksimativne relacije za procenu efekata „izmene mesta” rasklopnih uređaja predstavljen je na slici 2. Grana između čvorova  $(n)$  i  $(k)$  je inicijalno otvorena, jer se u njoj nalazi jedan NO rasklopni uređaj (na slici 2 označen sa NO1) pa se čvor  $(n)$  napaja sa napojnog transformatora na slici 2 označenog sa  $TR_r$ . Alternativno rešenje koje treba ispitati je otvaranje grane između čvorova  $(n)$  i  $(p)$ , otvaranjem NZ rasklopnog uređaja u toj grani (na slici 2 označen sa NZ1), a zatvaranje grane između čvorova  $(n)$  i  $(k)$ , tako da se čvor  $(n)$  sada napaja sa napojnog transformatora na slici 2 označenog sa  $TR_i$  (odnosno, zatvaranje NO rasklopnog uređaja označenog na slici 2 sa NO1).

Na slici 2 se uočavaju dva napojna transformatora VN/SN označeni sa  $TR_i$  i  $TR_r$ , TS SN/NN su predstavljene kvadratićima popunjenim sivom bojom. Sa  $(j), (k), (n), (p)$  i  $(q)$  su označeni čvorovi, koji predstavljaju SN sabirnice u TS SN/NN. Belim kružićem je predstavljen NO rasklopni uređaj, na slici je označen sa NO1, a crnim kružićem NZ rasklopni uređaj, na slici je označen sa NZ1.

Strelicom je označen smer „izmene mesta” NO rasklopnog uređaja (NO1) i NZ rasklopnog uređaja (NZ1). Na slici su korišćene sledeće oznake:

$J_{TR_r}^{(h-1)}, J_{TR_r}^{(h)}$  – ukupno strujno opterećenje napajano sa napojnih transformatora  $TR_i$  odnosno  $TR_r$ , u  $(h-1)$  konfiguraciji, respektivno,

$V_{TR_r}^{(h-1)}, V_{TR_r}^{(h)}$  – napon na napojnim transformatorima  $TR_i$  i  $TR_r$ , u  $(h-1)$  konfiguraciji, respektivno,

$J_n^{(h-1)}$  – ukupna kompleksna struja opterećenja napajana preko grane  $(n)$ , u  $(h-1)$  konfiguraciji,

$J_{F_j}^{(h-1)}$  – ukupno strujno opterećenje izvoda  $(j)$  napajano sa transformatora  $TR_i$ , u  $(h-1)$  konfiguraciji,

$J_{F_q}^{(h-1)}$  – ukupno strujno opterećenje izvoda  $(q)$  napajano sa transformatora  $TR_r$ , u  $(h-1)$  konfiguraciji.

U nastavku su predstavljene aproksimativne relacije za svih šest kriterijuma.

### 1. Minimum gubitaka aktivne snage

Aproksimativna relacija za procenu efekata „izmene mesta” para NO rasklopnih uređaja i spregnutih NZ rasklopnih uređaja na ukupne gubitke aktivne snage, prezentovana u [4], je:

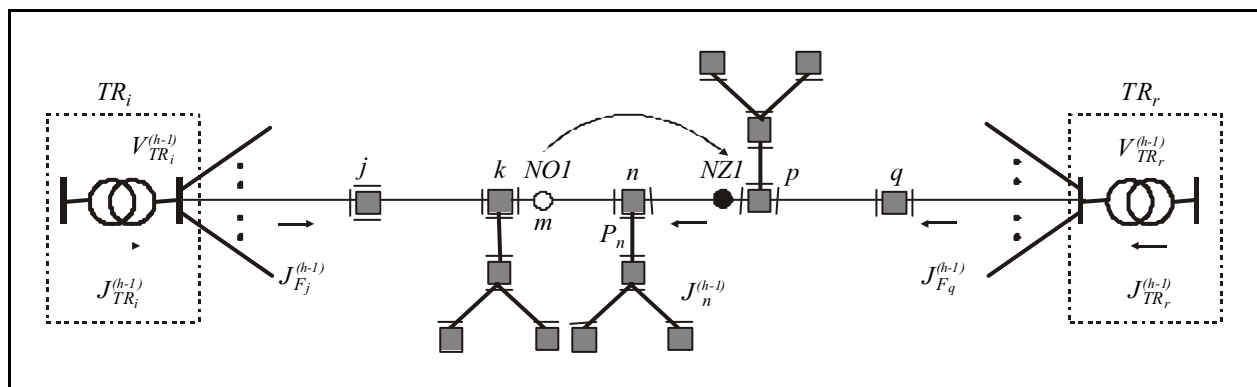
$$IL \approx 2 \operatorname{Re}[(J_n^{(h-1)})^* (V_n^{(h-1)} - V_k^{(h-1)})] + |J_n^{(h-1)}|^2 R_{petlje}; \quad (16)$$

gde je:

$n_{cv}$  – broj čvorova duž putanje između dva napojna čvorova, koja sadrže granu u kojoj se nalazi NO rasklopni uređaj (na slici 2 to je grana između čvorova  $(n)$  i  $(k)$ ) pa je ukupan broj čvorova jednak skupu čvorova između napojnih transformatora  $TR_n$  i  $TR_k$ ,

$DV_k^{(h-1)}, DV_n^{(h-1)}$  – pad napona u čvoru  $(k)$  i  $(n)$  u rezistivnoj mreži, u  $(h-1)$  konfiguraciji, respektivno,

$R_{petlje}$  – otpor konture između dva napojna čvorova koja sadrži granu u kojoj se nalazi NO rasklopni uređaj, (na slici 2 između čvorova  $(k)$  i  $(n)$ ) se nalazi grana u kojoj se nalazi NO, pa otpor konture čini suma svih otpora grana između napojnih transformatora  $TR_i$  i  $TR_r$ .



Slika 2. Simulacija otvaranja grane između čvorova  $(n)$  i  $(p)$  i zatvaranja inicijalno otvorene grane između čvorova  $(k)$  i  $(n)$



Praktično, za procenu uticaja efekta „izmene mesta” jednog para NO rasklopnog uređaja NZ rasklopnog uređaja na kriterijumsku funkciju, moguće je umesto proračuna tokova snaga za celu mrežu koristiti ovakvu uprošćenu relaciju.

## 2. Debalans opterećenja po napojnim transformatorima

Apksimativna relacija za procenu efekata „izmene mesta” para NO rasklopnih uređaja i spregnutih NZ rasklopnih uređaja na debalans opterećenja po napojnim transformatorima je:

$$IT = \frac{1}{n_{TR}} IT_{TR_r}^{(h-1)} \left| \frac{V_{TR_r}^{(h-1)} \left( (J_{TR_r}^{(h-1)}) \quad (J_n^{(h-1)}) \right)}{S_{TR_r}^n} \right| N_{srTR}$$

$$IT_{TR_i}^{(h-1)} \left| \frac{V_{TR_i}^{(h-1)} \left( (J_{TR_i}^{(h-1)}) \quad (J_n^{(h-1)}) \right)}{S_{TR_i}^n} \right| N_{srTR}, \quad (17)$$

gde je:

$n_{TR}$  – broj napojnih transformatora,

$N_{srTR}$  – srednje opterećenje svih napojnih transformatora, u relativnim jedinicama, definisano relacijom (18):

$$N_{srTR} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{TR}} |S_{TR_j}^{(h-1)}|}{\sum_{i=1}^{n_{TR}} S_{TR_i}^n}, \quad (18)$$

$S_{TR_r}^n, S_{TR_i}^n$  – nominalna snaga, respektivna, napojnog transformatora  $TR_r$  i  $TR_i$

$S_{TR_j}^n, S_{TR_j}^{(h-1)}$  – nominalna i aktuelna snaga ( $j$ -tog VN/SN transformatora u ( $h-1$ ) konfiguraciji, respektivno,

$IT_{TR_i}^{(h-1)}, IT_{TR_r}^{(h-1)}$  – debalans u napojnom transformatoru  $TR_i$  i  $TR_r$ , u ( $h-1$ ) konfiguraciji, respektivno.

## 3. Debalans opterećenja po izvodima

Apksimativna relacija za procenu efekata „izmene mesta” para NO rasklopnih uređaja i spregnutih NZ rasklopnih uređaja na debalans opterećenja po izvodima je:

$$IF = \frac{1}{n_F} IF_{F_q}^{(h-1)} \left| \frac{J_{F_q}^{(h-1)} \quad J_n^{(h-1)}}{J_{F_q}^n} \right| N_{srF}$$

$$IF_{F_j}^{(h-1)} \left| \frac{J_{F_j}^{(h-1)} \quad J_n^{(h-1)}}{J_{F_j}^n} \right| N_{srF}, \quad (19)$$

gde je:

$n_F$  – broj izvoda,

$N_{srF}$  – srednje opterećenje svih izvoda, u relativnim jedinicama, definisano relacijom (20):

$$N_{srF} = \frac{\sum_{i=1}^{n_F} |J_{F_i}^{(h-1)}|}{\sum_{i=1}^{n_F} J_{F_i}^n} \quad (20)$$

$J_{F_j}^n, J_{F_j}^{(h-1)}$  – su nominalna i aktuelna struja ( $j$ ) izvoda u ( $h-1$ ) konfiguraciji, respektivno

$J_{F_q}^n, J_{F_q}^{(h-1)}$  – su nominalna i aktuelna struja ( $q$ ) izvoda u ( $h-1$ ) konfiguraciji, respektivno

$IF_{F_j}^{(h-1)}, IF_{F_q}^{(h-1)}$  – debalans na izvodima  $F_j$  i  $F_q$ , u ( $h-1$ ) konfiguraciji, respektivno.

## 4. Kritični pad napona

Apksimativna relacija za procenu efekata „izmene mesta” para NO rasklopnih uređaja i spregnutih NZ uređaja na kritični pad napona je:

$$IV = \left\{ \begin{matrix} V_n^{(h-1)} & V_k^{(h-1)} \\ Z_{ik} & Z_{kn} \end{matrix} \right\} \frac{J_n^{(h-1)}}{V^n}, \quad (21)$$

gde je:

$DV_k^{(h-1)}, DV_n^{(h-1)}$  – pad napona u čvoru ( $k$ ) i ( $n$ ), respektivno, iz ( $h-1$ ) konfiguracije,

$Z_{ik}$  – redna impedansa od napojnog transformatora  $TR_i$  do čvora ( $k$ ),

$Z_{kn}$  – impedansa grane između čvorova ( $k$ ) i ( $n$ ).

Premeštaj pozicije NO rasklopnog uređaja sa slike 2 dovodi do povećanja pada napona u bilo kojoj tački duž izvoda između transformatora  $TR_i$  i čvora ( $k$ ), a rad napona u bilo kojoj tački duž izvoda između transformatora  $TR_r$  i čvora ( $p$ ) se smanjuje. Gornja relacija važi u slučaju da se najveći pad napona javi u kolu deonice napajane sa čvora ( $n$ ).

## 5. Pouzdanost napajanja

Promena u vrednosti indeksa pouzdanosti definisana je relacijom (22):

$$ENS = [U_m^{(h-1)} \quad U_k^{(h-1)}] \begin{matrix} P_i \\ i \\ n \end{matrix} \begin{matrix} T_i \\ i \\ n \end{matrix} [ \begin{matrix} P_i \\ i \\ n \end{matrix} \begin{matrix} P_i \\ i \\ n \end{matrix} \begin{matrix} P_i \\ i \\ n \end{matrix} \begin{matrix} P_i \\ i \\ m \end{matrix} ], (22)$$

gde je:

$a_n$  – skup indeksa čvorova između NZ rasklopnog uređaja koji se otvara i NO rasklopnog uređaja koji se zatvara (to je na slici 2 deo mreže između NZ1 i NO1),

$b_n$  – skup indeksa čvorova koji se nalaze između NZ rasklopnog uređaja i izvora napajanja (to je na slici 2 deo mreže između NZ1 i napojnog transformatora  $TR_r$ ),

$g_m$  – skup indeksa čvorova koji se nalaze na istom izvodu kao i čvor ( $k$ ), (to je na slici 2 deo mreže između NO1 i napojnog transformatora  $TR_i$ ),

$d_n$  – skup indeksa čvorova koji se nalaze između NZ rasklopnog uređaja i prvog rasklopnog uređaja na putanji prema NO rasklopnom uređaju (na slici 2 taj skup ne postoji),

$U_k^{(h-1)}$  – ukupno godišnje trajanje otkaza čvora ( $k$ ) iz ( $h-1$ ) konfiguracije,

$U_m^{(h-1)}$  – ukupno godišnje trajanje otkaza čvora ( $m$ ) iz ( $h-1$ ) konfiguracije,

$P_i$  – aktivna snaga potrošnje čvora ( $i$ ),

$I_i$  – ekvivalentni intenzitet otkaza grane ( $i$ ),

$T_i$  – trajanje jednog otkaza grane ( $i$ ).

Napomena: u izvođenju ove aproksimativne relacije uzeta je u obzir pretpostavka da je indeks čvora jednak indeksu grane koja napaja taj čvor.

## 6. Troškovi manipulacija

Promena u vrednosti indeksa je definisana relacijom (23):

$$IC = \begin{vmatrix} 0 & c_i \\ & c_i^{(h)} \end{vmatrix}, (23)$$

gde je:

$c_i$  – troškovi ( $i$ ) manipulacije,

$a_c^{(h)}$  – skup neophodnih manipulacija za prelazak u ( $h$ ) radijalnu konfiguraciju.

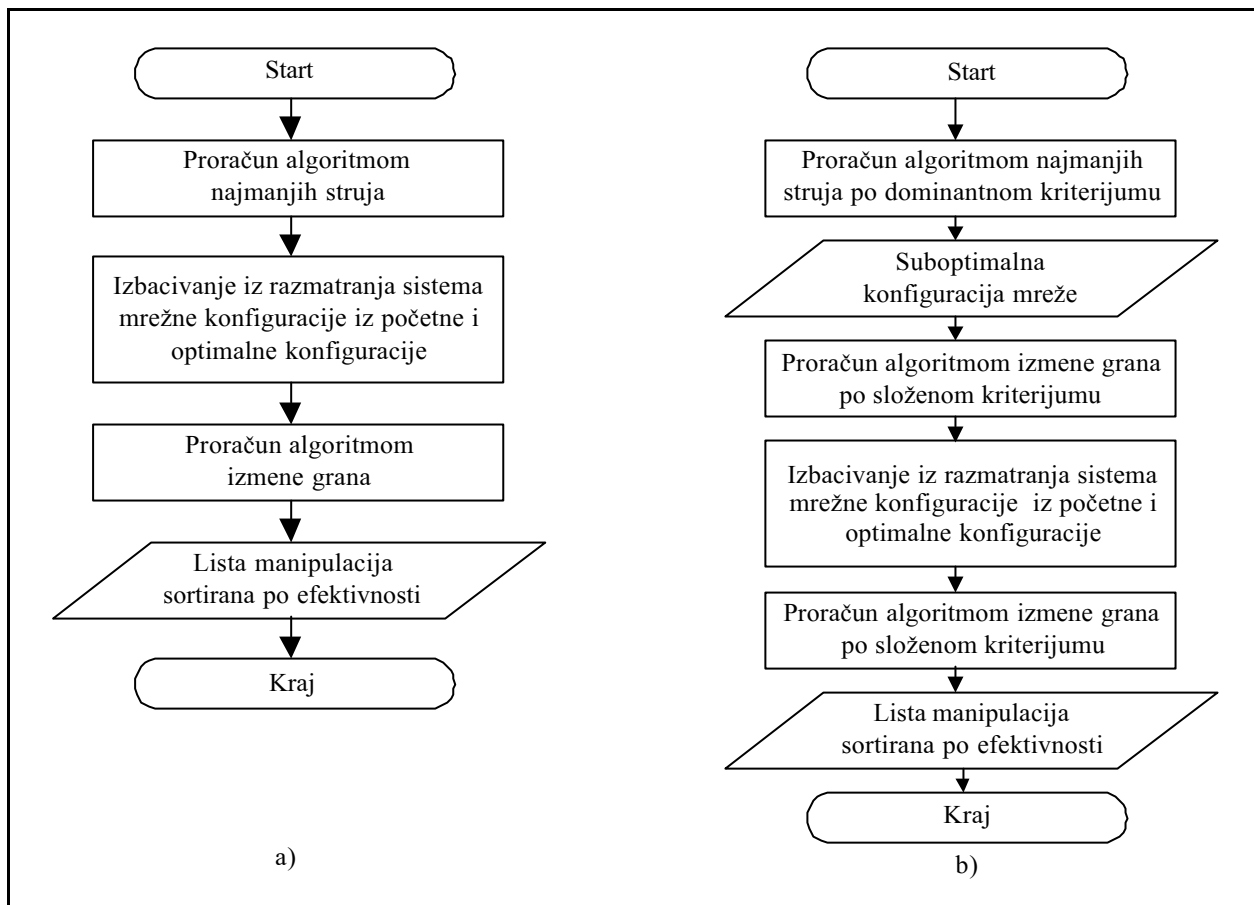
## 4.3. Kombinovani algoritmi

Kao što je navedeno, algoritam najmanjih struja i algoritam izmene grana imaju svoje prednosti i mane. Iako algoritam najmanjih struja daje nešto tačnije rezultate, on ima nedostatke da kao rezultat ne daje manipulacije sortirane po efektivnosti, kao i da se kriterijumi za ocenu performansi radijalne konfiguracije ne mogu lako kombinovati da bi se dobila konfiguracija koja ispunjava pogonske performanse na najbolji način sa više aspekata.

Kombinovani algoritam se sastoji iz dva prolaza, od kojih se prvi vrši algoritmom najmanjih struja, a drugi algoritmom izmene grana. U prvom prolazu, algoritmom najmanjih struja se dobija konfiguracija mreže koja ne zavisi od polazne konfiguracije i koja je optimalna sa aspekta kriterijuma koji se dominantno optimizuje. Nakon toga, u drugom prolazu se algoritmom izmene grana tako dobijena konfiguracija popravljaju tako da uvaži višekriterijumsku optimizaciju.

U osnovnom obliku, kombinovani algoritam se koristi da bi se dobio optimalan redosled manipulacija dobijenih algoritmom najmanjih struja (slika 3.a). Nakon što se algoritmom najmanjih struja odredi skup manipulacija (odnosno, parova rasklopnih uređaja koje treba otvoriti odnosno zatvoriti) kojim se iz osnovne konfiguracije prelazi u optimalnu, preostali rasklopnih uređaji se izbacuju iz razmatranja, odnosno „zaključavaju”. Na taj način, jedini rasklopnih uređaji u mreži s kojima se može manipulirati su oni otvoreni u početnoj i optimalnoj konfiguraciji. Na osnovnu radijalnu konfiguraciju sada se primenjuje metod izmene grana sa odgovarajućim kriterijumom. Pošto metod izmene grana inherentno daje optimalan redosled manipulacija, na ovaj način se dobija redosled manipulacija rasklopnih uređajima, sortiran prema doprinosu kriterijumske funkcije, kao i vrednost promene odgovarajuće kriterijumske funkcije za dati kriterijum za svaku manipulaciju. Na ovaj način, odgovorni inženjer u preduzeću koje primenjuje rekonfiguraciju može da odabere samo prvih  $n$  manipulacija, ili prvih  $k$  manipulacija čiji je doprinos kriterijumskoj funkciji (odnosno, poboljšanju odgovarajućeg indeksa performansi pogona) veći od nekog zadatog praga.

Važan aspekt primene kombinovanog algoritma ogleda se u višekriterijumskoj optimizaciji (9). Ukoliko je cilj da se optimalnom rekonfiguracijom distributivne mreže postigne istovremeno poboljšanje više indeksa performansi pogona (višekriterijumska optimizacija, odnosno povećanje integralnog kriterijuma), tada se u prvom prolazu algoritmom najmanjih struja dobija početno rešenje koje je dovoljno „slično” optimalnom. To se postiže tako što se za



Slika 3. Blok dijagram kombinovanog algoritma  
 a) u cilju proračuna optimalne liste manipulacija b) za primenu višekriterijumske optimizacije

kriterijum algoritma daje ili kriterijum koji je dominantan u integralnom kriterijumu (ima najveći težinski faktor  $p_i$  u jednačini (9)), ili kriterijum najmanjih gubitaka aktivne snage (koji u praksi obično daje konfiguracije „dobre” po svim kriterijumima). Zatim se na tako dobijeno rešenje primenjuje algoritam izmene grana, prema integralnoj kriterijumskoj funkciji. Na ovaj način se dobija konfiguracija mreže koja ima dobre performanse pogona po svim aspektima.

U vezi sa primenom kombinovanog algoritma sa aspekta optimizacije integralne kriterijumske funkcije, javljaju se dva problema. Već spomenuti problem određivanja optimalnog redosleda manipulacija može se rešiti bilo primenom istog rešenja kao kod primene kombinovanog algoritma u osnovnom obliku (naknadna obrada optimalnog rešenja primenom algoritma izmene grana u kojem su iz razmatranja izbačeni rasklopni uređaji čiji status treba da ostane nepromenjen), bilo pažljivim kombinovanjem manipulacija dobijenih u prvom koraku (suboptimizacija algoritmom najmanjih struja) sa onim dobijenim u drugom koraku (optimizacija al-

goritmom izmene grana). Drugi problem je određivanje težinskih faktora u relaciji za integralni kriterijum (9). S obzirom na to da je priroda razmatranih pojedinačnih kriterijuma potpuno različita (kW za kriterijum gubitaka, % za kriterijuma debalansa, kV za naponske prilike, otkaz/godina za pouzdanost, odnosno novčane jedinice za troškove manipulacija), potrebno je odrediti odgovarajuće koeficijente  $p_i$  u integralnoj kriterijumskoj funkciji (9), kako bi se pojedinačni kriterijumi doveli u samerljivu formu.

## 5. TEST REZULTATI

Razvijene metode za rekonfiguraciju su testirane na realnoj distributivnoj mreži Novog Sada sa prigradskim naseljima. Na test mreži su primenjena tri algoritma za optimalnu rekonfiguraciju: 1) algoritam „najmanjih struja” 2) algoritam „izmene grana” i 3) kombinovani algoritam, u kojem je suboptimalno rešenje dobijeno algoritmom najmanjih struja, a zatim je popravljano algoritmom izmene grana. Kako bi se algoritmi mogli porediti, korišteni su

Tabela 1.

	Početna konfiguracija	Najmanje struje		Izmena grana		Kombinovani	
		Apsolutna vrednost	Poboljšanje	Apsolutna vrednost	Poboljšanje	Apsolutna vrednost	Poboljšanje
Kriterijum minimuma gubitaka							
<b>DP</b> (kW)	11 133	9 791	1 341	9 793	1 339	9 748	1 385
<b>DP</b> (%)	4,46	3,94	12,0	3,94	12,0	3,92	12,4
<i>IF</i>	18,24	17,83	0,41	17,75	0,49	17,29	0,95
<i>IT</i>	17,36	18,75	-1,39	19,80	-2,44	19,58	-2,22
<b>D<sub>sr</sub></b> (%)	0,46	0,47	-0,01	0,47	-0,01	0,48	-0,02
<i>V<sub>min</sub></i> (%)	94,84	95,66	0,82	94,30	-0,54	95,23	0,39
Kriterijum debalansa opterećenja po izvodima							
<b>DP</b> (kW)	11 133	10 800	4,32	11 416	-283	10 731	402
<b>DP</b> (%)	4,46	4,32	3,0	-283	-2,5	4,29	3,6
<i>IF</i>	18,24	16,78	1,46	17,14	1,10	16,51	1,73
<i>IT</i>	17,36	20,44	-3,08	18,82	-1,46	17,76	-0,41
<b>D<sub>sr</sub></b> (%)	0,46	0,43	+0,03	0,39	+0,07	0,44	0,02
<i>V<sub>min</sub></i> (%)	94,84	94,19	-0,65	92,44	-2,40	94,53	-0,3
Kriterijum debalansa opterećenja po transformatorima							
<b>DP</b> (kW)	11 133	11 655	-522	13 501	-2 368	13 184	-2 052
<b>DP</b> (%)	4,46	4,67	-4,7	5,4	-21,3	5,31	-18,4
<i>IF</i>	18,24	18,20	+0,04	22,36	-4,12	22,58	-4,34
<i>IT</i>	17,36	15,47	1,89	14,49	2,87	11,59	5,77
<b>D<sub>sr</sub></b> (%)	0,46	0,45	+0,01	0,50	-0,04	0,50	-0,04
<i>V<sub>min</sub></i> (%)	94,84	93,08	-1,75	88,50	-6,34	87,68	-7,16

isključivo prosti kriterijumi (tj. u složenoj kriterijumskoj funkciji samo jedan težinski faktor je različit od nule):

U tabeli 1, *poboljšanje* je iskazano kao razlika kriterijuma u optimalnoj i početnoj konfiguraciji, tj. odgovarajuća vrednost je pozitivna tamo gde je došlo do poboljšanja i obratno. Pošto su svi kriterijumi dati u procentima, poboljšanje je dato kao razlika procentualnih vrednosti. Izuzetak su procentualni gubici aktivne snage, gde je poboljšanje iskazano kao procentualna razlika gubitaka (tj.  $100 \times (\Delta P_0 - \Delta P_{opt}) / \Delta P_0$ ), tj. brojka 12,0 označava da su gubici manji za 12 % nego u početnoj konfiguraciji.

Iz rezultata se vidi da kombinovani algoritam uvek daje bolje rezultate sa aspekta dominantnog kriterijuma od algoritma najmanjih struja i algoritma izmene grana. Takođe, treba napomenuti da je veliki deo (oko 60 %) analizirane mreže tronaponska mreža 110/35/10 kV/kV/kV, pa se javljaju izvesni problemi u definiciji pojmova balansa izvoda i transformatora, pošto se oni javljaju u „dva sloja”

(110/35 kV/kV transformatori i 35 kV izvodi, odnosno 35/10 kV/kV transformatori i 10 kV izvodi), čija opterećenja su međusobno zavisna. Stoga, uočljiva je izvesna kontradikcija između npr. optimizacije po gubicima aktivne snage i optimizacije po balansu opterećenja napojnih transformatora - poboljšanje jednog kriterijuma dovodi do pogoršanja drugog.

## 6. ZAKLJUČAK

*Rekonfiguracija distributivne mreže je jedna od najznačajnijih upravljačkih funkcija u planiranju pogona distributivnih mreža. Operativne performanse koje se rekonfiguracijom mogu optimizirati su: ekonomičnost, sigurnost, pouzdanost, kvalitet napona, itd. U ovom radu je prvo data opšta postavka problema određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže i pregleda metodologije za njeno rešavanje. Zatim su specificirani optimizacioni kriterijumi koji se koriste pri rekonfiguraciji distributivne mreže i predstavljeni osnovni algoritmi za pro-*

račun optimalne konfiguracije mreže: metod najmanjih struja i metod izmene grana. Nakon toga, predstavljen je kombinovani metod, kojim se kombinuju najbolje osobine oba postupka. Konačno, primenom ovih algoritama rešen je problem optimalne rekonfiguracije u razmatranoj test mreži. Pokazano je da se primenom kombinacije osnovnih algoritama dobijaju najbolji rezultati sa stanovišta aplikacije integralnog optimizacionog kriterijuma, kojim se istovremeno optimizuje više indeksa performansi pogona, kao i optimalan redosled manipulacija rasklopnim uređajima radi prelaska u optimalnu konfiguraciju.

## 7. LITERATURA

- [1] A. Merlin, H. Back: SEARCH FOR A MINIMAL-LOSS OPERATING SPANNING TREE CONFIGURATION IN URBAN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS, Proc. of 5th Power Systems Com. Con. , Cambridge, U. K. , Sept. 1-5, 1975.
- [2] V. G. Holmsky: CALCULATION AND OPTIMIZATION IN POWER SYSTEMS, High School Press, Moscow, 1975, 280p.
- [3] C. H. Castro, J. B. Bunch, T. M. Topka: GENERALIZED ALGORITHMS FOR DISTRIBUTION FEEDER DEPLOYMENT AND SECTIONALIZING, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 99, No. 2, 1980, pp. 549 -557.
- [4] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee: DISTRIBUTION FEEDER RECONFIGURATION FOR LOSS REDUCTION, IEEE Trans. on Power Delivery, July 1988, pp. 1217 -1223.
- [5] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi: AN EFFICIENT ALGORITHM FOR LOAD BALANCING OF TRANSFORMERS AND FEEDERS BY SWITCH OPERATION IN LARGE SCALE DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. on Power Delivery, October 1988, pp. 1865 -1872.
- [6] D. Shirmohamadi, H. W. Hong: RECONFIGURATION OF ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS FOR RESISTIVE LINE LOSS REDUCTION, IEEE Trans. on Power Delivery, April 1989, pp. 1492 -1498.
- [7] M. Baran, F. F. Wu: NETWORK RECONFIGURATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS FOR LOSS REDUCTION AND LOAD BALANCING, IEEE Trans. on Power Delivery, April 1989, pp. 1401-1407.
- [8] S. K. Goswami, S. K. Basu: A NEW ALGORITHM FOR THE RECONFIGURATION IN DISTRIBUTION FEEDERS FOR LOSS MINIMIZATION, IEEE Trans. on Power Delivery, June 1992, pp. 1484 -1491.
- [9] Y. Y. Hsu, Y. Jwo-Hwu, S. S. Liu, Y. W. Chen, H. C. Feng, Y. M. Lee: TRANSFORMER AND FEEDER LOAD BALANCING USING A HEURISTIC APPROACH, 92 WM 167-7 PWRS.
- [10] Y. Y. Hsu, Y. Jwo-Hwu: PLANNING OF DISTRIBUTION FEEDER RECONFIGURATION WITH PROTECTIVE DEVICE COORDINATION, 92 SM 501 - 7 PWRS.
- [11] C. S. Chen, M. Y. Cho: ENERGY LOSS REDUCTION BY CRITICAL SWITCHES, 92 SM 502 - 5 PWRS.
- [12] T. Taylor, D. Lubkeman: IMPLEMENTATION OF HEURISTIC SEARCH STRATEGIES FOR DISTRIBUTION FEEDER RECONFIGURATION, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, 1990, pp. 239-246.
- [13] K. Nara, A. Shiose, M. Kitgawa, T. Ishira: IMPLEMENTATION OF GENETIC ALGORITHM FOR DISTRIBUTION SYSTEMS LOSS MINIMUM RE-CONFIGURATION, 91 SM 467 - 1, PWRS.
- [14] K. H. Jung, H. Kim, Y. Ko: NETWORK RECONFIGURATION ALGORITHM FOR AUTOMATED SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPROACH, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, 1993, pp. 1993 - 1941.
- [15] J. Endrenyi: RELIABILITY MODELING IN ELECTRIC POWER SYSTEMS, John Wiley&Sons Ltd. , 1978, 338 p.
- [16] I. Roytelman, V. Melnik, S. S. H. Lee, R. L. Lugtu: MULTI-OBJECTIVE FEEDER RECONFIGURATION BY DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEM, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp. 661-667.

Rad je primljen u uredništvo 06. 04. 2004. godine



**Dragan S. Popović** (1959) je diplomirao na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1985. godine, a magistrirao i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1990. odnosno 1995. godine. Radi kao vanredni profesor na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Duže vremena je radio na problemima analize, upravljanja i stabilnosti u elektroenergetskim sistemima. Trenutno radi na istraživanjima i razvoju softvera za upravljanje u distributivnim mrežama. Takođe je bio vođa nekoliko projekata iz oblasti automatizacije i sistema upravljanja u distributivnim mrežama.



**Jugoslav K. Dujic** (1973) je diplomirao 1996. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smer elektroenergetika. Od 1997. godine je zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu kao asistent. Njegovo stručno interesovanje čine razvoj softvera za operativno upravljanje u distributivnim mrežama. Trenutno radi magistarski rad iz oblasti optimalne konfiguracije distributivnih mreža.



**Selimir S. Kurešević** (1971) je diplomirao 1998. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smer elektroenergetika. Od 2000. do 2001. godine radi na Fakultetu tehničkih nauka kao stručni saradnik. Od 2001. godine radi u DOO „DMS grupa”. Njegovo stručno interesovanje čine razvoj softvera za operativno upravljanje u distributivnim mrežama. Upi-sao je postdiplomske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

---

Ljubivoje Popović

# Analitička metoda za određivanje kritičnih zemljospojeva na nadzemnim vodovima visokih napona

Stručni rad  
UDK: 621.3.053; 621.316.99

---

Rezime:

U radu je izložen analitički postupak koji omogućava brzu i za praktične potrebe dovoljno tačnu procenu kritičnih delova struje zemljospoja, za kvar na bilo kom od nadzemnih vodova visokih napona. Prednosti metoda se zasnivaju na jednostavnosti i tačnosti formula za rešavanje uniformnih kaskadnih kola bilo koje veličine (od jednog do neograničenog broja  $p$  - četvoropola) i bilo kojih uslova na njihovim krajevima. Formule se dobijaju primenom opštih jednačina uniformnog kaskadnog kola na specifično električno kolo, kako za vreme zemljospojeva formiraju zemljovodno uže/užad i uzemljivači stubova nadzemnog voda. Razvijena metoda je pogodna za analize potrebne pri proceni najveće struje kvara kroz uzemljivački sistem transformatorske stanice na napojnom (prijemnom) kraju voda, najvećeg potencijala koji se može pojaviti na nekom od stubova voda, kao i pri izboru zemljovodnog užeta i elemenata uzemljivača stubova s obzirom na termička naprezanja izazvana strujama kvara.

**Ključne reči:** transformatorska stanica, zemljospoj, uzemljivački sistem, zemljovodno uže

---

Abstract:

ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINATION OF CRITICAL GROUND FAULTS  
ON THE OVERHEAD LINES OF HIGH VOLTAGES

The paper presents an analytical procedure which enables a quick and, for practical purposes, sufficiently accurate evaluation of the critical parts of the ground fault current, for a fault at any overhead line of high voltages. The advantages of the method are the simplicity and accuracy of the formulae for solving uniform ladder circuits of any size (from one up to an infinite number of pis) and any terminal conditions. The formulae are obtained by applying the general equations of the uniform ladder circuit on a specific electrical circuit formed by ground wire(s) and towers grounding electrodes during the ground faults. The method developed is suitable for analysis necessary at evaluating: the maximum ground fault current through the grounding system of a substation for the supplying (receiving) end of the line and the maximum potential at any tower, as well as at selecting the ground wire and the elements of the towers grounding electrode capable to withstand the thermal stresses caused by the fault currents.

**Key words:** substation, ground fault, grounding system, ground wire, towers

---

Doc. dr Ljubivoje Popović, dipl. ing. – „EPS” JP „Elektrodistribucija–Beograd” 11 000 Beograd, Masarikova 1-3

## 1. UVOD

Prilikom zemljospoja u jednom elektroenergetskom sistemu velike struje i povišeni potencijali javljaju se na mestima na kojima ih u normalnim pogonskim uslovima nema. Da bi se sigurno i ekonomično zaštitili od neželjenih posledica, kao što su gubitak ljudskog života, pregorevanje i kidanje zemljovodnog užeta, oštećenja osetljive telekomunikacione (elektronske) opreme unutar transformatorske stanice itd, neophodno je što tačnije odrediti ukupnu vrednost struje zemljospoja, kao i njenu raspodelu u uslovima kvara na najgorem (kritičnom) mestu. Problem je, međutim, to, što raspodelu struje zemljospoja i kritično mesto kvara u mnogim slučajevima nije moguće odrediti jednostavnim računskim postupkom. U određenim slučajevima procena najveće struje koja se preko uzemljivačkog sistema jednog postrojenja odvodi u okolno zemljište ne može biti obavljena bez analize kvarova na priključenim nadzemnim vodovima [7,8,9,14]. Prema savremenoj tehničkoj regulativi (praksi), analiza raspodele struje zemljospoja potrebna nam je barem zbog još dva važna razloga. Prvi je izbor zemljovodnog užeta i elemenata uzemljivača stubova, tako da oni mogu da podnesu termička naprezanja usled očekivane struje kvara [6,11,12], dok je drugi procena najvećeg potencijala koji se može pojaviti na određenom stubu posmatranog voda [3,5].

Opsežan istraživački rad je preduzet, naročito u poslednje tri decenije, sa ciljem modelovanja prenosne mreže za potrebe analize delova struje zemljospoja. Prednosti i nedostaci velikog broja do sada razvijenih metoda i postupaka razmatrani su u [12], a mi ćemo ovde ukazati samo na činjenicu da se u njihovom razvijanju i poboljšavanju mogu jasno uočiti dve tendencije. Na jednoj strani, očigledan je napor da se proračuni učine što jednostavnijim za primenu, s obzirom na veliki broj slučajeva koje u praksi treba razmotriti [2,3,9,10,14], dok je drugoj na strani, uočljiva tendencija razvijanja metoda koje omogućavaju da se proračunima obuhvate uticaji što većeg broja faktora nižeg reda [7,8,13].

Tačnije metode se zasnivaju na matricnom računu i na mogućnostima savremenih računara. Međutim, teorijska i praktična razmatranja su pokazala da relativna greška propagacije može biti problem pri rešavanju velikih kompleksnih matrica [8]. Od kraja šezdesetih godina prošlog veka mnogi autori (Endrenyi, Pater, Finsh, Johnson, Sebo, Dawaliby, Mukhedkar i drugi) ponudili su različite metode za rešavanje uniformnih kaskadnih kola. Opšte korišćeni pristup kod ovih autora bio je predstavljanje kaskadnih kola sa skoncentrisanim parametrima pomoću ekvivalentnog kaskadnog kola sa raspodelje-

nim parametrima koje se rešava pomoću odgovarajućih diferencijalnih jednačina.

U novije vreme, na osnovu Kirkofovih pravila, principa superpozicije i sumiranja potencijalnih (geometrijskih) redova došlo se do jednačina koje uzimaju u obzir diskretnu proradu kaskadnih kola sa skoncentrisanim parametrima [8,14]. Međutim, postupak razvijanja ovih jednačina nije doveden do kraja, tako da su rešenja do kojih se došlo odgovarala samo određenim slučajevima, specifičnim u pogledu vrednosti impedansi na krajevima kaskadnog kola. Najzad, izvođenjem opštih jednačina voda predstavljenog diskretnim parametrima [15] problem uniformnih kaskadnih kola je definitivno rešen. Ove jednačine omogućavaju da se korišćenjem relativno jednostavnih analitičkih izraza odrede naponi i struje uniformnih kaskadnih kola, proizvoljnih parametara, veličine i uslova na njihovim krajevima. Zahvaljujući jednostavnoj matematičkoj formi ovih jednačina, neki praktični problemi koji su ranije rešavani isključivo numeričkim metodama, sada se mogu rešiti i analitičkim postupkom (na pr. [16,18, 19]).

Kod nas je problem određivanja delova struje zemljospoja i kritičnih kvarova na nadzemnom vodu prvi put razmatran u [17]. U tom radu se ukazuje na činjenicu da je za korektnu procenu uslova bezopasnosti transformatorskih stanica u prenosnim mrežama potrebno razmotriti i kvarove na priključenim nadzemnim vodovima. Istovremeno, ukazano je na potrebu za određivanjem kritičnog mesta kvara, kako sa stanovišta struja koje mogu opteretiti uzemljivač postrojenja na napojnim krajevima voda, tako i sa stanovišta struja koje mogu opteretiti zemljovodno uže/užad i uzemljivače stubova. Metode koje se zasnivaju na mogućnostima savremenih računara (na primer [7]) rešenje ovog problema zasnivaju na uzastopnim (od stuba do stuba) analizama raspodele struje zemljospoja. Prva i do sada jedina metoda koja omogućava rešavanje problema relativno jednostavnim računskim postupkom (bez pomoći savremenih računara) razvijena je u [16], i primenjena u [18,19]. Izveden je analitički izraz za određivanje kritičnog mesta kvara i analitički izraz za procenu aktivne dužine voda, odnosno dužine iznad koje se vod, u pogledu uzemljivačkih efekata, može smatrati neograničeno dugim.

Idealizacije i aproksimacije realnog fizičkog modela (na primer: otpornosti uzemljivača pojedinih stubova međusobno jednake) pri razvijanju metode izvedene u [16] su one, na koje smo u fazi projektovanja inače prinuđeni, zbog nepouzdanosti osnovnog podatka o specifičnoj otpornosti tla duž voda, kao i o otpornostima uzemljivača pojedinih stubova. Metoda je u osnovi razvijena u [16], a u



ovom radu je ona razvijena i prikazana u potpunosti, pri čemu je izvršeno i određeno pojednostavljenje ranije izvedenog analitičkog izraza za kritično mesto kvara.

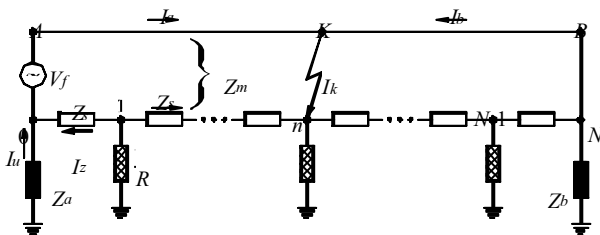
## 2. KVAR NA NADZEMNOM VODU

Prilikom projektovanja uzemljivačkog sistema jednog visokonaponskog postrojenja od projektanta se, pored ostvarenja propisanih uslova bezopasnosti, očekuje i da ponuđeno rešenje bude što ekonomičnije, a to znači da uslovi bezopasnosti treba da budu ostvareni bez suvišnih troškova. Ovo se može postići samo ukoliko postoji metoda koja omogućava da se tačno proceni struja koja će se u uslovima najgorog kvara, preko uzemljivačkog sistema odvoditi u okolnu zemlju. Problem se javlja u slučajevima kada ovo mesto kvara nije očigledno. Tada je neophodno obaviti veliki broj sukcesivnih prethodnih proračuna [7] pre nego što se odredi najveća vrednost ove struje kvara, koju ćemo u daljem tekstu jednostavnosti radi zvati struja uzemljenja,  $I_u$ .

Posmatrano u principu, zemljospoj bilo gde u jednom elektroenergetskom sistemu uslovljava struje kvara kroz uzemljivačke sisteme svih postrojenja sa uzemljenom neutralnom tačkom/tačkama. Međutim, za nalaženje kritičnog mesta kvara sa stanovišta uslova bezopasnosti određene transformatorske stanice dovoljno je analizom obuhvatiti kvarove u samoj stanici, kao i kvarove na izlaznim vodovima (na pr. [2]). Potpuna analiza može pokazati da se najgori (kritični) kvar nalazi na nekom od nadzemnih vodova, na određenoj kritičnoj udaljenosti od same stanice.

Mogućnosti i jednostavnost metoda biće demonstrirani na primeru jednog jednostavnog elektroenergetskog sistema sačinjenog od jednog nadzemnog voda preko koga se iz napojne stanice A napaja jedna distributivna TS 110/X kV/kV, označena sa B. Ako pretpostavimo da se na proizvoljnom stubu takvog voda dogodio zemljospoj, struja kvara se raspodeljuje na takve prikazane na slici 1.

Oznake korišćene na šemi imaju sledeće značenje:



Slika 1. Delovi struje zemljospoja

$V_f$  - generator kvara čiji je napon jednak naponu na mestu kvara pre kvara (faznom naponu),

$K$  - mesto kvara,

$I_k$  - ukupna struja kvara,

$I_a$  ( $I_b$ ) - komponente struje zemljospoja levo i desno od mesta kvara  $K$ ,

$I_u$  - struja kroz uzemljivački sistem stanice  $A$ ,

$I_z$  - struja kroz zemljovodno uže/užad prvog raspona voda, posmatrano iz stanice  $A$ ,

$Z_a$  ( $Z_b$ ) - impedansa uzemljivačkog sistema stanice  $A$  ( $B$ ) koja ne obuhvata uzemljivačke efekte zemljovodnog užeta/užadi posmatranog voda,

$Z_s$  - sopstvena impedansa zemljovodnog užeta/užadi po rasponu,

$Z_m$  - međusobna impedansa između zemljovodnog užeta/užadi i najudaljenijeg faznog provodnika, po rasponu,

$R$  - otpornost uzemljivača stuba,

$n$  - broj raspona do mesta kvara, posmatrano iz stanice  $A$  i

$N$  - ukupni broj raspona.

U praktičnim uslovima otpornosti uzemljenja stubova nisu međusobno jednake. Međutim, u fazi projektovanja mi smo prinuđeni da usvojimo jednu grubo procenjenju vrednost koju pripisujemo uzemljivačima velikog broja stubova. Ova jedinstvena vrednost se zasniva na opštim geološkim karakteristikama zemljišta na kome se planira izgradnja budućeg voda [12].

Impedanse  $Z_m$  i  $Z_s$  se izračunavaju korišćenjem formulu do kojih se došlo na bazi Karsonove teorije o prostiranju struje kroz zemlju (na pr. [2]). Impedansa  $Z_m$  se određuje samo u odnosu na fazni provodnik koji je pogođen kvarom [10], jer ne možemo da smatramo da su fazni provodnici voda transponovani i na relativno kratkim deonicama od samo nekoliko raspona. Imajući u vidu ovo i činjenicu da nas zanima samo najgori kvar, potrebno je pretpostaviti da se kvar dogodio na faznom provodniku koji se nalazi na najvećoj udaljenosti od zemljovodnog užeta/užadi.

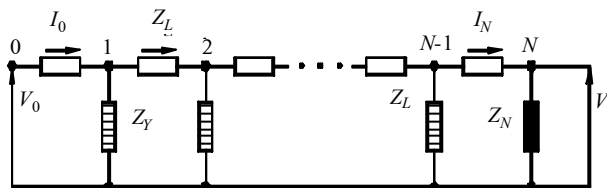
Struja  $I_a$  se vraća u energetske sistem kroz neutralnu tačku/tačke u stanici  $A$ , dok struja  $I_b$  cirkuliše kroz neutralnu tačku/tačke u stanici  $B$ . Kada se kvar dogodi unutar stanice  $A$ , struja  $I_a$  cirkuliše samo u aksijalnom pravcu kroz provodnike uzemljivačke rešetke i, bez obzira na njenu vrednost, ne može da prouzrokuje bilo kakav potencijal u odnosu na udaljenu (referentnu) zemlju. Međutim, kada se kvar dogodi na vodu, struja  $I_a$  opada po vrednosti, ali deo ove struje odlazi u zemlju (slika 1) i stvara potencijal na uzemljivačkom sistemu stanice  $A$ . Preostali deo struje  $I_a$  vraća se u energetske sistem preko zemljovodnog užeta/užadi i uzemljivačkih veza u stanici  $A$ . Najbliži

(na prvom stubu) kvar je sa najvećom vrednošću struje  $I_a$  za kvarove na vodu, ali se njen znatno veći deo zbog blizine stanice  $A$  vraća u ovu stanicu preko zemljovodnog užeta. Na sledećem (drugom) stubu smanjuje se vrednost struje  $I_a$ , ali se povećava deo koji odlazi u zemlju, odnosno struja,  $I_u$ . Očigledno, za iznalaženje kritične (najveće) vrednosti struje  $I_u$  neophodno je obaviti niz uzastopnih proračuna, pretpostavljajući kvarove koji se sukcesivno (od stuba do stuba) udaljavaju od stanice  $A$ . Ovakav postupak je očigledno dug i zametan, pa se odmah nameće pitanje: Da li se kritično mesto i kritična struja kvara mogu odrediti i na neki jednostavniji način?

### 3. EKVIVALENTIRANJE UNIFORMNOG KASKADNOG KOLA

#### 3.1. Opšte jednačine uniformnih kaskadnih kola

Kaskadno kolo prikazano na slici 2 sačinjeno je od konačnog broja,  $N$ , podužnih impedansi  $Z_L$  i od konačnog broja,  $(N-1)$ , otočnih impedansi,  $Z_Y$ .



Slika 2. Uniformno kaskadno kolo

U opštem slučaju, odnosno za proizvoljne vrednosti parametara  $Z_L$ ,  $Z_T$ ,  $Z_N$  i  $N$ , naponi i struje na krajevima prikazanog kola povezani su, prema [15], sledećim sistemom jednačina:

$$V_0 = \frac{k^{2N} + k}{k^N + k^{N+1}} V_N + \frac{(k^{2N} - 1)Z}{k^N + k^{N+1}} I_N$$

$$I_0 = \frac{k^{2N} - k^2}{(k^N + k^{N+1})Z} V_N + \frac{k^{2N} + k}{k^N + k^{N+1}} I_N \quad (1)$$

Koeficijent  $k$  predstavlja faktor raspodele struje koja se javlja kod svakog od čvorova beskonačnog (neograničenog) kaskadnog kola ( $N \rightarrow \infty$ ). Ovaj parametar kola određen je sledećom relacijom:

$$k = 1 - \frac{Z}{Z_T} \quad (2)$$

U datoj relaciji  $Z_\infty$  predstavlja ulaznu impedansu beskonačnog kaskadnog kola, koja je određena sa:

$$Z = \frac{Z_L}{2} \sqrt{Z_L Z_T \frac{Z_L^2}{4}} \quad (3)$$

### 3.2. Elementi ekvivalentnog $p$ -četvoropola

Kada su nam poznate opšte jednačine uniformnog kaskadnog kola (1), kolo prikazano na slici 2, u pogledu napona i struja koji se javljaju na njegovim krajevima, može biti zamenjeno sa samo jednim ekvivalentnim  $p$ -četvoropolom, sačinjenim od jedne podužne impedanse  $Q$  i dve poprečne impedanse  $P$ .

Za napone i struje ovog četvoropola na osnovu Kirhofovih pravila važi sledeći sistem jednačina:

$$V_0 = \left(1 + \frac{Q}{P}\right) V_N + Q I_N$$

$$I_0 = \left(\frac{2}{P} + \frac{Q}{P^2}\right) V_N + \left(1 + \frac{Q}{P}\right) I_N \quad (4)$$

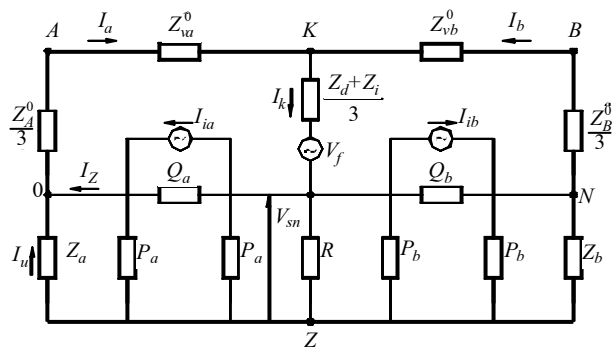
Da bi se kolo sa slike 2 moglo svesti na samo jedan ekvivalentni  $p$ -četvoropol, potrebno je da naponi  $U_0$  i  $U_N$  i struje  $I_0$  i  $I_N$  posle ove zamene ostanu neizmenjeni. To znači da koeficijenti u sistemu jednačina (4) moraju biti jednaki sa odgovarajućim koeficijentima iz sistema jednačina (1). Korišćenjem ovog uslova dolazi se i do sistema jednačina čijim rešavanjem dobijamo tražene analitičke izraze za  $P$  i  $Q$ . Na osnovu ovih izraza svako uniformno kaskadno kolo može biti zamenjeno sa samo jednim  $p$ -četvoropolom, odgovarajućih impedansi,  $P$  i  $Q$ .

### 4. EKVIVALENTNA ŠEMA VODA I POTREBNI ANALITIČKI IZRAZI

#### 4.1. Potpuna ekvivalentna šema

Kao što se može videti sa šeme na slici 1 nadzemni vod u uslovima zemljospoja predstavlja jedno veoma složeno električno kolo sa velikim brojem konduktivno (galvanski) i induktivno spregnutih elemenata. Međutim, na osnovu:

- metode simetričnih komponenta,
- uvođenja fiktivnog generatora kvara na mestu kvara (na pr. [11]),



Slika 3. Ekvivalentna šema voda u kvaru

- tehnikom razdvajanja uticaja induktivne i konduktivne sprege (na pr. [3,8]) i  
 - ekvivalentiranja uniformnih kaskadnih kola, kolo sa slike 1 može biti zamenjeno ekvivalentnim kolom na slici 3.

Korišćene oznake imaju sledeće značenje:

$V_f$  - generator kvara čiji je napon jednak naponu na mestu kvara pre kvara (faznom naponu),

$V_{sn}$  - potencijal stuba pogođenog kvarom,

$I_{ia}$  ( $I_{ib}$ ) - strujni generator sa kojim se zamenjuje uticaj induktivne sprege između faznog provodnika pogođenog kvarom i zemljovodnog užeta/užadi,

$Z_d$  ( $Z_i$ ) - direktna i inverzna impedansa sistema na mestu kvara,

$Z_A^0$  ( $Z_B^0$ ) - nulta impedansa sistema viđena iz stanice  $A$  ( $B$ ),

$Z_{va}^0$  ( $Z_{vb}^0$ ) - nulta impedansa voda od mesta kvara do stanice  $A$  ( $B$ ) i

$Z$  - udaljena (referentna) zemlja.

Struje koje stvaraju strujni generatori na datoj ekvivalentnoj šemi određene su sledećim relacijama:

$$I_{ia} = \frac{Z_m}{Z_s} I_a \quad (5)$$

$$I_{ib} = \frac{Z_m}{Z_s} I_b \quad (6)$$

Električno kolo koje formiraju zemljovodno uže/užad i uzemljivači stubova, uz određenu idealizaciju realnog fizičkog modela (dužine raspona međusobno jednake i otpornosti uzemljivača stubova međusobno jednake), predstavlja jedno uniformno kaskadno kolo u kome su svi rasponi i svi stubovi posebno predstavljeni. Na ove aproksimacije smo prinuđeni, pre svega, zbog činjenice da nam tačne vrednosti pojedinih parametara (na primer, vrednost otpornosti uzemljivača pojedinih stubova) u fazi projektovanja jednog elektroenergetskog voda nisu poznate.

Na osnovu postupka izloženog u prethodnom poglavlju, ekvivalentne impedanse  $Q_a$  i  $P_a$  za kaskadno kolo levo od mesta kvara (između  $0$  i  $n$  na slici 1) određene su relacijama:

$$Q_a = \frac{k^{2n} - 1}{k^n + k^{n+1}} Z \quad (7)$$

$$P_a = \frac{k^n + 1}{k^n - k} Z \quad (8)$$

gde su parametri  $k$  i  $Z_\infty$  određeni izrazom (3) i (4) u kojima je impedansa  $Z_L$  zamenjena sopstvenom impedansom zemljovodnog užeta po jednom rasponu, a impedansa  $Z_T$  sa otpornošću uzemljivača stuba,  $R$ .

Impedanse  $Q_b$  i  $P_b$  mogu, takođe, biti određene na osnovu izraza (3) i (4), samo je tada potrebno u njih uneti odgovarajući broj raspona, odnosno  $n$  zameniti sa  $N-n$ .

Na osnovu ekvivalentne šeme na slici 3 i datih izraza, uzastopnim proračunima i variranjem vrednosti broja  $n$  u granicama od  $1$  do  $N$ , moguće je za bilo koji vod, odrediti ekstremne vrednosti struja  $I_z$  i  $I_u$  i potencijal bilo kog stuba,  $V_{sn}$ . Struja  $I_z$  nam je potrebna za procenu termičkih naprezanja zemljovodnog užeta, a struja  $I_u$  za procenu termičkog naprezanja uzemljivačkih veza i uzemljivača stubova, dok nam je potencijal  $V_{sn}$  potreban za procenu uslova bezopasnosti u blizini nekog stuba.

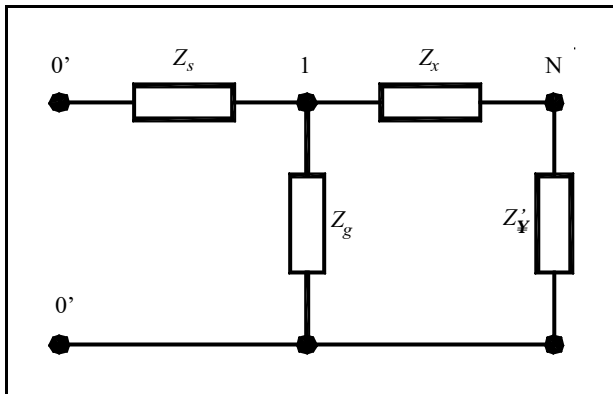
Pomenuta analiza se može sprovesti za bilo koji nadzemni vod u jednom proizvoljno složenom energetskom sistemu, što znači sa velikim brojem proizvodnih, prenosnih i distributivnih postrojenja, kao i velikim brojem vodova različitih naponskih nivoa. Kada vod povezuje dva nezavisna sistema, ili kada napaja stanicu/stanice u distributivnoj mreži (tzv. radijalni napojni vod), za određivanje struje  $I_u$  potrebno je u ekvivalentnoj šemi na slici 3 prikazati još i granu koja direktno povezuje tačke  $A$  i  $Z$ . Ekvivalentna impedansa u ovoj grani treba da bude određena uz uslov da se struja  $I_a$  deli na dve komponente. Jednu, koja prolazi kroz neutralnu tačku/tačke u lokalnoj stanici ( $A$ ), i drugu, koja prolazi kroz preostale uzemljene neutralne tačke u mreži kojoj ova stanica pripada. Kada je vod unutar mreže u kojoj su njegovi krajevi ( $0$  i  $N$ ) međusobno povezani još nekim vodom/vodovima ekvivalentna šema sa slike 3 mora se dopuniti sa još jednom ekvivalentnom impedansom (preko nje se povezuju tačke  $0$  i  $N$ ). Jedan takav slučaj posebno je razmatran u [20].

Ovde prikazano ekvivalentiranje kaskadnih kola može se u cilju smanjenja obima proračuna primeniti i u okviru metoda koje, u cilju analize drugih vrsta kvarova, obuhvataju svaki fazni provodnik posebno. Najzad, prikazani analitički izrazi mogu biti korišćeni za procenu raspodele struje zemljospoja u transformatorskoj stanici koja se napaja vodom sačinjenim od dve ili više međusobno različitih deonica [18].

## 4.2. Pojednostavljena ekvivalentna šema voda

Problem ćemo učiniti jednostavnijim tako što ćemo zanemariti struju  $I_b$ , a samim tim i struju  $I_{ib}$ , privremeno pretpostavljajući da je impedansa  $Z_B^0$  beskonačno velika ( $Z_B^0 = \infty$ ). Tada, uticaj zemljovodnog užeta desno od mesta kvara može biti predstavljen pomoću impedanse uzemljenja koja je, u skladu sa [16], određena relacijom:





Slika 5. Ekvivalentna šema neograničenog voda predstavljenog pomoću dve deonice

Oznake korišćene na datoj šemi imaju sledeće značenje:

$Z_g$  - ekvivalentna impedansa uzemljenja zemljovodnog užeta na prvoj deonici (od prvog do  $N$ -tog stuba) i

$Z_x$  - ekvivalentna aksijalna impedansa zemljovodnog užeta od prvog do  $N$ -tog stuba.

Kako je dužina voda neograničena, impedansa uzemljenja zemljovodnog užeta, viđena iz bilo koje tačke duž voda, prema njegovom kraju ima istu vrednost, jednaku impedansi  $Z'_\infty$  (obuhvata i otpornost uzemljenja stuba u tački  $N$ ). Na osnovu toga i na osnovu ekvivalentne šeme na slici 5, može se pisati sledeća relacija:

$$Z_g = 1 + \frac{Z'}{Z_x} Z' \quad (19)$$

Impedansa  $Z_x$  je, u skladu sa [14,15], određena sa:

$$Z_x = \frac{k^{N-1} - 1}{k - 1} Z_s \quad (20)$$

a na osnovu (2) ovom izrazu se može dati i sledeća forma:

$$Z_x = \frac{k^{N-1} - 1}{Z} R Z_s \quad (21)$$

i najzad, pošto je na osnovu (3) i (14) imamo da je:  $R Z_s = Z_\infty Z'_\infty$ , dobijamo:

$$Z_x = k^{N-1} - 1 Z' \quad (22)$$

Na osnovu (22) izraz (19) sledi:

$$Z_g = 1 + \frac{1}{k^{N-1} - 1} Z' \quad (23)$$

Ukoliko je prva sekcija voda približno jednaka tzv. aktivnoj dužini voda, onda bi impedansa uzemljenja  $Z_g$  morala biti približno jednaka impedansi

$Z'_\infty$ . U skladu sa jednačinom (23), ovaj uslov može biti iskazan sledećom nejednačinom:

$$\frac{1}{k^{N-1} - 1} > \frac{1}{k^{N_a-1} - 1} \quad (24)$$

ili isto to, samo u eksplicitnoj formi:

$$N - N_a = \frac{\ln(1 + \frac{1}{k})}{\ln(1 + \sqrt{\frac{|Z_s|}{R}})} \quad (25)$$

gde je :

$N_a$  - aktivna dužina voda iskazana brojem raspona

$e$  - željena relativna tačnost  $\left| \frac{Z - Z_g}{Z} \right|$ , unapred usvojeni proizvoljno mali broj.

U skladu sa (25), aktivna dužina voda zavisi od karakteristika zemljovodnog užeta ( $Z_s$ ), otpornosti uzemljivača stubova i od željenog stepena tačnosti  $e$ . To znači da apriorna pojednostavljenja uzemljivačkih sistema transformatorskih stanica i primena izraza za  $Z_\infty$  (na primer [2,3]) nije korektna, ako uslov, definisan nejednačinom (25), nije zadovoljen.

#### 4.4. Kritično mesto kvara za struju uzemljenja

Na osnovu kvantitativne analize koja će biti prikazana u ovom radu (slika 7) najgori kvar (najveća vrednost  $I_u$ ), zavisno od dužine voda, može biti na kraju voda, ili na određenoj kritičnoj udaljenosti, koju ćemo označiti sa  $c$ . Ako preliminarno pretpostavimo da je vod neograničeno dug, tada je, naravno, kraj voda eliminisan kao moguće mesto kritičnog kvara. Kritičnu udaljenost  $c$  ćemo tada odrediti iz uslova da struja  $I_u$  na tom mestu dostiže svoju maksimalnu vrednost, odnosno da je njen priraštaj u blizini ovog mesta zanemarljivo mali. Ovaj uslov, u skladu sa šemom na slici 4, može biti iskazan sledećom aproksimacijom:

$$\frac{Q_a(c)I_k(c)}{Q_a(c) + Z_n(c)} = \frac{Q_a(c+1)I_k(c+1)}{Q_a(c+1) + Z_n(c+1)} \quad (26)$$

gde je  $I_k(c)$  ukupna struja kvara na kritičnom mestu kvara.

Određenim algebarskim sređivanjem ove jednačine dobijamo:

$$\frac{Z_n(c)}{Q_a(c)I_k(c)} - \frac{Z_n(c+1)}{Q_a(c+1)I_k(c+1)} = \frac{1}{I_k(c+1)} - \frac{1}{I_k(c)} \quad (27)$$

Vrednost impedanse  $V_z$  za stub sa najgorim kvarom i za najbliži susjedni stub malo se međusobno razlikuju, tako da možemo pisati:

$$Z_n(c) \approx Z_n(c+1) \quad (28)$$

Na osnovu ove aproksimacije i šeme na slici 4 sledi:

$$\frac{1}{I_k(c)} - \frac{1}{I_k(c+1)} = \frac{Z_v}{V_f} \quad (29)$$

Korišćenjem (28) i (29), izraz (27) može biti transformisan u

$$\frac{Q_a(c+1)}{Q_a(c)} \frac{1}{I_k(c)} - \frac{1}{I_k(c+1)} = \frac{Z_v}{V_f} \frac{Q_a(c+1)}{Z_n(c)} \quad (30)$$

U skladu sa rezultatima kvantitativne analize (slika 7) rastojanje  $c$  je tako veliko da možemo uvesti aproksimaciju:

$$\frac{Q_a(c+1)}{Q_a(c)} = k \quad (31)$$

Pored toga, na osnovu učinjene pretpostavke da je vod neograničeno dug i (14) možemo pisati sledeću aproksimaciju:

$$Z_n(c) = \frac{k^c + 1}{2k^c} Z = \frac{Z}{2} \quad (32)$$

Najzad, na osnovu (27) i (7) proizilazi:

$$\frac{Q_a(c+1)}{Z_n(c)} = \frac{2}{k+1} (k^c - 1) \quad (33)$$

Korišćenjem prethodnih aproksimacija: (26), (27) i (28) i ekvivalentne šeme na slici 4, izraz (33) dobija traženu jednostavniju formu:

$$c + \frac{2Z_A + Z_v + rZ}{2Z_v} = \frac{2}{k^2 - 1} k^{c+1} \quad (34)$$

gde je sa  $r$  označen redukcioni faktor voda ( $r = 1 - Z_m/Z_v$ ).

Kao što se vidi, izvedena relacija predstavlja jednu transcendentnu jednačinu, a do njenog rešenja, koje nam daje mesto kritičnog kvara, dolazi se grafičkim predstavljanjem leve i desne strane ove jednačine. Kako tako dobijeni rezultat ne mora predstavljati ceo broj, konačnim rešenjem treba smatrati njemu najbliži ceo broj.

Kada nam je poznato kritično mesto kvara, onda se i bez uzastopnih proračuna (od stuba do stuba), samo na osnovu jednog proračuna može odrediti struja  $I_{u \max}$ . Međutim, da li je ova vrednost veća od vrednosti ove struje kada je kvar na kraju voda (u napajanoj stanici), to zavisi od dužine voda. Njegovu graničnu dužinu iskazanu brojem raspona  $N_g$  ćemo odrediti iz uslova jednakosti struje  $I_{u \max}$  sa strujom  $I_u$  kada se kvar dogodi na kraju voda. Korišćenjem ekvivalentne šeme na slici 4, ovaj uslov se iskazuje sledećom jednačinom:

$$\frac{rV_f}{Z_A + N_g Z_v} = I_{u \max} \quad (35)$$

Na osnovu ove jednačine dobija se da je granična dužina voda, iskazana brojem raspona, određena sa:

$$N_g = Re \frac{rV_f Z_A I_{u \max}}{Z_v I_{u \max}} \quad (36)$$

gde je  $Re$  realni deo izraza u zagradama.

Ukoliko je realna dužina voda manja od ove, granične vrednosti ( $N < N_g$ ), kritični kvar sa stanovišta uslova bezopasnosti u stanici  $A$  je onaj na drugom kraju voda. Na osnovu ekvivalentne šeme na slici 4, struja  $I_u$  za kvar na kraju voda određena je sa:

$$I_u = \frac{rV_f}{Z_A + NZ_v} \quad (37)$$

Zbog činjenice da je u realnim uslovima impedansa  $Z_b$  zanemarljivo mala, predhodno učinjena pretpostavka:  $Z_B^0 \approx \infty$ , nema ni praktičnog ni teorijskog uticaja na tačnost izraza (37).

Kada se kritično mesto kvara nalazi na vodu na određenoj udaljenosti,  $c$ , struja kroz uzemljivački sistem napojne stanice se, takođe može odrediti korišćenjem šeme na slici 4. Tako određena vrednost struje  $I_{u \max}$  je neznatno na strani sigurnosti [19]. Ukoliko se ipak želi veća tačnost, odnosno uvažavanje uticaja komponente struje kvara,  $I_b$  i impedansi  $Z_a$  i  $Z_b$ , proračun treba obaviti korišćenjem ekvivalentne šeme na slici 3.

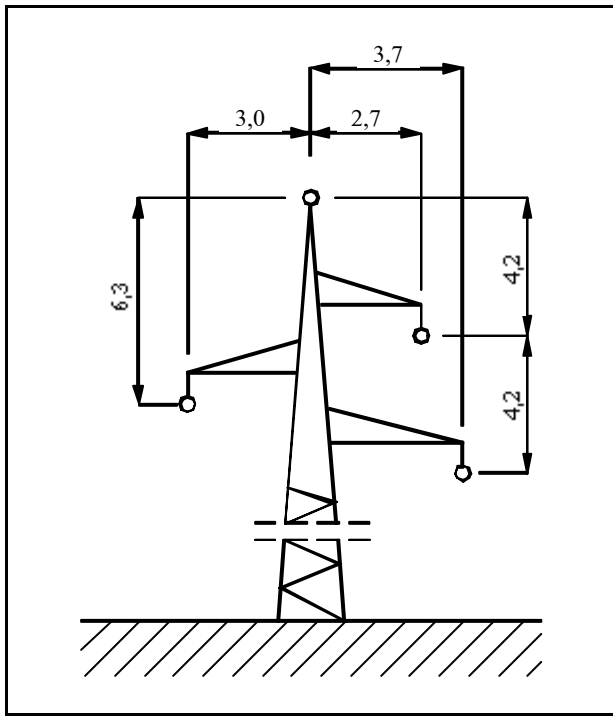
Prethodno izloženi analitički postupak omogućava nam da odredimo kritičko mesto za struju kvara koja se preko uzemljivača stubova, zemlje i uzemljivača napojne stanice vraća u energetske sistem. Kako u realnim uslovima, iz jednog postrojenja u prenosnoj mreži, na primer TS X/110 kV/kV, ne polazi samo jedan, nego veći broj vodova, prethodno izloženim postupkom treba obuhvatiti svaki od njih. Ceo postupak nalaženja najveće vrednosti struje koja opterećuje uzemljivački sistem napojne transformatorske stanice  $I_u$ , može biti obavljen i bez korišćenja računara. Naravno, za konačno određivanje struje merodavne za uslove bezopasnosti u jednoj TS X/110 kV/kV analizom je potrebno obuhvatiti i kvarove na drugoj strani transformatora (odnosno na naponu: 220 kV, ili 400 kV). Međutim, ovaj deo analize je mnogo jednostavniji, jer se, u skladu sa [2], unapred zna da je kritično mesto kvara u samom postrojenju. Kako uloga jednog razvodnog postrojenja u prenosnoj mreži može biti i drugačija, ne samo povezivanje prenosne sa distributivnom mrežom, u takvim slučajevima prethodno izloženi postupak nalaženja struje kvara merodavne za uslove bezopasnosti potrebno je dopuniti jednom prethodnom analizom. Njom treba utvrditi koji od priključenih vodova služi za dovod, a koji za odvod električne energije, kao i vodove koji zavisno od

energetskih prilika u mreži mogu menjati ulogu, odnosno mogu biti jedanput dovodni, a drugi put odvodni. Kada se to utvrdi, dalji postupak analize raspodele struja zemljospoja obavlja se na način koji je ovde izložen.

Ovde, takođe treba reći da kod vodova koji su dovoljno dugi, odnosno duži od  $N_g$ , mesto pojavljivanja najveće vrednosti struje  $I_u(I_{u\ max})$  predstavlja istovremeno i kritično mesto kvara, u pogledu veličine struje kvara kojoj mogu biti izloženi uzemljivači (uzemljivački provodnici, veze i spojevi) stubova koji pripadaju jednom vodu. Deo struje koji se u zemlju odvodi preko uzemljivača stuba pogođenog kvarom može se odrediti korišćenjem šeme na slici 3, uz pretpostavku da je do kvara došlo na kritičnoj udaljenosti  $c$  koja nam je korišćenjem izraza (34) unapred poznata. Uzemljivači stubova treba bez oštećenja da podnesu mehanička i termička naprezanja izazvana ovom strujom kvara. Ukoliko se uzemljivač stuba sastoji samo od čelične armature temelja, onda treba proveriti i da li struja kvara može da dovede do naglog isušivanja i pucanja betona u temelju stuba [1].

## 5. KVANTITATIVNA ANALIZA

Kvantitativna analiza je obavljena sa ciljem da se upotpuni kvalitativna slika o pojavama razmatranim u ovom radu. Zato ćemo posmatrati samo uticaj glav-

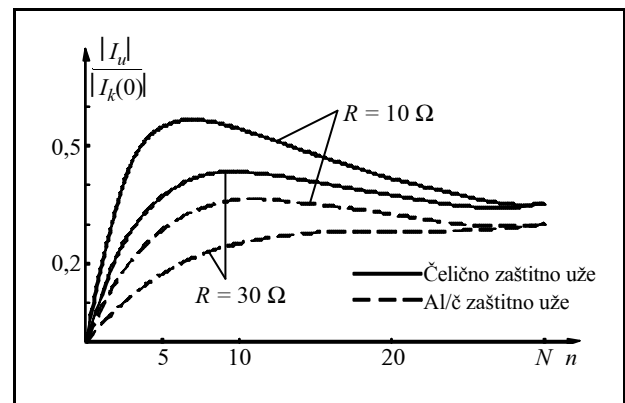


Slika 6. Prostorni raspored provodnika na stubu (dimenzije date u metrima)

nih faktora: ukupne dužine voda, vrste materijala upotrebljenog za zemljovodno uže i otpornosti uzemljenja stubova. U tom cilju, pretpostavićemo da vod na slici 1 predstavlja jedan 110 kV vod, čiji su fazni provodnici od užeta Al-Č 240/40 mm<sup>2</sup>, dok je zemljovodno uže u jednom slučaju Č 50 mm<sup>2</sup>, a u drugom Al-Č 95/55 mm<sup>2</sup>. Impedanse voda po jednom rasponu određene su uz pretpostavku da su dužine raspona jednake 250 m i da je specifična otpornost tla duž voda jednaka 50 Ωm. Za izabrane fazne provodnike i zemljovodno uže, čelik i aluminijum-čelik aktivna otpornost iznosi: 0,12 Ω/km; 3,5 Ω/km i 0,299 Ω/km (Kajzerov priručnik), respektivno, dok je srednji geometrijski prečnik ovih provodnika: 8,53 mm; 2,49 mm i 6,23 mm, takođe, respektivno. Geometrija glave stuba je prikazana na slici 6 i za sve stubove u svim ovde razmatranim slučajevima je ista.

Impedanse sistema u napojnom postrojenju  $A$  su jednake:  $Z_{AD} = Z_{Ai} = j3,6 \Omega$  i  $Z_A^0 = j2,1 \Omega$  i odabrane su tako da struje zemljospoja na vodu budu u okviru realno mogućih vrednosti.

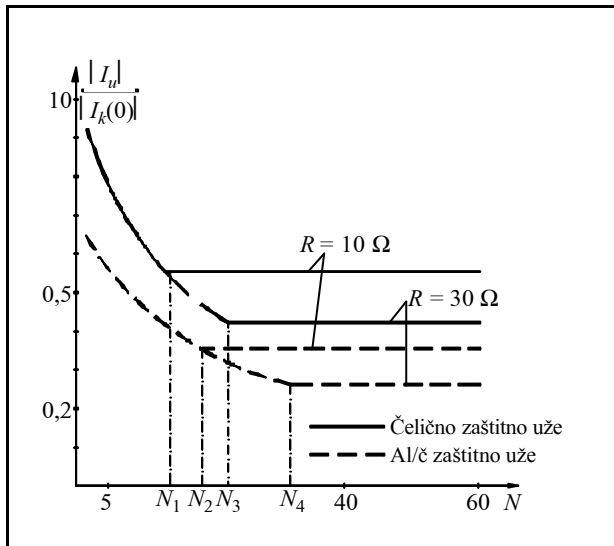
Na osnovu datih podataka i prethodno izloženog postupka proračuna, dobijaju se rezultati prikazani na slici 7. Da bi se imao bolji uvid u razmatrane efekte, struja na datom dijagramu je predstavljena kao relativni deo struje zemljospoja koja se ima kada je kvar na početku voda (u stanici  $A$ ).



Slika 7. Struja  $I_u$  u zavisnosti od dužine voda

Kao što se može videti sa dijagrama na slici 7, kada je ukupna dužina voda 30 raspona (7,5 km) u slučaju: Al-Č zemljovodnog užeta i  $R = 30 \Omega$ , struja  $I_u$  ne dostiže svoju najveću vrednost na vodu, već na njegovom kraju. Zato je potrebno istražiti i funkcionalnu zavisnost najveće vrednosti struje  $I_u$  kao i kritičnog mesta kvara, od ukupne dužine voda. Rezultati proračuna za ukupnu dužinu vodova do  $N = 60$  (15 km), prikazani su grafički na slici 8. Na osnovu rezultata datih za sve razmatrane slučajeve, pokazuje se da do određenih graničnih dužina voda ( $N_1, N_2$ ,

$N_3$  i  $N_4$ ) struja ima najveću vrednost kada je kvar na kraju voda (u stanici  $B$ ). Kada se dužina voda povećava iznad ovih graničnih dužina, struja  $I_{u\max}$  dobija jednu konstantnu vrednost koja praktično ne zavisi od dužine voda. Istovremeno, kritično mesto kvara seli se (prelazi) na određenu, kritičnu udaljenost od stanice  $A$ , koja se, takođe ne menja sa daljim povećanjem dužine voda.



Slika 8. Struja  $I_{u\max}$  u zavisnosti od dužine voda

Kvantitativna analiza obavljena uz opsežne varijacije relevantnih parametara pokazuje da korišćenje šeme na slici 4 daje rezultate koji su dovoljno tačni, odnosno neznatno na strani sigurnosti, ukoliko su ispunjeni sledeći uslovi:  $Z_a$  i  $Z_b \in [0; 0,2]$  i  $Z_A^0 \ll Z_B^0$ . Imajući u vidu nepouzdanost osnovnog podatka o specifičnoj otpornosti tla duž voda i sam cilj proračuna (uslove bezopasnosti), ovo se može smatrati više prednost nego nedostatak šeme na slici 4. Ukoliko dati uslovi u razmatranom slučaju nisu ispunjeni, treba koristiti potpuniju šemu na slici 3. Naravno, i u takvom slučaju obim proračuna se značajno smanjuje korišćenjem izraza (36) i (34).

Na osnovu rezultata, prikazane kvantitativne analize, mogu se izvući sledeći zaključci značajni za rešavanje praktičnih problema. Pri identičnim vrednostima svih ostalih parametara, veća vrednost struje  $I_u$  može se očekivati kod vodova koji su opremljeni čeličnim zemljovodnim užetom, čiji uzemljivači stubova imaju manju otpornost rasprostiranja i čija je dužina manja od određene granične dužine. Analizom nisu obuhvaćeni i vodovi sa dvostrukim zemljovodnim užetom, međutim, nije teško zaključiti da se, u takvim slučajevima, pri identičnim svim ostalim parametrima, može očekivati veća udaljenost kritičnog mesta kvara, odnosno manja vrednost struje,  $I_u$ .

Primena ovde izloženog postupka bi pokazala da su vrednosti punih potencijala, kao i naponi koraka i dodira na uzemljivačima mnogih postrojenja u našoj prenosnoj mreži znatno niže od onih koje su procenjene prilikom njihove izgradnje i puštanja u pogon. Razlog, naravno, leži u činjenici da su se kritičnim kvarovima tada smatrali kvarovi u samom postrojenju  $I_k$ .

## 6. VERIFIKACIJA METODE

Koristeći podatke na osnovu kojih su dobijeni rezultati prikazani na slici 8 izvršeni su proračuni primenom ovde prikazane metode, kao i metode koja se zasniva na mogućnostima savremenih računara [7].

Najvažniji rezultati ovih proračuna su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1.

Zemljovodno uže	R (Ω)	Računarska metoda			Metoda prikazana ovde		
		$I_k(c)$ (kA)	$I_{u\max}$ (kA)	$\frac{I_{u\max}}{I_k(c)}$	$I_k(c)$ (kA)	$I_{u\max}$ (kA)	$\frac{I_{u\max}}{I_k(c)}$
Čelik	10	13,78	11,64	0,845	13,24	11,32	0,855
	30	11,05	9,11	0,825	10,46	8,96	0,831
Al/Č	10	12,05	7,14	0,593	11,82	7,22	0,610
	30	10,24	5,60	0,544	9,92	5,54	0,558

Jednostavnim poređenjem odgovarajućih rezultata nije teško zaključiti da su razlike u dobijenim vrednostima za struje  $I_{u\max}$  zanemarljivo male. Ove razlike mogu se objasniti i time da je ukupna struja zemljospoja na kritičnom mestu kvara,  $I_k(c)$  u ovde izloženom postupku određena uz korišćenje metoda simetričnih komponenta, a to znači uz aproksimaciju da su parametri voda na deonici od  $A$  do  $c$  potpuno simetrični. Konfiguracija glave stuba na slici 6 izabrana je tako da efekti ove aproksimacije budu što više izraženi. Zato je realno očekivati da bi ovde ispoljene razlike u dobijenim rezultatima za drugu vrstu stubova bile manje izražene.

## 7. ZAKLJUČCI

*U radu je izložena direktno primenljiva (nije neophodan računar) metoda za određivanje kritične struje kvara kroz uzemljivački sistem energetske postrojenja u prenosnim mrežama.*

*Metoda se može koristiti i pri projektovanju novih vodova u 110 kV, 220 kV i 400 kV mrežama. Njenom primenom mogu se dimenzionisati: zemljovodno uže/užad voda i elementi uzemljivača stubova, ta-*



ko da bez oštećenja podnesu termička naprezanja izazvana strujama kvara. Najzad, može se proceniti i najviša vrednost potencijala koji se može pojaviti na nekom stubu visokonaponskog voda.

Za postojeća postrojenja u našoj prenosnoj mreži potrebno bi bilo izvršiti analizu struja kvara koje u uslovima zemljospoja opterećuju njihove uzemljivačke sisteme. Analiza obavljena na osnovu ovde izloženog postupka bi mogla pokazati da su procene iz vremena projektovanja ovih postrojenja bile prestroge i da su realne vrednosti potencijala koji se mogu pojaviti na njihovim uzemljivačima znatno manje od ranije procenjenih. Ovaj zaključak bi mogao imati praktičnog značaja u slučaju postrojenja koja se proširuju a kod kojih se preduzimaju posebne mere za zaštitu osetljive telekomunikacione opreme.

## 8. LITERATURA

- [1] IEEE GUIDE FOR SAFETY IN SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE St.d.80-1986.
- [2] B. Thapar, S. Madan, CURRENT FOR DESIGN OF GROUNDING SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No.9, Sept.1984, pp.2633-2636.
- [3] J. Endrenyi, ANALYSIS OF TRANSMISSION TOWER POTENTIALS DURING GROUND FAULTS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86, No.10, Oct. 1967, pp.1274-1283.
- [4] F. Dawalibi, D. Bensted and D. Mukhedkar, SOIL EFFECTS ON GROUND FAULT CURRENTS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No.7, July 1981, pp.3442-3450.
- [5] G. Niles et al., BACKGROUND AND METHODOLOGY FOR ANALYZING STEP AND TOUCH POTENTIALS NEAR TRANSMISSION STRUCTURES, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, Apr.1986, pp. 150-157.
- [6] S. Lambert, MINIMUM SHIELD WIRE SIZE - FAULT CURRENT CONSIDERATIONS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, No. 3, March. 1983, pp. 572-578.
- [7] A. Meliopoulos, R. Webb, E. Joy and S. Patel, COMPUTATION OF MAXIMUM EARTH CURRENT IN SUBSTATION SWITCHYARDS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, No. 9, Sept. 1983, pp. 3131-3139.
- [8] S. Sobral, V. Costa, M. Campos and D. Mukhedkar, DIMENSIONING OF NEARBY SUBSTATIONS INTERCONNECTED GROUND SYSTEM, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oct. 1988, pp. 1605-1614.
- [9] D. Garrett, J. Myers and S. Patel, DETERMINATION OF MAXIMUM SUBSTATION GROUNDING SYSTEM FAULT CURRENT USING GRAPHICAL ANALYSIS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, July. 1987, pp. 725-732.
- [10] M. Tibensky and L. Perfecky, METHODS FOR RMS SYMMETRICAL STATION GROUND POTENTIALS RISE CALCULATIONS FOR PROTECTION OF TELECOMMUNICATIONS CIRCUITS ENTERING POWER STATIONS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No. 12, Dec. 1981, pp. 4785-4794.
- [11] S. Sebo, ZERO SEQUENCE CURRENT DISTRIBUTION ALONG TRANSMISSION LINES, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 6, June. 1969, pp. 910-919.
- [12] F. Dawalibi and G. Niels, MEASUREMENTS AND COMPUTATIONS OF FAULT CURRENT DISTRIBUTION ON OVERHEAD TRANSMISSION LINES, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 3, March. 1984, pp. 533-560.
- [13] H. Goci and S. Sebo, DISTRIBUTION OF GROUND FAULT CURRENT ALONG TRANSMISSION LINES - AN IMPROVED ALGORITHM, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 3, March. 1985, pp. 663-669.
- [14] Lj. Popovic, DISSIPATING OF THE PARTIAL GROUND FAULT CURRENT ACROSS THE SHIELD WIRES OF TRANSMISSION LINES, Electronic Power Systems Research, Vol. 11, No. 1, August 1986, pp. 25-37.
- [15] Lj. Popovic, GENERAL EQUATIONS OF THE LINE REPRESENTED BY DISCRETE PARAMETERS, PART I - STEADY STATE, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, Jan. 1991, pp. 295-301.
- [16] Lj. Popović, PRACTICAL METHOD FOR EVALUATING GROUND FAULT CURRENT DISTRIBUTION IN STATION, TOWERS AND GROUND WIRE, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [17] Lj. Popović, MESTA ZEMLJOSPOJEVA PRI KOJIMA SE JAVLJAJU NAJVEĆE STRUJE KOJE OPTEREĆUJU UZEMLJIVAČE TS X/110kV/kV I TS 110/X kV/kV, CIGRE Beograd- 1981. R23-10.
- [18] Lj. Popović, PRACTICAL METHOD FOR EVALUATING GROUND FAULT DISTRIBUTION IN STATION SUPPLIED BY AN UNHOMOGENEOUS LINE, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997.
- [19] Lj. Popović, A DIGITAL FAULT-LOCATION ALGORITHM TAKING INTO ACCOUNT THE IMAGINARY PART OF THE GROUNDING IMPE-

DANCE AT THE „Fault Place” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, No. 4, October 2003.  
[20] Lj. Popović, A PRACTICAL METHOD FOR EVALUATION OF GROUND FAULT DISTRIBUTI-

ON ON DOUBLE CIRCUIT PARALLEL LINES, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000.

Rad je primljen u uredništvo 10. 05. 2004. godine



**Ljubivoje M. Popović** je rođen 1944. godine u Markovcu kod Mladenovca. Na Energetskom odseku Elektrotehničkog Fakulteta u Beogradu diplomirao je 1969. i magistrirao 1983. godine. Doktorsku tezu na istom fakultetu odbranio je 1991. godine. Po diplomiranju zaposlio se u tadašnjem Projektnom birou „Elektrodistribucije Beograd”. Posle nepunih deset godina bavljenja projektovanjem različitih energetskih objekata u distributivnoj mreži prešao je u Sektor za tehnički razvoj i istraživanje „Elektrodistribucije Beograd”, gde se i sada nalazi na mestu Šefa službe za interne standarde. Godine 1999. izabran je za docenta na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu sa nepunim radnim vremenom, za oblast Elektroenergetski sistemi.

Istraživački rad dr Popovića usmeren je uglavnom na uzemljenja elektroenergetskih postrojenja i struje kratkih spojeva. Do sada je objavio ukupno 68 naučnih i stručnih radova, od kojih 38 u časopisima (20 u međunarodnim i 18 u domaćim) i 30 na konferencijama (13 na međunarodnim i 17 na domaćim). Deset od ukupnog broja njegovih radova objavljeno je u časopisu IEEE „Transactions on Power Delivery” koji se u svetu smatra vodećim za prenos i distribuciju električne energije. Na osnovu svojih radova dr Popović je 1991. godine izabran u rang „Senior Member” u međunarodnoj inženjerskoj organizaciji IEEE.

# Modifikovani Furijeov algoritam za merenje osnovnog harmonika signala

Stručni rad  
UDK: 621.3.018.3; 621.3.014.33

---

## Rezime:

U radu je razvijen algoritam za merenje osnovnog harmonika signala (napona ili struje) zasnovan na Furijeovoj metodi. Furijeova metoda je dobro poznata i široko primenjena u obradi signala. Metoda je veoma robusna i poseduje dobra filtarska svojstva, ali ima i neke mane. Jedna od ozbiljnih mana metode je neophodnost poznavanja frekvencije signala pre njegove obrade. Ako frekvencija stvarnog signala odstupa od pretpostavljene frekvencije signala u Furijeovoj metodi, Furijeov algoritam čini grešku pri izračunavanju amplituda harmonijskih komponenti signala. U radu je nerekurzivni Furijeov algoritam modifikovan tako da promena frekvencije signala u opsegu od nekoliko Hz (što je za merenja signala industrijske učestalosti dovoljno) malo utiče na tačnost određivanja amplitude osnovnog harmonika signala. Algoritam je testiran pomoću kompjuterski generisanih signala. Dobijeni su veoma dobri rezultati.

**Ključne reči:** merenje napona i struje, Furijeova metoda, relejna zaštita

---

## Abstract:

### MODIFIED FOURIER ALGORITHM FOR THE FIRST HARMONIC MEASUREMENT OF THE PERIODIC SIGNALS

In this paper, a modified Fourier algorithm for the first harmonic measurement of the periodic signals is presented. The Fourier algorithm is very well known and widely applied in signal processing. It is very robust and has good digital filter features. But, the Fourier algorithm requests that the signal frequency must be equal to assumed frequency in the algorithm. If these frequencies are different, the output of Fourier algorithm is not accurate. In this paper the Fourier algorithm is modified so that it not be sensitive on signal frequency changes. The rate of signal frequency changes is defined so that outputs of the Fourier algorithm have acceptable accuracy.

**Key words:** measurement, voltage, current, Fourier algorithm, protection relaying

---

## 1. UVOD

Određivanje parametara periodičnih signala primenom diskretizovanog Furijeovog reda obrađeno je u brojnoj literaturi. Kompletno izvođenje koeficijentata Furijeovog reda, njihova diskretizacija i

primena za određivanje parametara procesiranog signala, odnosno za određivanje fazora pojedinih harmonika procesiranog signala detaljno je obrađena u [1] koja je pristupačna svakom inženjeru. Zbog toga se, radi uštede prostora, taj deo teorije vezane za diskretizovan Furijeov red ovde ne ponavlja

---

Prof. dr Milenko B. Đurić, dipl. ing. – Elektrotehnički fakultet Beograd, 11 000 Beograd, Bulevar Kralja Aleksandra 73

(onaj ko još nije familjarizovan sa Furijeovim redom upućuje se na [1]. Navođenje šire literature o Furijeovom redu je u ovom slučaju potpuno nepotrebno, jer je on svuda obrađen na isti ili veoma sličan način).

Posmatrajmo signal oblika:

$$x(t) = C \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Parametri signala su:

$C$  -maksimalna vrednost,  
 $\omega$  -ugaona frekvencija i  
 $\varphi$  -početna faza.

Ako je tačna vrednost kružne frekvencije ( $\omega$ ) nepoznata i aproksimirana pretpostavljenom vrednošću  $\omega_f$ , primenom DISKRETIZOVANOG Furijeovog reda mogu se lako odrediti procene parametara  $C \cong C_f$  i  $\varphi \cong \varphi_f$  primenom relacije [1]:

$$\underline{X} = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^m x_n \cos \frac{\omega_f T_f n}{m} - j \sum_{n=1}^m x_n \sin \frac{\omega_f T_f n}{m} = A_f - jB_f, \quad (2)$$

gde su:

$$C_f^2 = A_f^2 + B_f^2, \quad \tan \varphi_f = \frac{B_f}{A_f},$$

$m$  - broj odbiraka u periodu  $T_f$  (perioda koja odgovara frekvenciji  $\omega_f$ ),

$\omega_f$  - pretpostavljena frekvencija u Furijeovom redu (ako želimo da (2) da tačan rezultat mora biti  $\omega_f = \omega$ ),

$x_n$  -  $n$ -ti odbirak signala.

Signal koji se procesira pomoću (2) treba odabrati sa periodom odabiranja  $T_{odab} = \frac{T_f}{m}$ , odnosno frekvencijom odabiranja  $f_{odab} = \frac{m}{T_f}$ . Kako je  $\omega_f T_f = 2\pi$ , to je ugao  $\frac{\omega_f T_f}{m} = \alpha_f$   $m$ -ti deo punog kruga. To znači da je pretpostavljena frekvencija signala u Furijeovoj metodi definisana periodom odabiranja  $T_{odab}$  i brojem odbiraka signala ( $m$ ) u periodu. Kada je perioda odabiranja fiksirana pretpostavljena učestanost signala  $\omega_f$  može se promeniti jedino promenom broja odbiraka u periodu. Međutim, ta promena je veoma gruba za relativno mali broj odbiraka u periodu. Zbog toga se u većini praktičnih slučajeva radi sa fiksnom pretpostavljenom frekvencijom procesiranog signala. Postoje procesori kod kojih se može menjati perioda odabiranja, ali ta promena nije kontinualna te nije moguće pratiti kontinualne promene učestanosti

stvarnog signala pri njegovoj obradi Furijeovom metodom.

Relacija (2) daje obrtni fazor signala (1) [1]. Kada se obrađuje dugotrajan signal nakon obrade svakog „prozora“ podataka koji sadrži ( $m$ ) odbiraka dobijaju se vrednosti za realnu ( $A_f = A_{Mf} \cos \omega t$ ) i imaginarnu ( $B_f = B_{Mf} \sin \omega t$ ) komponentu fazora  $\underline{X}$ . Ako je  $\omega = \omega_f$  komponenta  $A_f$  menja se po kosinusu a komponenta  $B_f$  po sinusu. Pri tome su amplitude obe komponente jednake  $A_{Mf} = B_{Mf} = C_f = C$ . Vrh fazora  $\underline{X}$  opisuje krug u kompleksnoj ravni a njegova amplituda je konstantna, jer je:

$$A_f^2 + B_f^2 = A_{Mf}^2 \cos^2 \omega t + B_{Mf}^2 \sin^2 \omega t = C_f^2 \cos^2 \omega t + C_f^2 \sin^2 \omega t = C_f^2 = C^2.$$

Ako je  $\omega < \omega_f$  komponenta  $A_f$  menja se po kosinusu a komponenta  $B_f$  po sinusu sa frekvencijom ( $\omega$ ), bez obzira što je u Furijeovom redu pretpostavljena frekvencija ( $\omega_f > \omega$ ). Pri tome su amplitude obe komponente različite  $A_{Mf} < C$  i  $B_{Mf} > C$ . Vrh fazora  $\underline{X}$  opisuje elipsu u kompleksnoj ravni a njegova amplituda osciluje između  $A_{Mf}$  i  $B_{Mf}$  sa frekvencijom  $2\omega$ , jer relacije:

$A_f = A_{Mf} \cos \omega t$  i  $B_f = B_{Mf} \sin \omega t$  definišu jednačinu elipse u parametarskom obliku.

Ako je  $\omega > \omega_f$  amplitude obe komponente su različite  $A_{Mf} > C$  i  $B_{Mf} < C$ . Vrh fazora  $\underline{X}$  opisuje elipsu u kompleksnoj ravni a njegova amplituda osciluje između  $A_{Mf}$  i  $B_{Mf}$  sa frekvencijom  $2\omega$ .

## 2. RAZVOJ ALGORITMA ZA MERENJE AMPLITUDE OSNOVNOG HARMONIKA

Na osnovu analize date u prethodnom odeljku može se zaključiti da Furijeov algoritam netačno određuje amplitudu osnovnog harmonika kada frekvencija signala odstupa od pretpostavljene frekvencije u algoritmu (2). Kada se signal kontinualno obrađuje, amplituda osnovnog harmonika osciluje između maksimalne i minimalne vrednosti sa frekvencijom  $2\omega$ . Ova činjenica je iskorišćena za modifikaciju Furijeovog algoritma za merenje osnovnog harmonika signala. Kako amplituda osnovnog harmonika osciluje sa  $2\omega$ , za dobijanje boljih rezultata dovoljno je vršiti usrednjavanje rezultata na periodu dužine jedne poluperiode osnovnog harmonika. Drugim rečima, ako se signal obrađuje sa ( $m$ ) tačaka u periodu osnovnog harmonika dovoljno je naći srednju vrednost ( $\frac{m}{2}$ ) rezultata. Ovo usrednjavanje izaziva kašnjenje konačnog rezultata obrade signala

od jedne poluperiode osnovnog harmonika. Međutim, svako filtriranje izaziva kašnjenje rezultata, te se mora prihvatiti kompromis između stepena filtriranja i kašnjenja rezultata obrade signala.

Kada je frekvencija signala različita od pretpostavljene frekvencije u Furijeovom algoritmu ( $\frac{m}{2}$ ) odbiraka ne definiše tačno poluperiodu osnovnog harmonika, te rezultat usrednjavanja nije konstantan, već i on osciluje sa  $2w$ , ali sa znatno manjom amplitudom u odnosu na rezultat algoritma bez usrednjavanja. Oscilovanje srednje vrednosti može se smanjiti ako se izvrši još jedno usrednjavanje srednjih vrednosti, takođe na periodu jednakom polovini periode osnovnog harmonika. Ovo usrednjavanje unosi dodatno kašnjenje od jedne poluperiode osnovnog harmonika. Ukupno kašnjenje algoritma sa dva usrednjavanja jednako je periodu osnovnog harmonika. Dvostruko usrednjavanje daje veoma „mirnu“ vrednost amplitude sa veoma malom greškom, ako se frekvencija obrađivanog signala menja u opsegu od 47 Hz do 53 Hz, što je za potrebe merenja u elektroenergetici sasvim dovoljan opseg, jer frekvencija u elektroenergetskom sistemu retko odstupa za više od 3 Hz u odnosu na 50 Hz. Kašnjenje od jedne periode je prihvatljivo za sve strujne i naponske releje, te je algoritam primenljiv u relejnoj zaštiti. Za praktičnu primenu relacije (2) potrebno je formirati pomoćne vektore kosinusa, sinusa i odbiraka dužine ( $m$ ) i pomoćne vektore rezultata i srednjih vrednosti rezultata dužine ( $\frac{m}{2}$ ). Vektor kosinusa je:

$$CO = \left[ \frac{2}{m} \cos \frac{f T_f}{m}, \frac{2}{m} \cos \frac{f T_f}{m} 2, \frac{2}{m} \cos \frac{f T_f}{m} 3, \dots, \frac{2}{m} \cos \frac{f T_f}{m} (m-1), \frac{2}{m} \right]^T, \quad (3)$$

vektor sinusa je:

$$SI = \left[ \frac{2}{m} \sin \frac{f T_f}{m}, \frac{2}{m} \sin \frac{f T_f}{m} 2, \frac{2}{m} \sin \frac{f T_f}{m} 3, \dots, \frac{2}{m} \sin \frac{f T_f}{m} (m-1), 0 \right]^T, \quad (4)$$

a vektor odbiraka je:

$$ODB = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]^T. \quad (5)$$

Primenom pomoćnih vektora  $CO$  i  $SI$  izračunavanja u relaciji (2) svode se samo na množenja i sabiranja, bez izračunavanja trigonometrijskih funkcija i deljenja, što jako ubrzava dobijanje rezultata. Nakon uzimanja svakog novog odbirka  $x_{novo}$  treba

izvršiti aktualizaciju vektora (5) tako da se izvrši preindeksiranje njegovih članova na sledeći način:

$$x_1 \ x_2, \ x_2 \ x_3, \ \dots, \ x_m \ x_{novo}.$$

Tako se dobija „klizeći“ prozor a odbirci signala tretiraju se kao skalari. Za svaki prozor podataka relacija (2) daje  $A_f$  i  $B_f$ , te je:

$$C_f = \sqrt{A_f^2 + B_f^2}. \quad (6)$$

Za određivanje srednje vrednosti amplitude prvog harmonika signala treba formirati pomoćni vektor dužine ( $\frac{m}{2}$ ):

$$CP = [C_{f1}, C_{f2}, C_{f3}, \dots, C_{f \frac{m}{2}}]^T. \quad (7)$$

Nakon izračunavanja nove vrednosti amplitude pomoću (2) i (6) treba aktualizovati vektor (7) prenumeracijom članova, odbacivanjem prvog člana i dodavanjem nove vrednosti, odnosno:

$$C_{f1} \ C_{f2}, \ C_{f2} \ C_{f3}, \ \dots, \ C_{f \frac{m}{2}} \ C_{fnovo}.$$

Nakon ove procedure nađe se:

$$CS = \left[ \frac{2}{m} C_{f1}, C_{f2}, \dots, C_{f \frac{m}{2}} \right]. \quad (8)$$

Postupak dalje teče na isti način za svaku novu vrednost amplitude.

Za usrednjavanje srednjih vrednosti amplituda osnovnog harmonika treba formirati pomoćni vektor srednjih vrednosti dužine ( $\frac{m}{2}$ ):

$$CSP = [CS_1, CS_2, CS_3, \dots, CS_{\frac{m}{2}}]^T. \quad (9)$$

Nakon izračunavanja nove srednje vrednosti amplitude pomoću (8) treba aktualizovati vektor (9) prenumeracijom članova, odbacivanjem prvog člana i dodavanjem nove vrednosti, odnosno:

$$CS_1 \ CS_2, \ CS_2 \ CS_3, \ \dots, \ CS_{\frac{m}{2}} \ CS_{novo}$$

Nakon ove procedure nađe se:

$$CSS = \left[ \frac{2}{m} CS_1, CS_2, \dots, CS_{\frac{m}{2}} \right].$$

Postupak dalje teče na isti način za svaku novu vrednost srednje vrednosti amplitude.

Za praktičnu primenu modifikovanog Furijeovog algoritma potrebna su tri vektora dužine ( $m$ ) i dva vektora dužine ( $\frac{m}{2}$ ), što znači da su potrebni veoma mali memorijski resursi. Algoritam je jednostavan i dovoljno brz za primenu u relejnoj zaštiti.

### 3. TESTIRANJE ALGORITMA

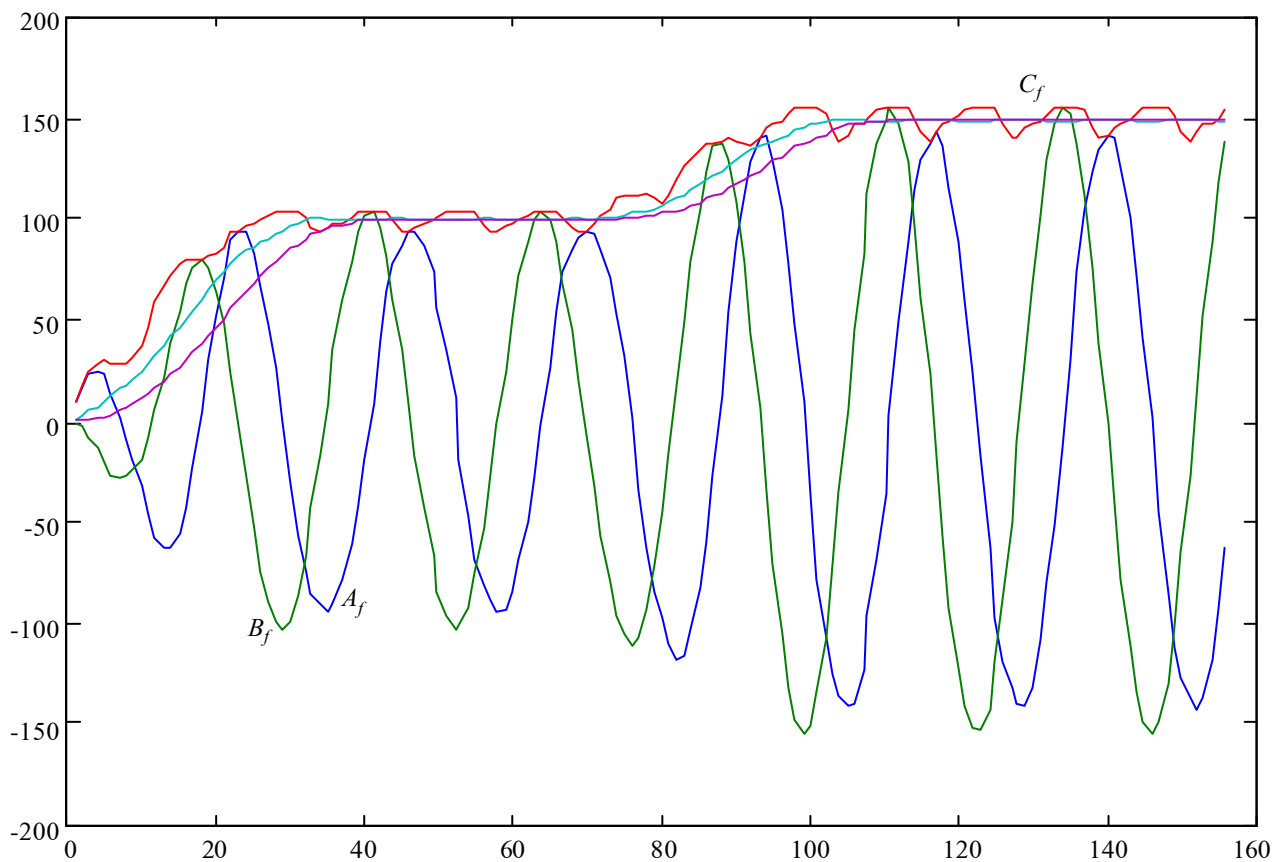
Prikazani algoritam testiran je pomoću računarski generisanih signala, poznate amplitude i frekvencije i poznatog sadržaja viših harmonika. Da se rad ne bi preopteretio slikama, prikazani su rezultati algoritma za tri signala. Svi signali imali su sledeći sadržaj komponenti u procentima (u odnosu na osnovni harmonik): osnovni 100 i 150, treći 20 % i peti 20 %. Svaki signal na polovini svog trajanja naglo menja amplitudu osnovnog harmonika sa 100 na 150 da bi se mogla proveriti konvergencija rezultata pri naglim promenama signala. Signali su se međusobno razlikovali po frekvenciji osnovnog harmonika. Signali od prvog do trećeg imali su redom frekvencije osnovnog harmonika od 47 Hz, 53 Hz i 50 Hz. Rezultati algoritma prikazani su na narednim slikama. Pretpostavljena frekvencija u Furijeovom algoritmu bila je 50 Hz, a broj odbiraka u prozoru procesiranog signala 22. Drugim rečima, perioda odabiranja bila je  $1/mf_f = 1/22 \cdot 50 = 0,99999 \text{ ms}$ . Broj odbiraka u periodu nije kritičan. Dobri rezultati dobijaju se sa brojem odbiraka po periodu od 10 do 40. Sve slike sadrže realnu i imaginarnu komponentu osnovnog harmonika signala, neusrednjenu, jed-

nom usrednjenu i dva puta usrednjenu vrednost amplitude osnovnog harmonika.

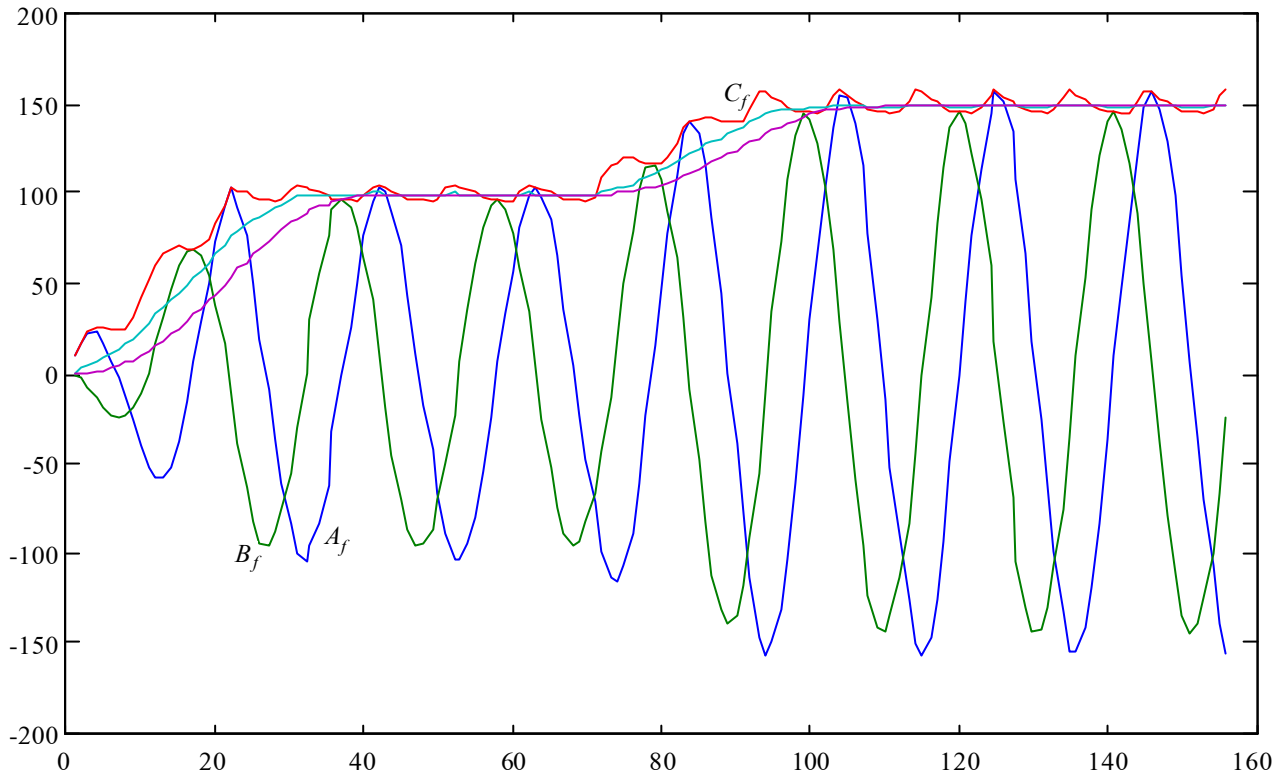
Na slici 1 prikazani su rezultati za signal sa frekvencijom osnovnog harmonika od 47 Hz. U ovom slučaju je  $w < w_f$ , te su  $A_{Mf} < 100$  i 150 i  $B_{Mf} > 100$  i 150. Neusrednjena vrednost amplitude osnovnog harmonika osciluje između 93,25 i 103,55, odnosno 139,5 i 155,4, što znači da greška pri određivanju amplitude osnovnog harmonika leži u opsegu od -6,8 % i +3,55 %. Dva puta usrednjena vrednost amplitude osnovnog harmonika osciluje između 99,41 i 99,45, odnosno 149,11 i 149,18, tako da greška leži u opsegu -0,59 % i -0,55 %.

Pri promeni signala najbrže konvergira neusrednjena vrednost amplitude ali zadržava velike oscilacije. Dva puta usrednjena amplituda kasni najviše (jednu periodu signala) ali zato ima skoro konstantnu vrednost.

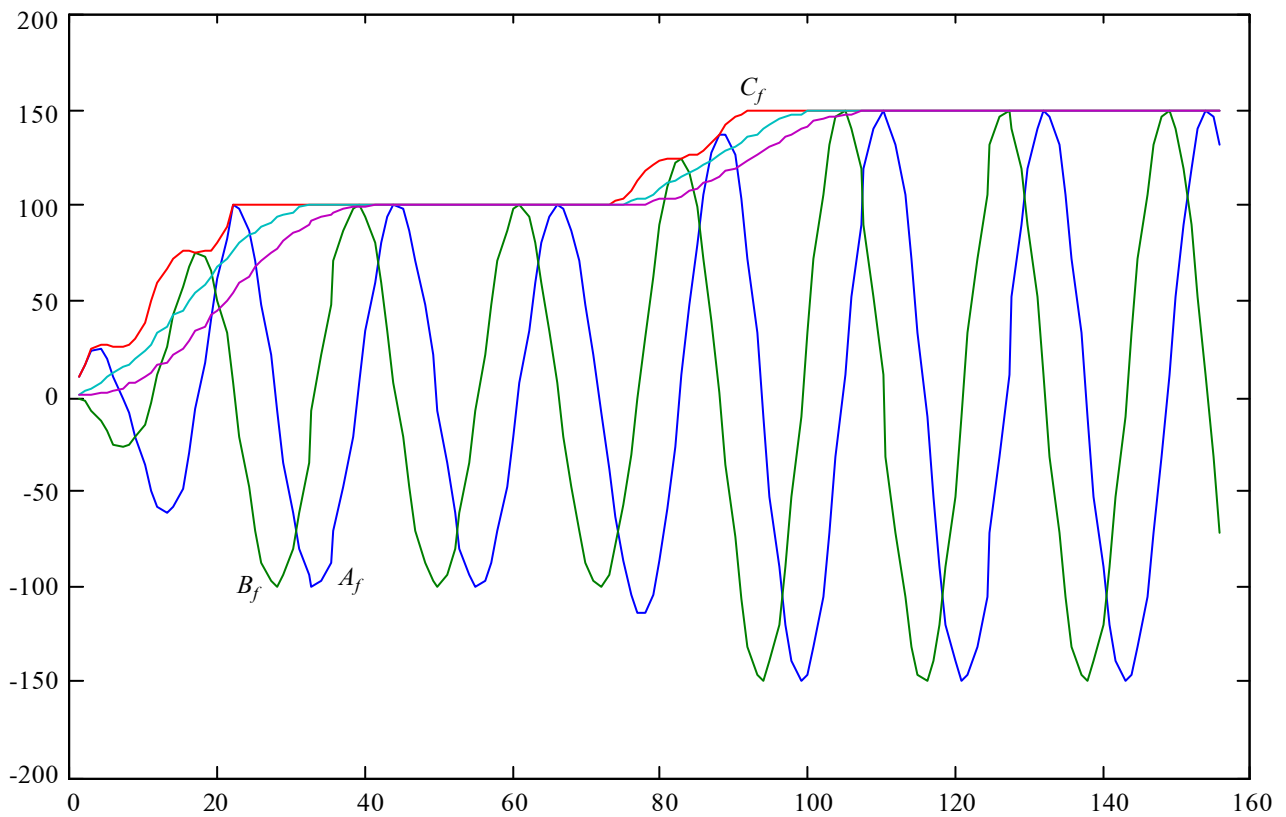
Na slici 2 prikazani su rezultati za signal sa frekvencijom osnovnog harmonika od 53 Hz. U ovom slučaju je  $w > w_f$ , te su  $A_{Mf} > 100$  i 150 i  $B_{Mf} < 100$  i 150. Neusrednjena vrednost amplitude osnovnog harmonika osciluje između 96,11 i 105,27, odnosno 143,6 i 157,9, što znači da greška sa kojom algoritam određuje amplitudu osnovnog harmonika leži u



Slika 1. Realna i imaginarna komponenta, neusrednjena, jednom i dva puta usrednjena amplituda osnovnog harmonika frekvencije 47Hz



Slika 2. Realna i imaginarna komponenta, neusrednjena, jednom i dva puta usrednjena amplituda osnovnog harmonika frekvencije 53Hz



Slika 3. Realna i imaginarna komponenta, neusrednjena, jednom i dva puta usrednjena amplituda osnovnog harmonika frekvencije 50Hz

opsegu od -3,89 % i +5,27 %. Dva puta usrednjena vrednost amplitude osnovnog harmonika osciluje između 99,42 i 99,45, odnosno 149,13 i 149,19, tako da greška leži u opsegu -0,58 % i -0,55 %.

Na slici 3 prikazani su rezultati za signal sa frekvencijom osnovnog harmonika od 50 Hz. U ovom slučaju je  $w = w_f$ , te su  $A_{Mf} = 100$  i  $150$  i  $B_{Mf} = 100$  i  $150$ . Neusrednjena, jednom usrednjena i dva puta usrednjena amplituda osnovnog harmonika su konstantne i iznose 100 i 150, odnosno algoritam osnovni harmonik izračunava bez greške.

Na osnovu prikazanih rezultata može se izvući zaključak da Furijeov algoritam sa dvostrukim usrednjavanjem izračunava amplitudu osnovnog harmonika, pri odstupanju frekvencije u opsegu od 47 Hz do 53 Hz, sa greškom manjom od -0,6 %. Bez usrednjavanja greška algoritma za iste uslove je do 6,8 %. Proces dvostrukog usrednjavanja grešku smanjuje preko deset puta. Furijeov algoritam sa dvostrukim usrednjavanjem, pri odstupanju frekvencije procesiranog signala od pretpostavljene, uvek ima malu negativnu grešku, odnosno daje malo manju amplitudu od stvarne.

#### 4. ZAKLJUČAK

*Furijeov nerekurzivni algoritam, uz dodatak dvostrukog usrednjavanja, izračunava amplitudu procesiranog signala frekvencije različite od pretpostavljene sa greškom manjom od 0,6%, ako frekvencija leži u opsegu 47 Hz do 53 Hz. Ovo je tačnost koja omogućava da se algoritam upotrebi u mernim uređajima i zaštitnim digitalnim relejima. Brzina algoritma pri izračunavanju je dovoljna za njegovu primenu u relejnoj zaštiti, jer proces dvostrukog usrednjavanja ne zahteva mnogo računskih operacija. Sa priloženih slika vidi se da algoritam pri promeni vrednosti amplitude signala konvergira monotono, bez preskoka, ka novoj vrednosti, što ga preporučuje za primenu u relejnoj zaštiti. Algoritam je primenljiv i za digitalne merne instrumente za merenje osnovnog harmonika signala.*

#### 5. LITERATURA

[1] M. Đurić, „Relejna zaštita”, Beopres, Beograd, 2003.

Rad je primljen u uredništvo 27. 02. 2004. godine



*Milenko B. Đurić rođen je u Sarajevu 1948. godine. Elektrotehnički fakultet u Beogradu završio je 1973, 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.*



---

Žarko Markov

# Procena uticaja smetnji na kvalitet telefonskih veza u paketskoj mreži Elektroprivrede Srbije

Stručni rad  
UDK: 621.391.82; 621.39

---

Rezime:

*U radu se procenjuje uticaj smetnji poteklih iz energetskog sistema na kvalitet paketizovanog telefonskog signala u budućoj telefonskoj mreži Elektroprivrede Srbije. Ove smetnje utiču na kvalitet telefonskog signala preko izgubljenih paketa. Za procenu se koriste: rezultati merenja stepena greške bita u nekim elektroprivrednim mrežama, Gilbert-Eliotov model kanala sa greškama i proračunski E model. Pokazuje se da će uticaj smetnji biti potpuno zanemarljiv u svim slučajevima izuzev u najnepovoljnijem slučaju kada se nekomprimovani govorni signal prenosi sa pauzama, najdužim uzorcima govora (30ms) a ne koristi se postupak za nadoknadu izgubljenih paketa. Smanjenje kvaliteta govornog signala je u ovom slučaju nešto manje od 1%.*

**Ključne reči:** IP telefonija, gubitak paketa, E-model

---

Abstract:

**ESTIMATION OF TELEPHONE SPEECH SIGNAL IMPAIRMENT DUE TO DISTURBANCES OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY OF SERBIA INFORMATION PROTOCOL IN NETWORK**

*The telephone speech signal impairment in future Information protocol network of Serbian Electric Power Industry (EPS) is estimated in this short paper. The impairment of speech signal is caused by the lost packets carrying speech signal payload. The packet loss is caused by the disturbances in power system. In the estimation method we use measurement results in some electric power networks, Gilbert-Elliott model of channel with errors and computational E model. The impact of packet loss is negligible in all cases except the extremely unfavourable one. This is the case with uncompressed speech signal with pauses, with longest speech samples (30ms) and without packet loss concealment. The speech signal impairment in this case is slightly less than 1%.*

**Key words:** IP telephony, packet loss, E-model

---

## 1. UVOD

Dva osnovna svojstva elektroprivrednih telekomunikacija su prisustvo smetnji izazvanih energetskim sistemom i visoki stepen zahtevane raspoloživosti. Usklađivanje ova dva svojstva oduvek je predstavljalo veliki izazov za projektante elektroprivrednih

vrednih telekomunikacionih mreža. Ipak, čini se da je taj izazov veći danas nego ranije. Naime, tehnike komutacije kola i/ili kanala sa jednostavnijim i, na smetnje, otpornijim signalnim postupcima su doprinosele da se smetnje uglavnom osećaju kao povećani šum. Do pojave digitalne tehnike, smetnje, uglavnom, nisu uticale na postupke ostvarivanja veza. Sa

---

Prof. dr Žarko Markov, dipl. ing. – Iritel, 11 080 Zemun, Batajnički put 23

pojavom digitalne tehnike greške u signalnom postupku mogu biti izazvane i neznatnom smetnjom. Smetnje u govornoj fazi su manje izražene u tehnici digitalnih kanala nego u analognoj tehnici.

Paketska telekomunikaciona tehnika, popularno nazvana IP tehnika, tj. njena primena u telefonskoj tehnici je donela nekoliko suštinskih promena. Prva je da se neka vrsta adresiranja tj. signalnog postupka provodi sve vreme veze jer je adresna informacija pridružena svakom paketu. To znači da smetnja može ugroziti adresnu informaciju i u toku veze a ne samo na njenom početku. Drugo svojstvo paketske telefonske tehnike je da se kvalitet govornog signala, koji se šalje od govornika do slušaoca, može ugroziti postupcima i pojavama koje do tada nisu izazivale smetnje. To su: značajno povećano kašnjenje signala kroz paketsku mrežu, odjek, gubitak paketa, kompresija i višestruka kompresija govornog signala, itd. Jedan od ovih činilaca, gubitak paketa sa govornim sadržajem, koji će biti posmatran u ovom radu, je posebno interesantan u elektroprivrednim telekomunikacijama. Naime, gubici paketa sa govornim sadržajem mogu biti izazvani smetnjama uzrokovanim tzv. manipulacijama ili drugim pojavama koje su svojstvene samo energetske mreže. S druge strane, neki postupci prenosa govornog signala u paketskoj telefonskoj tehnici su veoma osetljivi na gubitke paketa. Cilj ovog rada je, dakle, da se proceni u kojoj će meri prenos telefonskog signala u paketskom obliku biti oštećen gubitkom paketa (zbog smetnji) u budućoj telefonskoj mreži EPS-a.

## 2. PAKETSKA TELEFONSKA MREŽA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE

Saglasno idejnom projektu telefonske mreže EPS-a, [1], ova mreža će koristiti i paketsku mrežu za ostvarivanje telefonskih veza. Predviđeno je da se paketskom tehnikom prenosi nekomprimovani (G.711) ili kvazikomprimovani (tj. bez pauza, G.711+VAD, *Voice Activity Detector*) govorni signal. Kao što je uobičajeno, govorni signal se prenosi internet paketima čiji je transportni protokol UDP (*User Datagram Protocol*, [2]) a protokol za prenos uzoraka govornog signala je RTP (*Real time Transport Protocol*, [3]). Ovaj protokol je pogodan za prenos govornog signala zbog jednostavnosti tj. brzine ali su zbog toga mogući gubici paketa bez postupka retransmisije.

Paketi koji nose signalnu informaciju za ostvarenje veze se mogu prenositi na dva načina. Prvi je, skoro po pravilu, transportnim protokolom TCP (*Transmission Control Protocol*, [4]) koji otkriva greške u prenosu i vrši retransmisiju. Naime, u zaglavlju TCP paketa postoje polja: redni broj (*reference number*), potvrda (*acknowledgment*) i bit potvrde (*ACK*) koja se koriste u mehanizmu otkrivanja

gubitka paketa i njihovog ponovnog prenosa tj. retransmisije. Ovaj mehanizam je poznat još od prvih paketskih tehnika kao što je X.25. Drugi način prenosa signalnih paketa je korišćenje protokola RTP (koji dozvoljava greške) ali i više(tro)strukog prenosa istog paketa. Ovaj mehanizam poznat iz FR (*Frame Relay*) tehnike pokazuje vrlo dobre rezultate. Naime, da bi se izgubila signalna informacija potrebno je da se izgube tri uzastopna paketa, što je praktično nemoguće ako se znaju realne vrednosti stepena grešaka u prenosu.

Za naše razmatranje je važno reći da tzv. RTP paket koji nosi govorni uzorak ima u svom sastavu od  $N_{min} = 120$  do  $N_{max} = 310$  okteta (od  $N_{bmin} = 960$  do  $N_{bmax} = 2480$  bita) zavisno od vremena govornog uzorka (od 10 ms do 30 ms pri bitskom protoku 64 kb/s) i vrste zaglavlja (ether-net+IP+UDP+RTP ili samo IP+UDP+RTP).

## 3. SMETNJE U MREŽI ELEKTROPRIVREDE SRBIJE

Smetnje u elektroprivrednim telekomunikacionim mrežama su, zbog svoga značaja, predmet pažnje od uvođenja ovih mreža u rad. Izvršena su brojna merenja i objavljen je veći broj radova koji opisuju ove smetnje. U ovom radu će se koristiti podaci o smetnjama koji su izneti u radu [5] a to je, ustvari, skup rezultata merenja u elektroprivrednim mrežama nekoliko zemalja. Rezultati rada [5] su iskorišćeni da se napravi model smetnji na digitalnim i signalnim kanalima EPS-ove telekomunikacione mreže, [6]. Po ovom modelu, koji je sačinjen po ugledu na *Gilbert - Eliotov* model, telekomunikacioni kanal se može naći u jednom od dva stanja u pogledu prirode i veličine grešaka u prenosu, slika 1.

Stanje visokog stepena grešaka u prenosu,  $B$  (*Bad*), se retko pojavljuje i kraćeg je trajanja. Trajanje ovog intervala je slučajna veličina  $T_b$  čija je srednja vrednost  $t_b$ . Verovatnoća pogrešnog bita u ovom intervalu je  $BER_b$ , a verovatnoća prebivanja kanala u ovom stanju je  $P_b$ .

Drugo je stanje niskog stepena grešaka,  $G$  (*Good*). Trajanje ovog stanja je, takođe, slučajna veličina,  $T_g$ , čija je srednja vrednost  $t_g$ , a verovatnoća prebivanja kanala u ovom stanju je  $P_g$ .

Prema [5] i [6], sledeće vrednosti određuju model kanala u elektroprivrednim telekomunikacionim mrežama:

$$t_b = 0,74 \text{ s}; t_g = 9,23 \text{ h}; 0,05 \leq BER_b \leq 0,4; \\ 10^8 \leq BER_g \leq 10^7; P_b = 0,0000223; P_g = 1 - P_b$$

Merenja čiji su rezultati predstavljeni u [5] su izvršena za sasvim male vrednosti bitskih protoka

(600b/s i 1 200b/s). Danas su vrednosti protoka znatno veće ali za ove protoke nemamo rezultate merenja grešaka. Zbog toga usvajamo pretpostavku da se vrednosti stepena greške bita ne menjaju sa promenom bitskog protoka. Ova pretpostavka takođe predstavlja pretpostavku najgoreg slučaja.

Sada se može izračunati vrednost verovatnoće gubitka paketa u stanjima  $B$  i  $G$  tj.  $PER_b$  i  $PER_g$  (Packet Error Rate) ali samo za najgori slučaj tj. za najduže govorne pakete, poglavlje 2.

$$PER_{bmax} = 1 - (1 - BER_{bmax})^{Nb_{max}} \gg 1 \quad (1)$$

$$PER_{gmax} = 1 - (1 - BER_{gmax})^{Nb_{max}} \gg BER_{gmax} Nb_{max} \gg 0,00025 \quad (2)$$

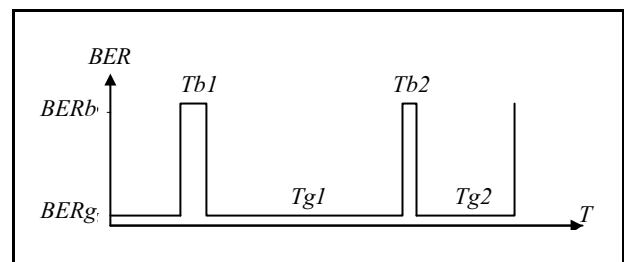
Srednja vrednost verovatnoće gubitka paketa za najgori slučaj dugih paketa je

$$PER_{max} = P_b PER_{bmax} + P_g PER_{gmax} \gg 0,00027 \quad (3)$$

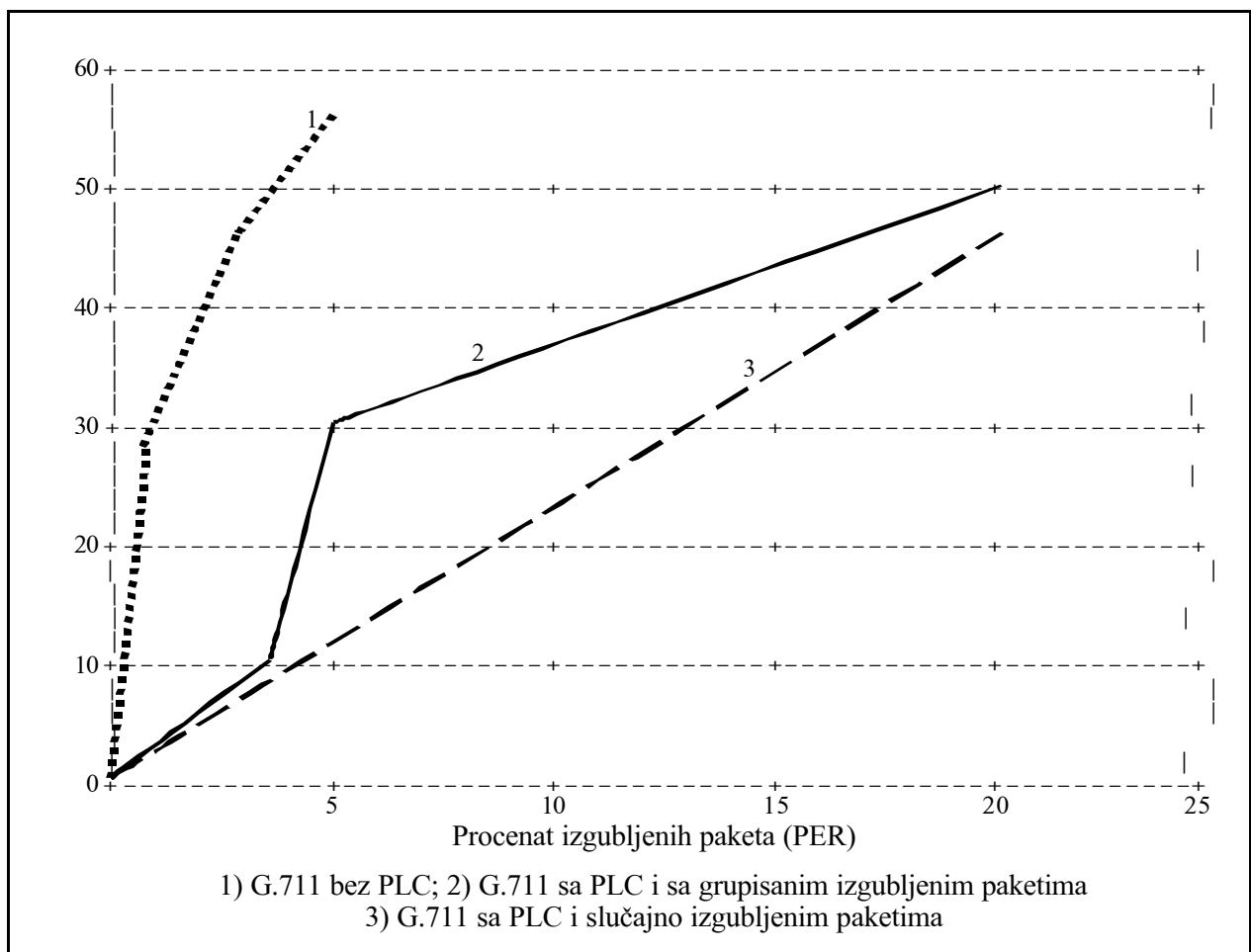
tj. praktično je jednaka verovatnoći gubitaka u stanju niskog stepena greške bita.

#### 4. GUBICI PAKETA I KVALITET GOVORNOG SIGNALA

Gubici paketa imaju dva uzroka. Jedan su nedovoljno veliki baferi za pakete u čvorovima paketske mreže uključujući i bafer za izgladivanje promenljivog kašnjenja paketa - džitera na prijemnoj strani. (Ovaj bafer se često naziva izgladivački ili *de jitter* bafer). Jasno je da se dobrim proračunom mrežnih resursa (ali i povećanjem kašnjenja) gubici paketa zbog ovog uzroka mogu smanjiti na zanemarljivu meru.



Slika 1. Model kanala sa greškama



Slika 2. Uticaj gubitka paketa na kvalitet govornog signala

Drugi razlog gubitka paketa je njihovo odbacivanje zbog neispravnosti koja je izazvana smetnjama u prenosu. U našem razmatranju je interesantno odrediti uticaj samo ove komponente gubitaka paketa na kvalitet paketizovanog govornog signala jer ona ne postoji u drugim korporacijskim mrežama a i ne može se smanjiti jeftinim sredstvima.

Ukoliko je deo izgubljenih paketa takav da značajno ugrožava kvalitet veza tada se koriste postupci za nadoknadu izgubljenih paketa, PLC (*Packet Loss Concealment*).

Uticaj gubitka paketa na kvalitet govornog signala na prijemu se određuje pomoću tzv. E modela koji služi za ocenu uticaja okoline, postupaka i prenosnog medija na kvalitet (paketske) telefonske veze, [7]. U ovom modelu se određuju činioci (*Impairment factor*) koji umanjuju kvalitet veze izražen činiocem kvaliteta veze,  $R$  (*Rating factor*). Kvalitet idealne veze ima vrednost  $R \gg 94$ . Zavisnost činioca,  $I_{el}$ , koji umanjuje kvalitet veze zbog gubitaka paketa od procenta izgubljenih paketa tj. od verovatnoće gubitka paketa, postojanja ili nepostojanja postupka nadoknade izgubljenih paketa i vrste gubitaka (slučajni, grupni) je prikazana na slici 2, [8].

Sa slike 2 se vidi da se kvalitet paketske telefonske veze može ugroziti jedino u slučaju da se ne koristi postupak nadoknade paketa, linija 1. Ovaj uticaj gubitka paketa se može izračunati iz jednačine (1), [7], :

$$I_{el} = I_{ec} + (95 - I_{ec})PER / (PER + Bpl) \quad (4)$$

gde su:

$PER$  - verovatnoća gubitka paketa izražena u procentima,

$I_{ec}$  - činioc pogoršanja kvaliteta veze koje unosi koder ili kompresor govornog signala. Za koder G.711, koji se preporučuje za upotrebu u mreži EPS-a, vrednost ovog činioca je 0 i

$Bpl$  - otpornost koder ili kompresora na gubitak paketa (*Packet-loss Robustness Factor*). Za pomenuti koder G.711 ovaj činioc, prema [9], ima vrednost 4,3 ukoliko se u govoru prenose i pauze a 25,1 ako se govorne pauze ne prenose (G.711+VAD).

Vidi se da će stepen oštećenja govornog signala,  $I_{el}$ , zbog gubitka paketa sa verovatnoćom  $PER_{gmax} \approx PER \approx 0,00027 \approx 0,027\%$  biti nešto manji od jedne jedinice ukoliko se prenose i pauze u govoru. To je vrlo malo oštećenje. Da bi se prikazala njegova veličina recimo samo da je ono uporedivo ali manje od unetog oštećenja govornog signala koje unosi jedan postupak A/D i D/A pretvaranja govornog signala tj,  $I_{ec} \approx I_{qdu}$  (*quantizing distortion unit*).

Kada se u jednačinu (4) zamene vrednosti za verovatnoću izgubljenog paketa,  $PER$ , i vrednost, (25,1), otpornosti koder G.711+VAD iz [9], vidi se da je činioc oštećenja govornog signala,  $I_{el}$ , zanemarljiv.

## 5. ZAKLJUČAK

*Za uticaj elektroenergetskih smetnji na gubitak paketa i na telefonske veze u budućoj paketskoj telefonskoj mreži EPS-a se može reći sledeće.*

*Smetnje energetskog sistema će se odražavati na greške u komunikacionom kanalu saglasno poznatom Gilbert-Elliottovom modelu. Greške u komunikacionom kanalu će izazvati gubitke paketa.*

*Gubici paketa neće imati uticaja na postupak ostvarenja IP telefonske veze jer se u ovim postupcima koriste mehanizmi koji obezbeđuju isporuku ispravne informacije na određište.*

*Gubici paketa će uticati samo na kvalitet govornog signala na prijemu. Za određivanje uticaja smetnji na kvalitet govornog signala korišćeni su rezultati merenja smetnji pri nižim bitskim protocima. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da stanja povećanog nivoa smetnji neće uticati značajno na kvalitet paketskih telefonskih veza jer se retko pojavljuju. Stanja nižeg stepena smetnji će neznatno uticati na kvalitet govornog signala tek pri najgorim uslovima a to su: prenos dugih (30ms) uzoraka nekomprimovanog govornog signala sa govornim pazama, kodovanog po G.711, bez korišćenja postupka nadoknade izgubljenih paketa.*

*Prenošenje više govornih uzoraka jednim paketom bi pogoršalo kvalitet govornog signala.*

*Rezultati ovog rada bi bili potpuniji ukoliko bi se došlo do podataka o stepenu smetnji u savremenim digitalnim sistemima prenosa visokog protoka u elektroprivrednim mrežama.*

## 6. LITERATURA

- [1] IDEJNI PROJEKAT TELEFONSKE MREŽE EPS-a, EPS, Direkcija za telekomunikacije, 2003.
- [2] IETF: USER DATAGRAM PROTOCOL, RFC 768
- [3] IETF: RTP: A TRANSPORT PROTOCOL FOR REAL-TIME APPLICATIONS, RFC 1889
- [4] IETF: TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL, RFC 793
- [5] Drašković, V: ANALIZA USLOVA PRENOSA SIGNALA PODATAKA VF VEZAMA PO VODOVIMA VISOKOG NAPONA U PRELAZNIM I STACIONARNIM STANJIMA ELEKTROENERGETSKE MREŽE, Doktorska disertacija, ETF Beograd, Beograd, 1990.

- [6] Mitić, D.: ODREĐIVANJE SVOJSTAVA DIGITALNIH INFORMACIONIH I SIGNALNIH KANALA KOJI SU POD UTICAJEM GRUPNIH GREŠAKA, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2002.
- [7] ITU-T RECOMMENDATION G.107
- [8] ITU-T RECOMMENDATION G.113/2001
- [9] ITU-T RECOMMENDATION G.113/Appendix I, 2002.

Rad je primljen u uredništvo 21. 06. 2004. godine



**Žarko Markov** (1946) dipl. ing. od 1969, magistar od 1975, doktor od 1976, (sve ETF Beograd). Radi u Iritelu na razvoju i proizvodnji telefonskih centrala za elektroprivrednu telefonsku mrežu (videti <http://www.iritel.com/english/products/etce/Digital%20Telephone%20Exchange%20-%20ETCE-D.htm>). Autor nekoliko desetina radova objavljenih u zemlji i inostranstvu od kojih se petnaestak odnosi na elektroprivrednu telefoniju. Učestvovao u izradi Tehničkih uslova za elektroprivredne telefonske centrale i u projektima digitalne telefonske mreže EPS-a. Objavio nekoliko knjiga i udžbenika. Ima naučno zvanje naučnog savetnika i nastavno zvanje vanrednog profesora.

# Metode za određivanje cene mazuta za proizvodnju električne energije u termocentralama tečnih goriva

Stručni rad  
UDK: 621.31; 620.4

---

*Rezime:*

Ovaj rad analizira ekonomske aspekte cene goriva za potrebe TE Negotino u uslovima kada se javlja potreba za angažovanjem ovog do sada neiskorištenog kapaciteta. U istom pravcu su prikazane momentalne elektroenergetske prilike u regionu u vreme kada su u toku reforme u većem broju elektroenergetskih sistema. Preko metode srednjih cena dat je jedan pristup kako se može obezbediti ekonomski isplativo gorivo za termoenergetske izvore tekućeg goriva.

**Ključne reči:** termoenergetski izvori, tečno gorivo, sezonske srednje cene, godišnje srednje cene, proizvodni kapaciteti, ekonomičnost, ušteda, specifična potrošnja

---

*Abstract:*

## METHODS FOR DETERMINATION OF THE PRICE OF THE FUEL OIL FOR ELECTRIC POWER PRODUCTION IN THERMAL POWER PLANTS ON LIQUID FUEL

This work analyzes the economical aspects of the fuel oil price for thermal power plant Negotino under conditions when there is a need for engagement of this so far not utilized capacity. In the same context are presented the current electric power conditions in the region, in the period when actual changes are taking place in many electric power systems. Through the method of average prices is given an approach for securing economically payable fuel for the thermal power generating plants burning liquid fuel.

**Keywords:** thermal power generating plants, liquid fuel, seasonal average prices, annual average prices, production capacities, economy, savings, specific consumption

---

## 1. UVOD

Već duže vreme TE Negotino je u elektroenergetskom sistemu Makedonije u stanju takozvane „hladne rezerve”. Glavni razlog tome što ova termoelektrana nije u kontinuiranom pogonu je visoka cena osnovnog goriva. U prošlom periodu, proizvodna cena električne energije od TE Negotino nije mogla biti konkurentna daleko jeftinijoj ceni električne energije proizvedene u termoelektranama lignita [3].

U uslovima kada je potrošnja električne energije u postojanom rastu, a kapaciteti postojećih izvora električne energije u Republici Makedoniji postaju nedovoljni, aktiviranje TE Negotino postaje stvarnost i potreba [1].

Regionalne promene na polju energetike su još jedna potvrda ovoj konstataciji. Opšte je poznato da je balkanski region sa njegovom okolinom deficitaran električnom energijom ili, preciznije rečeno, zavisni od uvoza električne energije.

Osnov za stabilno energetska tržište su instalirani kapaciteti. Energetski su izvori početna tačka u beskonačnom krugu koji se zove elektroenergetski sistem. U tabeli 1 po strukturi su prikazani instalirani kapaciteti u zemljama regiona.

Tabela 1.

Instalirani kapaciteti regiona

10<sup>6</sup> kW

Zemlja	Termo	Hidro	Nuklearna	Geotermalna i druge	Ukupno
Hrvatska	1,7	2,1	0,0	0,0	3,8
Grčka	7,7	2,4	0,0	0,2	10,3
SiCG	6,7	2,9	0,0	0,0	9,6
Bugarska	6,3	1,8	3,8	0,0	11,9
Mađarska	6,4	0,0	1,9	0,0	8,3
Rumunija	15,9	6,1	0,7	0,0	22,6
Albanija	0,2	1,4	0,0	0,0	1,7
Makedonija	1,1	0,4	0,0	0,0	1,5
BiH	2,0	2,0	0,0	0,0	4,0

U tabeli 2 po strukturi je predstavljena proizvodnja električne energije u 2000. godini. Ako ana-

liziramo strukturni ulog različitih tipova izvora, možemo reći da su u regionu pretežno zastupljeni termo izvori sa 63 %, zastupljenost hidro izvora je 22 %, nuklearni su izvori zastupljeni sa 15 %, dok je zastupljenost geotermalnih i drugih izvora neznatna.

Tabela 2.

Proizvodnja električne energije u zemljama regiona u 2000. godini

10<sup>9</sup> kWh

Zemlja	Termalna	Hidro	Nuklearna	Druge	Ukupno
BiH	5,0	5,0	0,0	0,0	10,1
Hrvatska	4,5	6,7	0,0	0,0	11,2
Grčka	46,2	3,7	0,0	0,6	50,4
Makedonija	5,3	1,2	0,0	0,0	6,5
SiCG	18,7	11,9	0,0	0,0	30,6
Albanija	0,1	4,5	0,0	0,0	4,7
Bugarska	18,6	3,1	17,3	0,0	39,0
Mađarska	19,7	0,2	13,5	0,1	33,4
Rumunija	29,8	14,6	5,2	0,0	49,6

U tabeli 3 je hronološki prikazana potrošnja električne energije u zemljama regiona. Prošla deka-

Tabela 3.

Potrošnja električne energije u periodu 1992-2001. godine

10<sup>9</sup> kWh

Zemlja	1992.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	2000.	2001.
BiH	6,0	3,6	4,1	4,2	6,9	8,1	8,9	9,7	8,6	8,1
Hrvatska	10,9	10,7	11,1	11,5	12,1	12,7	13,8	12,7	14,4	14,3
Grčka	33,2	34,3	35,8	37,1	38,6	40,3	42,2	43,6	46,9	48,8
Makedonija	5,6	5,2	5,3	5,4	5,8	5,9	6,2	6,0	6,1	6,1
SiCG	33,6	29,7	30,7	33,0	33,7	35,8	33,6	31,6	32,4	32,4
Albanija	2,6	3,1	3,6	4,1	5,5	5,4	5,1	5,4	5,4	5,9
Bugarska	33,9	33,6	33,5	36,7	37,7	33,8	33,1	31,8	31,7	32,5
Mađarska	31,2	31,4	31,5	32,3	33,0	33,2	33,5	33,8	34,5	35,1
Rumunija	52,1	51,0	49,6	52,9	54,8	51,0	48,0	44,4	45,5	46,1

Tabela 4.

Regionalna trgovina električnom energijom

10<sup>9</sup> kWh

Zemlja	1991.	1992.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	2000.	2001.
BiH	0,00	-0,10	-0,58	-0,20	-0,22	-0,20	-0,21	-0,22	-0,20	0,80	1,16
Hrvatska	0,00	-2,90	-2,32	-3,65	-3,51	-2,52	-3,95	-4,30	-2,40	-4,04	-3,00
Grčka	-0,64	-0,61	-0,81	-0,39	-0,81	-1,35	-2,30	-1,61	-0,16	0,01	-2,50
Makedonija	0,00	-0,24	-0,60	-0,18	0,00	0,00	0,00	0,03	0,11	-0,12	-0,10
SiCG	0,00	0,59	2,12	2,30	2,39	2,53	2,48	2,41	-1,29	1,15	-0,33
Albanija	0,65	0,46	0,06	0,00	-0,08	-0,20	-0,25	-0,41	-0,36	-1,08	-0,98
Bugarska	-2,12	-2,57	-0,13	0,03	0,12	0,45	3,54	3,65	1,93	4,62	5,96
Mađarska	-7,36	-3,33	-2,49	-2,10	-2,41	-2,19	-2,15	-0,74	-1,06	-3,44	-3,17
Rumunija	-5,13	-4,13	-1,87	-0,77	-0,34	-0,81	-0,22	-0,47	0,73	0,67	1,20

da je u svakom slučaju karakterizovana opštim zastojem (tranzicioni period) u svim delovima društvenog razvoja regiona, što na neki način dokazuje da je u budućem periodu realno očekivati porast potrošnje električne energije.

U tabeli 4 je prikazan bilans trgovine električnom energijom (razlika izvoza i uvoza).

Iz tabele 4 je vidljivo da osim Bugarske, Rumunije i Bosne i Hercegovine ostale se zemlje ne mogu javiti kao značajniji izvoznici, štaviše oni su zavisni od uvozne električne energije. Zatvaranjem 2 (dva) bloka (880 MW) u NEC Kozloduju (Bugarska) i budućim zatvaranjem još 2 (dva) bloka (880 MW) do 2006. godine, postojeća situacija će postati složenija.

TE Negotino, svojom elastičnošću manevriranja između 70 i 210 MW, pored svog kapaciteta nudi i odlične mogućnosti za regulaciju dijagrama opterećenja elektroenergetskog sistema. Naime, u granicama elektroenergetskog sistema bivše Jugoslavije, TE Negotino je bila zamišljena kao termoelektrana koja će u određenim trenucima moći da amortizuje određene havarijske prilike u sistemu.

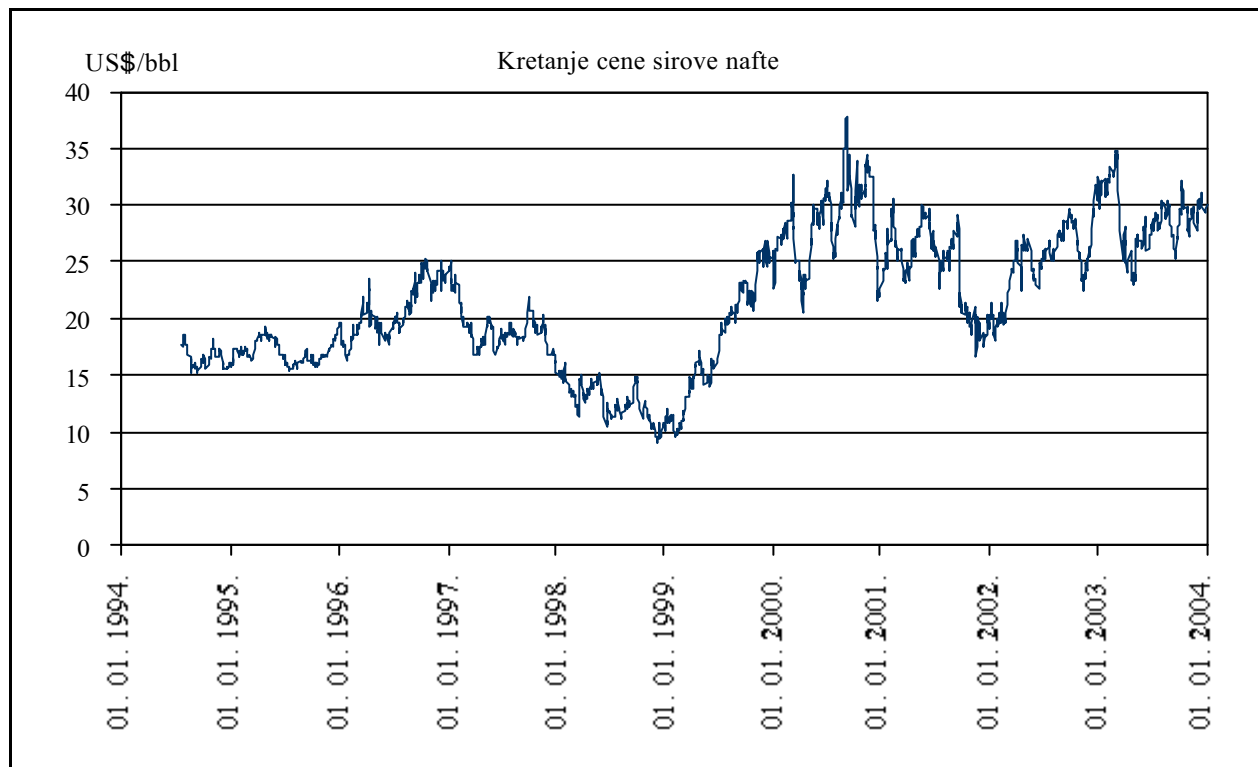
Ovaj rad uglavnom tretira osnovni problem zbog kojeg je TE Negotino već 25 godina upotrebljavana samo povremeno, a to je cena osnovnog goriva.

## 2. KRETANJE CENE TEČNIH GORIVA

Osnovni problem prilikom formiranja cene mazuta je njegova stalna fluktuacija u skladu sa kretanjem cene sirove nafte. Ove fluktuacije, s jedne strane, u većoj meri opterećuju planiranje potrebnih finansijskih sredstava za nabavku mazuta, a s druge strane postoji veliki rizik u određenim periodima visokih cena i neophodnoj potrebi mazuta da se učine veliki finansijski gubici. Jedan od načina da bismo mogli amortizovati ove rizike je formiranje prihvatljive dogovorne cene mazuta sa srednjim cenama (godišnjim ili sezonskim). Srednja cena (godišnja ili sezonska) će predstavljati referentnu tačku na čijoj će se osnovi formirati tržišna cena. Kažemo tržišna cena zato što u skladu sa cenom sirove nafte fluktuirala i cena mazuta. Naime, rafinerija sirovu naftu nabavlja na osnovu svetskih cena, te je odavde i proizvodna cena mazuta zavisna od cene sirove nafte, odnosno od cene mazuta na svetskom tržištu.

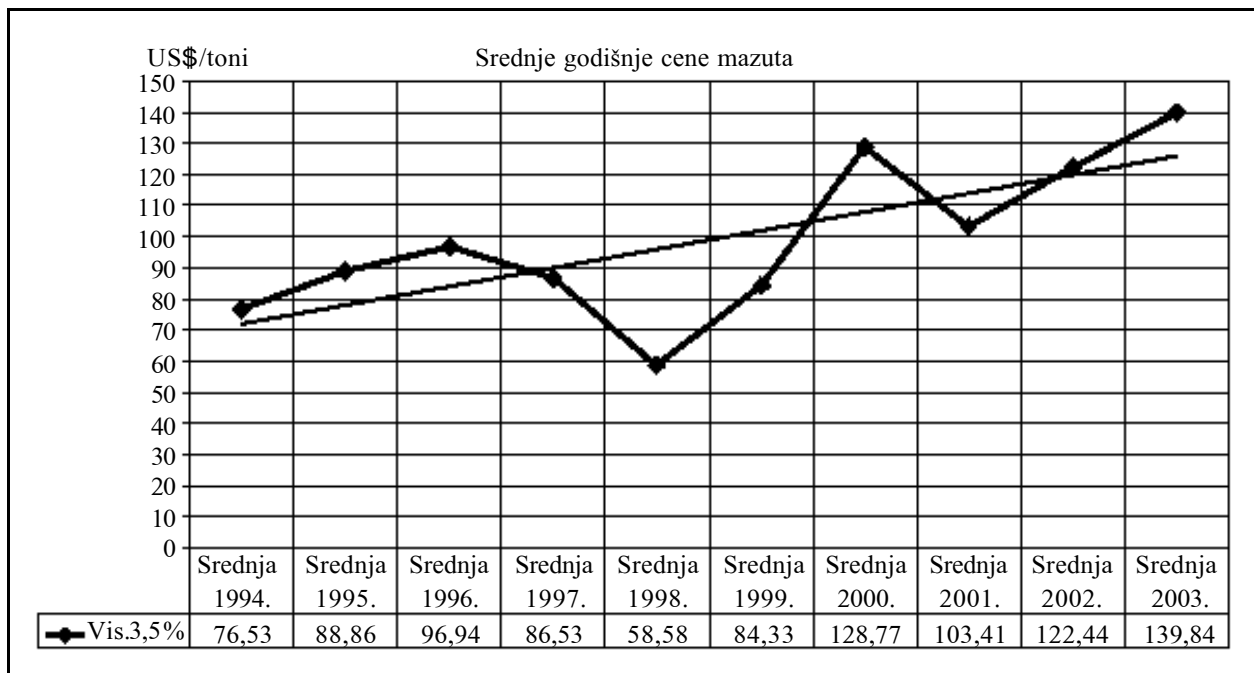
U poslednjih nekoliko godina cena sirove nafte ima uzlazni trend. Generalno, ona se kreće u granicama između 20 i 30 US\$ po barelu [8], s manjim izuzecima.

Iračka kriza i zbivanja u Venecueli doprineli su malo ekstremnijem rastu cene u prvoj polovini 2003. godine. Predviđanja za bližu budućnost govore da će se cena sirove nafte zadržati između 20 i 30 US\$ po



Slika1. Kretanje cene sirove nafte (period 1994 - 2003. godine)





Slika 2. Srednje godišnje vrednosti cene mazuta na Platovoj kotaciji

barelu [6], a odavde i zaključak da se na ovoj osnovi kretanja cene sirove nafte mogu praviti i analize cene mazuta.

Na slici 2 su predstavljene srednje godišnje vrednosti kretanja cene mazuta na kotaciji PLATT'S High Fob Mediterranean.

### 3. METODA ODREĐIVANJA SREDNJE CENE MAZUTA

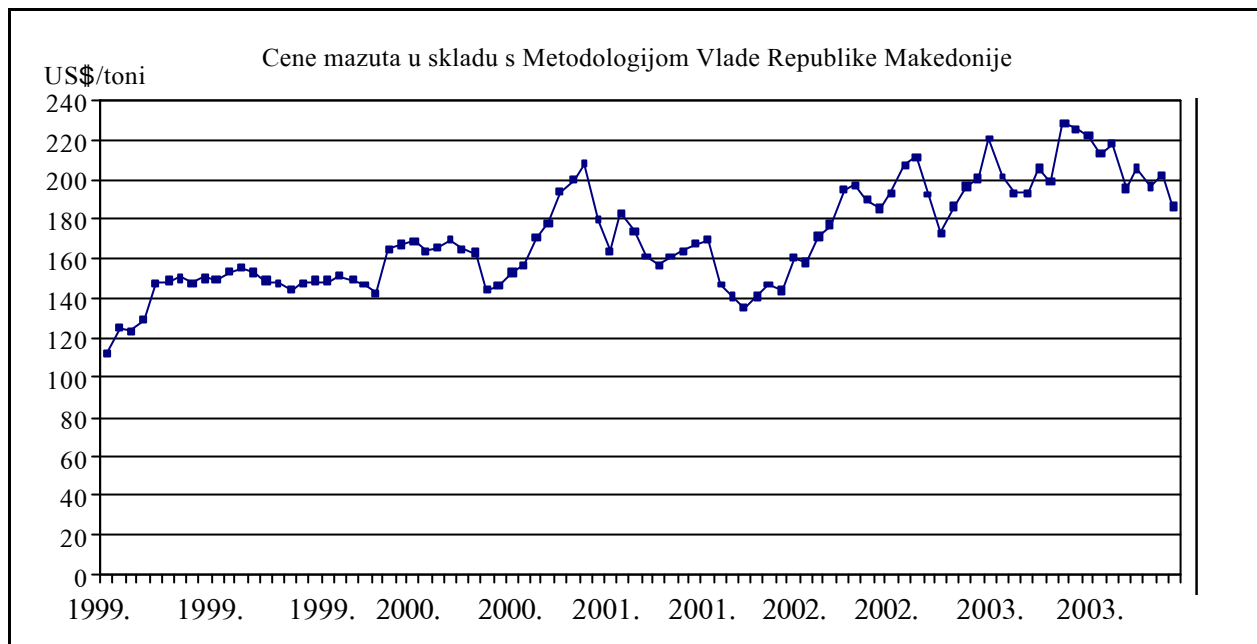
Ova se metoda gradi na osnovu hronološke linije kretanja cene mazuta na svetskom tržištu. Prilikom definisanja perioda, treba uzeti u obzir nekoliko parametara:

- Sezonsku podelu perioda (zimski i letnji sezona);
- Godišnji remont TE Negotino u periodu kada je cena mazuta na svetskom tržištu nepovoljna;
- Kupovinu određenih količina u skladu sa raspoloživim skladišnim kapacitetima TE Negotino, u periodu kada je cena mazuta na svetskom tržištu najpovoljnija;

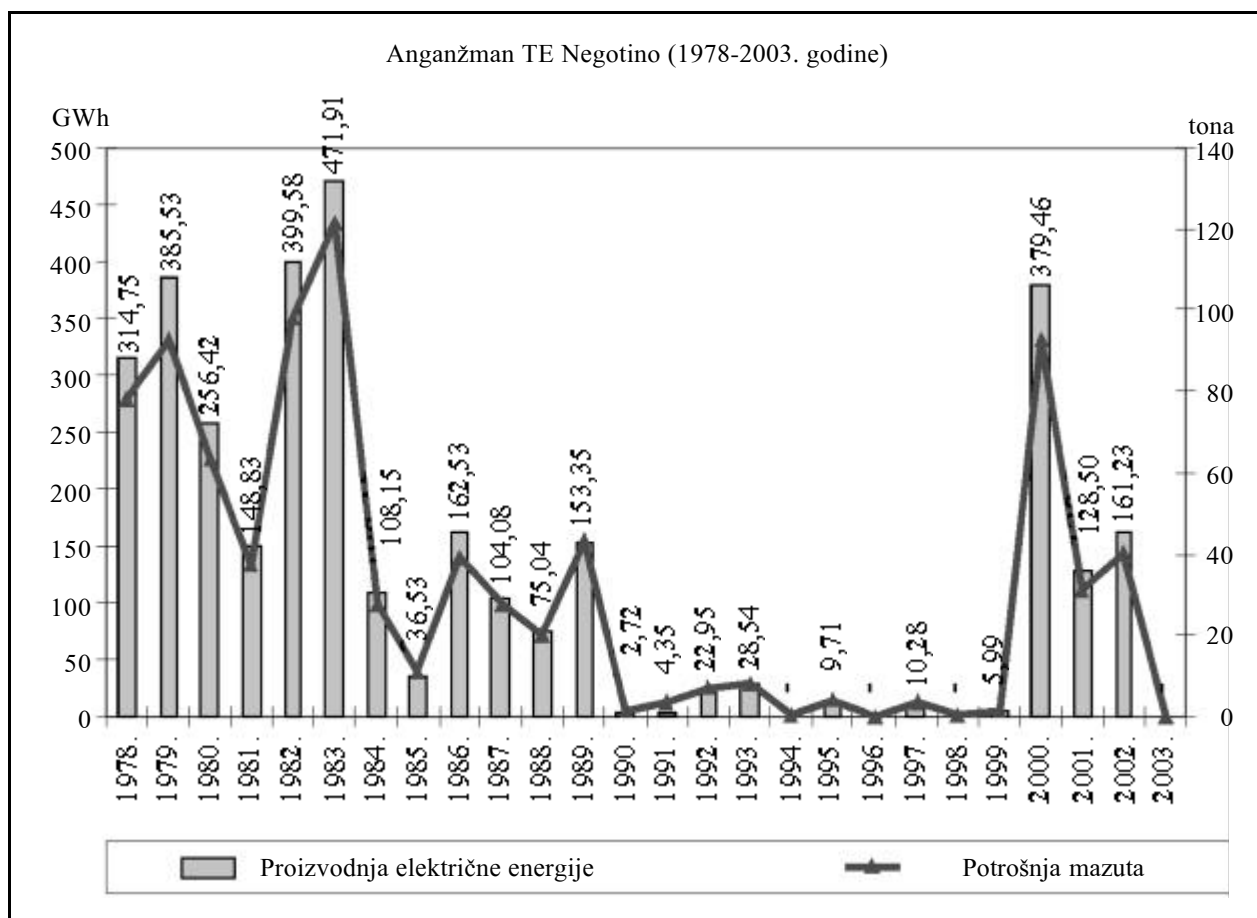
Idealan scenarij bi bio: u pogodnim periodima niske cene mazuta obezbediti maksimalnu količinu istog kapaciteta koji rezervoarski prostor TE Negotino (60 000 tona) dozvoljava, a u ostalom periodu u toku godine kupovati mazut po srednjim sezonskim ili godišnjim cenama. Ovakvim pristupom može da se napravi realna finansijska osnova za snabdevanje mazuta za TE Negotino, bez većih oscilacija.

Metodologija određivanja cene naftnih derivata u Republici Makedoniji funkcioniše od 1999. godine. Metodologija za određivanje cene naftnih derivata od 1999. godine do 31. 12. 2003. godine bila je u nadležnosti Vlade Republike Makedonije. Od 01. 01. 2004. godine ovu ulogu je preuzela novoformirana Regulatorna komisija za energetiku kao nezavisno nevladino telo. U svakom slučaju, metodologija predstavlja zavisnu funkciju čiji su ulazni parametri: kretanje cene sirove nafte na svetskom tržištu, kretanje cene naftnih derivata na svetskom tržištu (Saglasno publikaciji PLATT'S), odnos nacionalne valute (denar) i američkog dolara, te proizvodni rafinerijski troškovi derivata u odnosu na BRENT prinose sirove nafte. Promena bilo kog od navedenih ulaznih parametara funkcije u datom periodu od 15 dana, dovodi do promena cena naftnih derivata. Cena mazuta kao jednog od derivata tretiranog ovom metodologijom, prema periodima promene, prikazana je na slici 3.

Šta se dešava u poslednjih nekoliko godina u odnosu rada/nerada TE Negotino u elektroenergetskom sistemu Republike Makedonije? Na slici 4 je predstavljeno angažovanje TE Negotino u periodu od 1978. do 2003. godine [10]. Iz dijagrama na slici 4 može se primetiti da je TE Negotino samo povremeno ulazila u režim proizvodnje, samo tada kada su bile iscrpljene sve ostale mogućnosti, odnosno samo u slučaju kada je postojala realna opasnost za narušavanje prilika u elektroenergetskom sistemu Republike Makedonije.



Slika 3. Cena mazuta u skladu sa Metodologijom (period 1999 - 2003. godine)



Slika 4. Angažovanost TE Negotino (1978-2003. godine)

Privreda Makedonije prosečno godišnje troši oko 300 hiljada tona mazuta. Činjenica da je TE Negotino u slučaju kontinuiranog rada potrebno dodatnih 300 hiljada tona mazuta, daje za pravo da se razmišlja o tome da jedan takav veliki potrošač zaslužuje jeftiniju cenu mazuta nego što to daje postojeća metodologija.

Neosporna je činjenica da ni Elektroprivreda Makedonije ni bilo koji drugi relevantni subjekt nije napravio dublju analizu (ekonomsku i tehničku) da bi odgovorio na pitanje:

– Da li je u određenim periodima proteklih godina bilo ekonomske opravdanosti za veće angažovanje TE Negotino?

Ako se uradi kompleksniji pristup svih ulaznih i izlaznih parametara prilikom određivanja adekvatne cene mazuta za potrebe TE Negotino, dobiće se drugačija slika. Da bi se bolje razumeo metod ovog kompleksnog pristupa, analiza cene mazuta će biti urađena prema Dijagramima kretanja cena mazuta na svetskoj berzi u poslednjih nekoliko godina. Naime, ova analiza je simulacija već prošlog perioda.

Sve pretpostavke i zaključci koje ćemo uraditi temeljeni su na srednjim cenama kretanja cene mazuta za godišnji odnosno sezonski (leto/zima) period. Ovaj pristup, u stvari, predstavlja osnovu za realnije razgledavanje svih mogućnosti i, što je još va-

žnije, isključuje sve dnevne i nepotpune kalkulacije koje su u prošlosti bile osnov za donošenje pogrešnih zaključaka. Očigledna je razlika cene mazuta u periodu 1999-2003. godine prema metodologiji cena u Republici Makedoniji (slika 3) i cene mazuta na svetskom tržištu u istom periodu [9] (slika 5).

Kao što smo napomenuli, dijagrami pokazuju da stalne fluktuacije cena mazuta prouzrokuju teškoće prilikom formiranja adekvatne cene električne energije proizvedene u TE Negotino. Srednje cene za periode od nekoliko meseci, odnosno godišnje periode omogućuju lakše formiranje realne cene za kupovinu mazuta, koja će s jedne strane biti prihvatljiva za Elektroprivredu Makedonije, odnosno TE Negotino, a s druge strane profitabilnija za rafineriju nafte OKTA. Metodu ćemo primeniti sa simulacijom srednjih sezonskih i srednjih godišnjih cena u periodu 1999 - 2003. godine. Simulacija srednjih cena u ovom periodu će nam dati smernice za razmišljanje na koje ćemo načine formirati prihvatljivu ekonomsku cenu mazuta, zato što najveći ulog u proizvodnoj ceni po kWh dobijenu od TE Negotino ima, u stvari, cena mazuta [1]. Upoređenje ekonomske opravdanosti proizvodne cene električne energije po kWh dobivene od TE Negotino treba biti urađeno sa cenom uvozne električne energije regiona. Kao što smo prethodno napomenuli, u ovom trenutku u regionu Južnog Balkana, jedine zemlje koje se



Slika 5. Cene mazuta na svetskom tržištu

javljaju kao izvoznici električne energije su Bugarska i Rumunija, i to od svojih nuklearnih izvora električne energije.

Iskustva iz proteklih godina u Republici Makedoniji nam pokazuju da je potrošnja električne energije u grejnoj sezoni, odnosno u periodu oktobar-april, veća u odnosu na letnji period april-oktobar. Naravno, ova pojava je prisutna zbog korišćenja električne energije za grejanje. Nije isključeno da ova situacija pretrpi izvesne promene u budućem periodu, uključivanjem (restartiranjem) starih industrijskih potrošača, ali i uključivanjem novih industrijskih potrošača u elektroenergetski sistem Republike Makedonije.

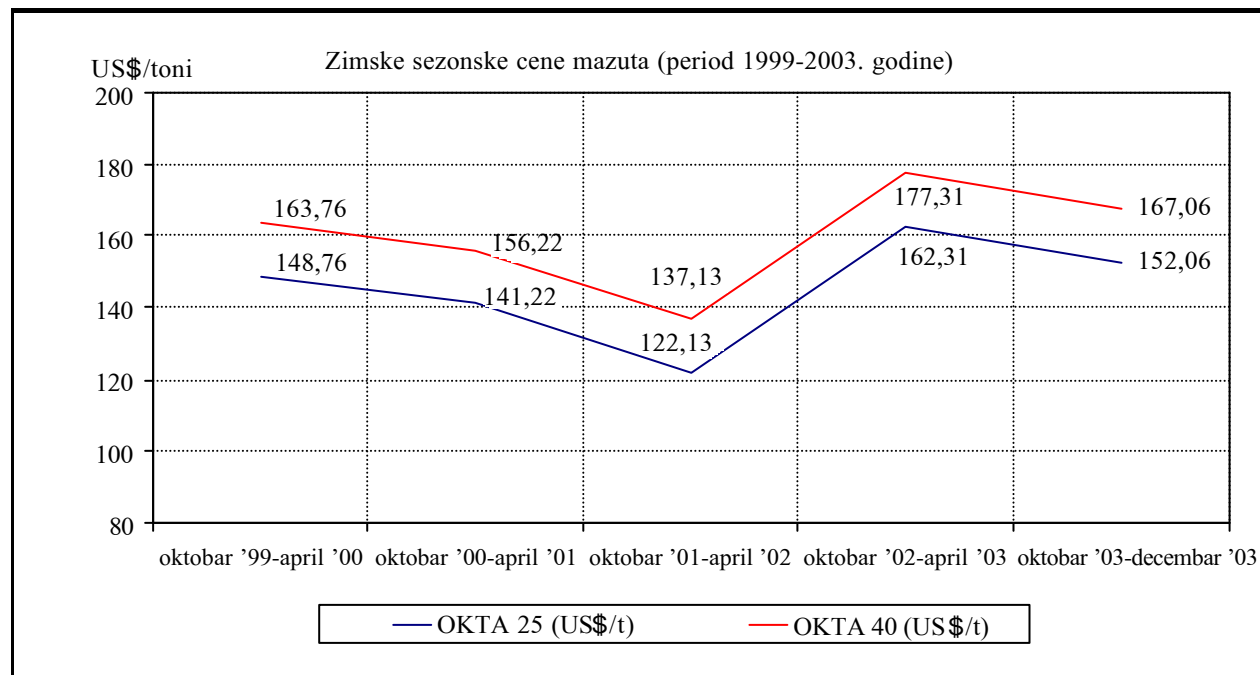
U ovoj analizi, kao osnovu za svetske cene mazuta, koristićemo visoku kotaciju za 3,5 % mazuta u publikaciji PLATT'S (High Fob Med for 3,5 % Fuel oil). Ova cena definiše tržišnu cenu mazuta na paritetu FOB mediteransko pristanište u Italiji (Genova/Laverna) i u istu nisu ukalkulisani zavisni troškovi. U zavisne troškove spadaju troškovi manipulacije, carinski troškovi, špediterski troškovi, osiguranje, transport i slično. Doslovce, ovi zavisni troškovi predstavljaju trošak koji je potreban da bi se određena količina mazuta prenela od baze u Italiji, gde se cena mazuta formira, do OKTA rafinerije. Naime, uzimajući cenu koja važi za određeni dan po „Platt's” publikaciji i dodajući na ovu cenu zavisne troškove, dobijamo referentnu cenu na paritetu OKTA rafinerije za određeni dan.

Cena mazuta koju OKTA AD može ponuditi Elektroprivredi Makedonije najviše zavisi od kretanja cene sirove nafte. I pored činjenice da svaka rafinerija u skladu sa njenim tehnološkim mogućnostima ima određene troškove prerade sirove nafte, stalne fluktuacije cene sirove nafte imaju veliki uticaj na konačnu cenu mazuta. Uobičajena je praksa u svim rafinerijama i subjekata koji trguju sa naftnim derivatima da se kupoprodajni odnosi regulišu uzimajući kao bazu berzanske cene derivata (PLATT'S publikacija).

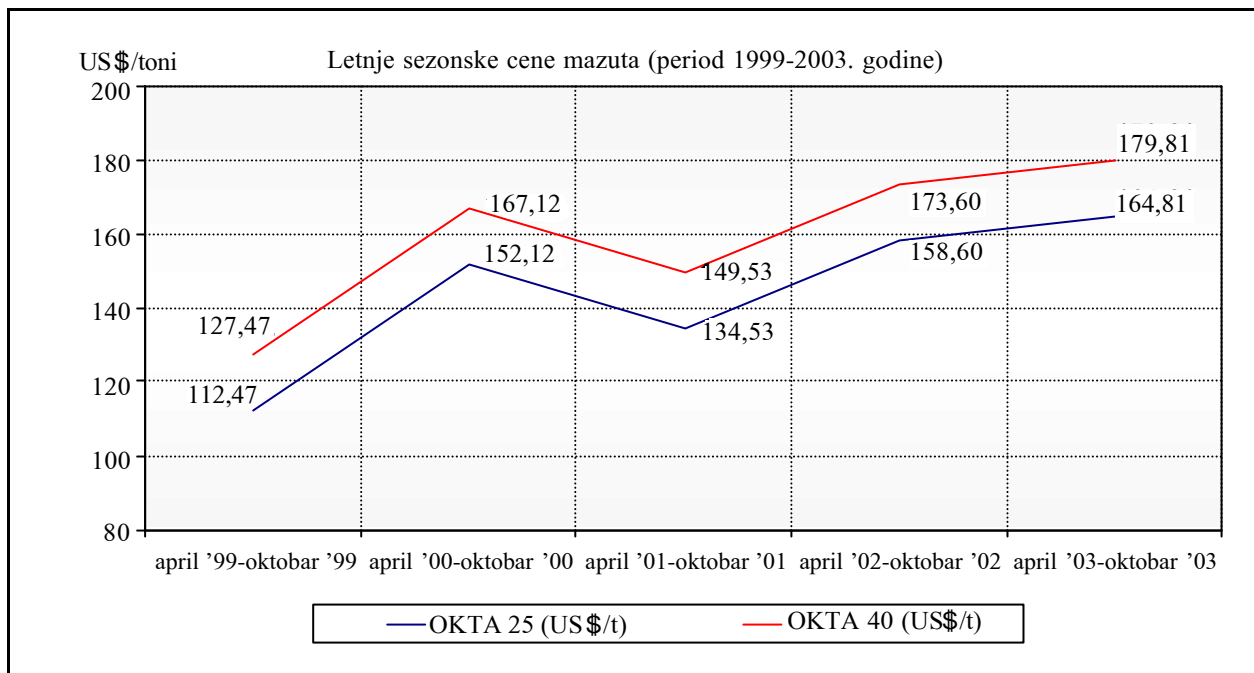
Ideja je da analogijom rafinerijsku cenu mazuta predstavimo kao zbirnu funkciju berzanske cene i zavisnih troškova. Ovim se postiže lakše praćenje stalne promene cene sirove nafte te nam omogućava da lakše uradimo potrebne analize. Drugim rečima, proizvodna cena mazuta iz rafinerije, koja je funkcija cene sirove nafte i proizvodnih troškova, ekvivalentna je berzanskoj ceni mazuta uvećanoj za zavisne troškove, kako bi se taj mazut doneo na prag rafinerije

Znači, da bi tržišna cena mazuta prema publikaciji PLATT'S mogla biti svedena na cenu mazuta koju OKTA može ponuditi, potrebno je da se istoj dodaju zavisni troškovi. Zavisni troškovi realno se kreću u prosečnom intervalu od 25 do 40 US dolara po toni.

U skladu sa ovim, cena mazuta OKTA-e, biće predstavljena kao zbirna funkcija kretanja svetske cene mazuta koja je tu opisana i zavisnih troškova u opisanom intervalu.



Slika 6. Zimske sezonske cene (period 1999-2003. godine)



Slika 7. Letnje sezonske cene (period 1999-2003. godine)

### 3.1. Metod srednjih sezonskih cena

Na slici 6 i slici 7 je prikazana cena električne energije iz TE Negotino za periode od 1999. do 2003. godine, podeljeni prema letnjim i zimskim sezonama.

$$C_{f.o.} = \frac{C_{f.o.Platt's}(t)}{t} + P_{v.c.} \quad (1)$$

gde je:

$C_{f.o.}$  – Srednja sezonska cena mazuta na paritet  $F$ -ko OKTA rafinerije;

$C_{f.o.Platt's}$  – Cena mazuta određenog dana na svetskom tržištu prema „Platt's” publikaciji;

$P_{v.c.}$  – Zavisni troškovi

$t$  – predstavlja ukupni broj dana u periodu od jedne zimske (15 oktobar  $\leq t \leq$  15 april) odnosno letnje sezone (15 april  $\leq t \leq$  15 oktobar), kada su cene mazuta bile objavljene u „Platt's” publikaciji.

Iako zvuči paradoksalno, u poslednje 4 godine letnje sezonske prosečne cene su više od zimskih sezonskih prosečnih cena. Na slici 8 i slici 9 može se videti kretanje cene električne energije po proizvedenom kWh u navedenim periodima u slučaju specifične potrošnje mazuta od 0,260 kg/kWh.

$$E = \frac{1}{10} [(C_{f.o.} + T_{OKTA-NEGOTINO})] q \quad (2)$$

gde je:

$E$  - Cena električne energije (centi/kWh)

$C_{f.o.}$  - Cena mazuta na paritet  $F$ -ko OKTA rafinerija (US\$/tonu)

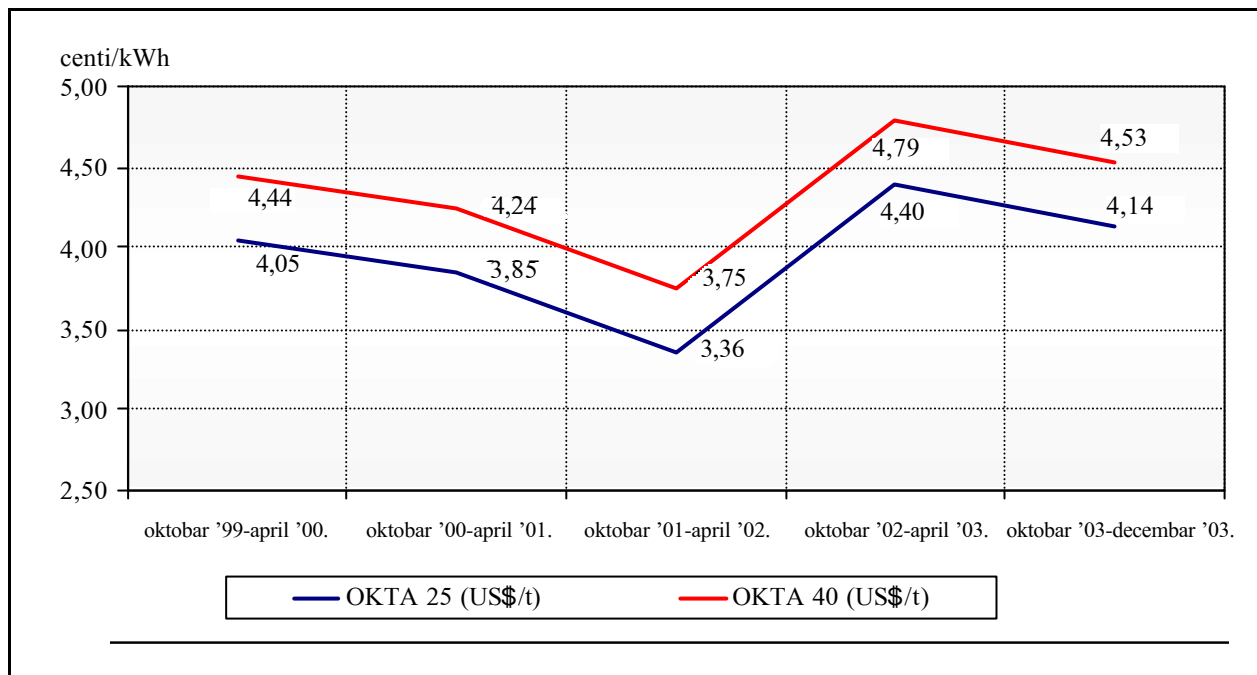
$T_{OKTA-NEGOTINO}$  - Cena transporta na relaciji OKTA -TE Negotino (US\$/tonu), (U analizama se radilo sa cenom od 7 US\$/toni);

$q$  - specifični utrošak mazuta (kg/kWh).

Naravno u ovoj ceni nisu uzeti u obzir fiksni i operativni godišnji troškovi TE Negotino [1] (amortizacija, plate zaposlenih, osiguranje i slično). Iz dijagrama kretanja cene proizvedenih kWh (slika 8 i slika 9) može se primetiti da je u prošlom četvorogodišnjem periodu bilo realnih mogućnosti za rad TE Negotino i to sa cenom električne energije koja je mogla biti konkurentna i uvoznoj ceni električne energije.

Iz ovih dijagrama je jasno vidljivo da je srednja sezonska cena mazuta (električne energije) u zimskom periodu niža od srednje sezonske cene mazuta (električne energije) u letnjem periodu.

Ovakav pristup analize sezonskih kretanja cena daje nam dobre smernice u slučaju kada je potrebno sezonsko angažovanje TE Negotino, na primer u zimskom periodu, kada je potrebna veća količina električne energije. Isto tako, možemo zaključiti da je ovaj pristup realan za sledećih nekoliko godina kada će TE Negotino sezonski ulaziti u elektroenergetski sistem. Sve ovo je uslovljeno time što se do 2006. godine može očekivati jeftinija uvozna električna energija, pre svega od NEC Kozloduj, a isto tako u ovom periodu to je dozvoljeno i od drugih energetske izvora.



Slika 8. Troškovi goriva u ceni električne energije (zimski sezona) (period 1999-2003. godine)

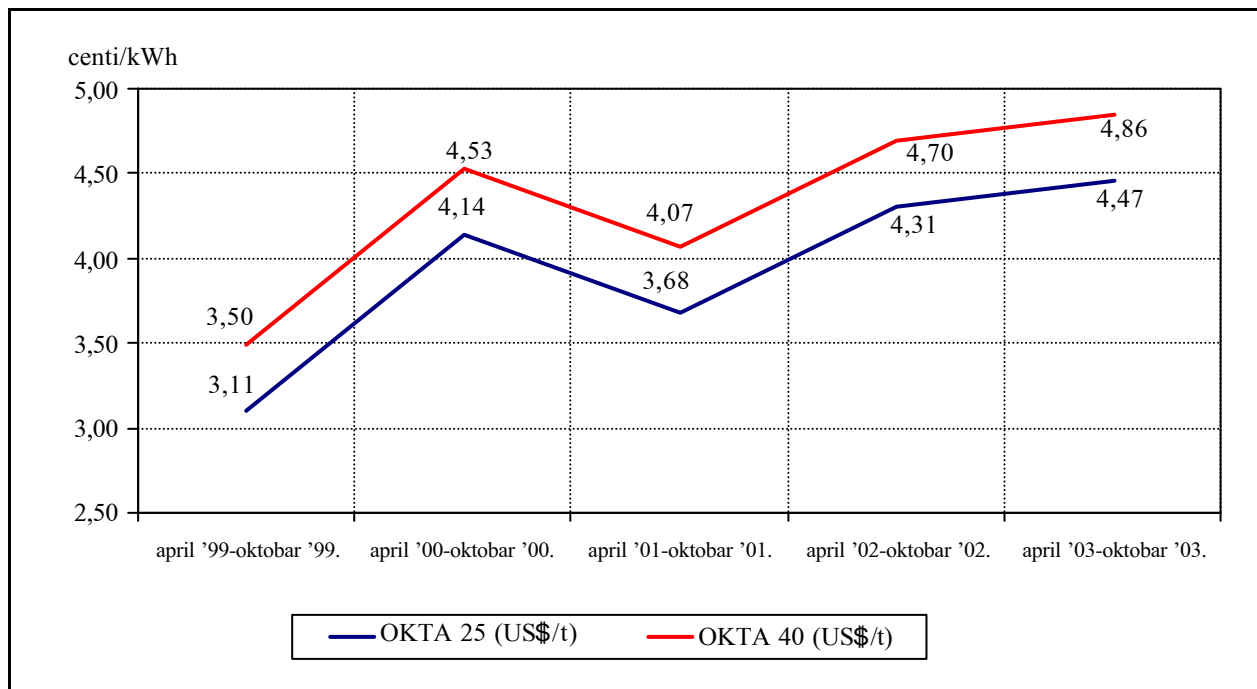
ra u elektroenergetskom sistemu, odnosno od potrošnje električne energije u Republici Makedoniji.

### 3.2. Metod srednjih godišnjih cena

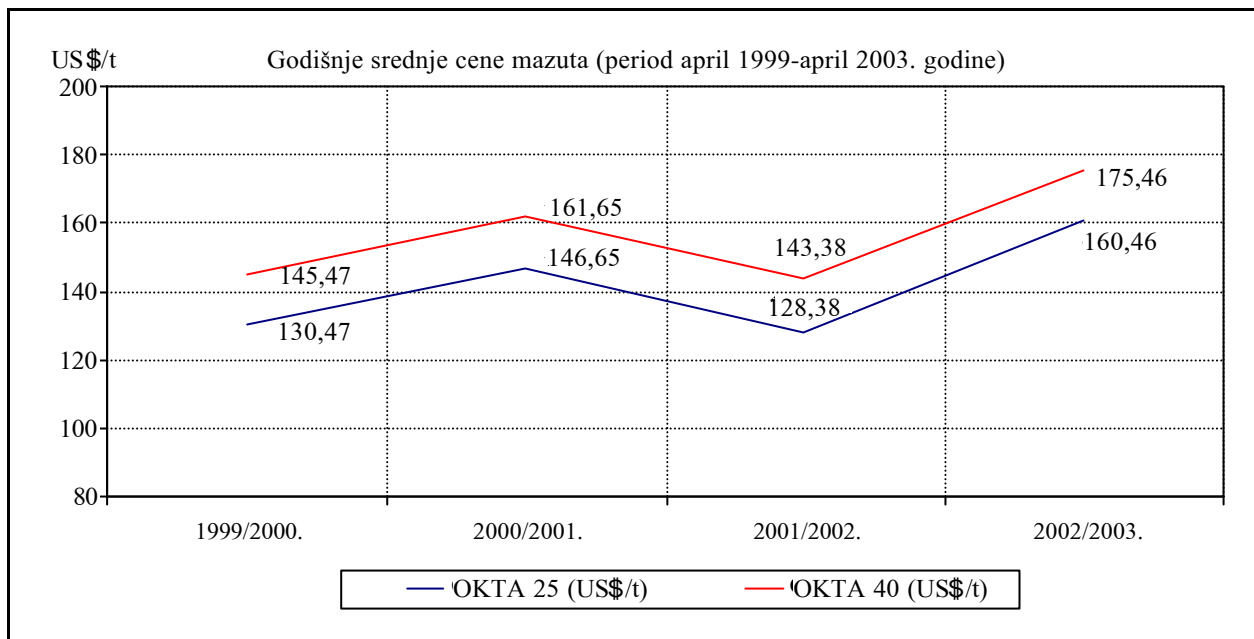
Ova metoda nam daje odličnu osnovu za formiranje cene goriva (mazuta) u slučaju kontinuiranog

snabdevanja TE Negotino tokom cele godine, odnosno u slučaju ulaženja TE Negotino u stacionaran režim elektroenergetskog sistema Republike Makedonije.

$$C_{f.o.} = \frac{C_{f.o.Platt s}(t)}{t} P_{v.c.} \quad (3)$$



Slika 9. Troškovi goriva u ceni električne energije (letnja sezona) (period 1999-2003. godine)



Slika 10. Godišnje prosečne cene mazuta (period 1999-2003. godine)

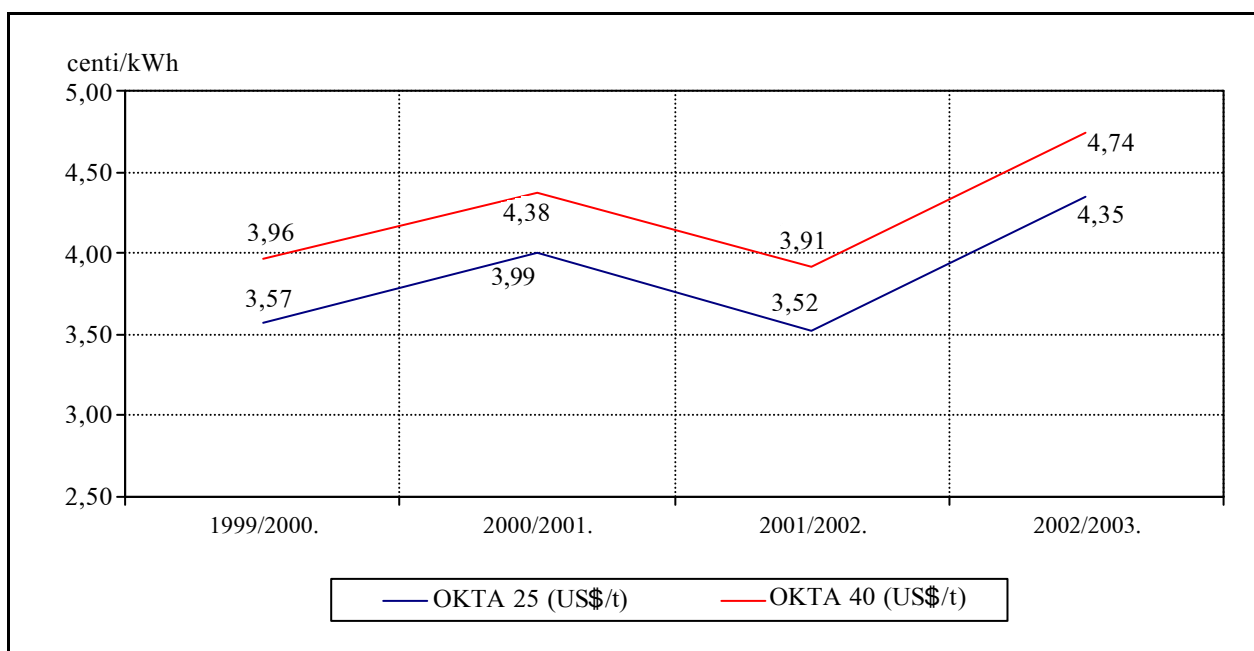
gde je:

$t$  - predstavlja ukupni broj dana u periodu od jedne godine (15 april (prošle godine)  $\leq t \leq$  15 april (sledeće godine)), kada su cene mazuta bile objavljene u publikaciji „Platt's”.

Na slici 10 prikazane su srednje godišnje cene mazuta na svetskoj berzi. Iz dijagrama na slici 10 može se videti da srednje godišnje cene po periodima april 1999 - april 2000. godine, april 2000 - april

2001. godine i april 2001 - april 2002. godine daju solidnu osnovu za formiranje konkretne cene električne energije dobijene od TE Negotino (slika 11).

U periodu april 2002 - april 2003. godine, zbog krize u Iraku i zbog generalnog štrajka u Venezueli beležimo nerealno visoku cenu mazuta. Trend kretanja cene mazuta u prošlom periodu i predviđanja o kretanju cene u budućem periodu do 2025. godine, pokazuju da će srednja godišnja cena mazuta biti u



Slika 11. Troškovi goriva u ceni električne energije (srednje godišnje cene) (period 1999-2003. godine)



intervalu između 110 i 120 US\$/tonu. Ovakvim trendom cene mazuta i zavisnih troškova proizvodnje mazuta u rafineriji OKTA (25-40 US\$/tonu), može se očekivati da se srednja godišnja prodajna cena mazuta za TE Negotino kreće u intervalu između 135 i 150 US\$/tonu.

### 3. PREDUSLOVI ZA DOBIJANJE POVOLJNIJE CENE

Osnovni preduslov za dobijanje niže cene električne energije u TE Negotino je dugoročno angažovanje TE Negotino, pa otuda i neophodnost dugoročnog ugovora između OKTA-e i Elektroprivrede Makedonije, subjekata koji u ovom trenutku raspolaze sa TE Negotino.

Pored cene mazuta, kao faktori s najvećim ulogom u ceni električne energije, mogu se izdvojiti i sledeći elementi koji uslovljavaju cenu električne energije od TE Negotino:

- Količina prerađene sirove nafte;
- Sezonska potražnja mazuta;
- Kvalitet ponuđenog mazuta;
- Godišnja ili sezonska angažovanost TE Negotino;
- Upotreba aditiva;

Kvalitet mazuta OKTA-e je s termičkom moći od 41 MJ/kg, sa procentom sulfura oko 2%. Iskustvena merenja i ispitivanja u TE Negotino su veoma oskudna i siromašna, iz jednostavnog razloga što termoelektrana nema mnogo radnih sati u mreži, ali i od napravljenih može se utvrditi da od mazuta proizvedenog u OKTA-i, specifična potrošnja po proizvedenom kWh je oko 260 grama [10].

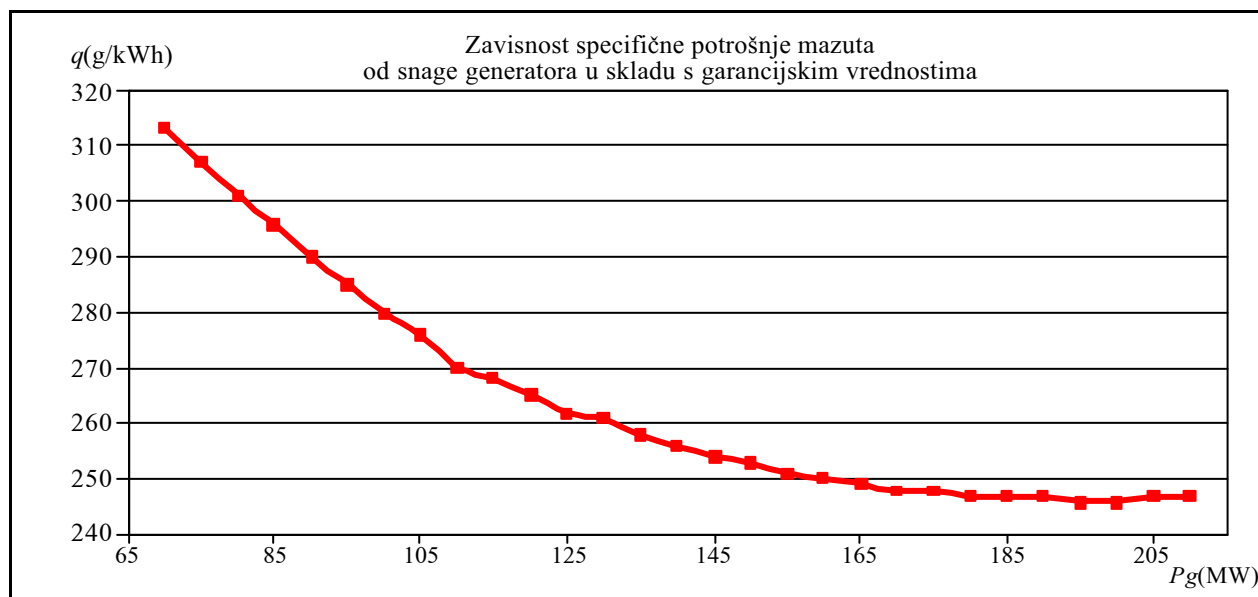
Na slici 12 predstavljene su garancijske vrednosti specifične potrošnje mazuta.

Korišćenje aditiva je veoma važno u uslovima velike potrošnje mazuta. Iskustva od TE Sisak-Hrvatska, TE Keracini- Grčka i TE Kiškanj-Rumunija, koji su po strukturi i tipu identični sa TE Negotino, govore da aditivi pored drugih karakteristika donose uštede goriva između 5 i 8 %.

Na slici 13 je prikazana direktna zavisnost cene električne energije od specifične potrošnje mazuta i to u tri slučaja specifične potrošnje. Prvi slučaj se odnosi na prosečnu specifičnu potrošnju od 260 gr/kWh, drugi slučaj se odnosi na specifičnu potrošnju od 245 gr/kWh, odnosno specifičnu potrošnju pri većim snagama od 165 MW (Pnom) i treći slučaj tretira specifičnu potrošnju od 245 gr/kWh i upotrebe aditiva.

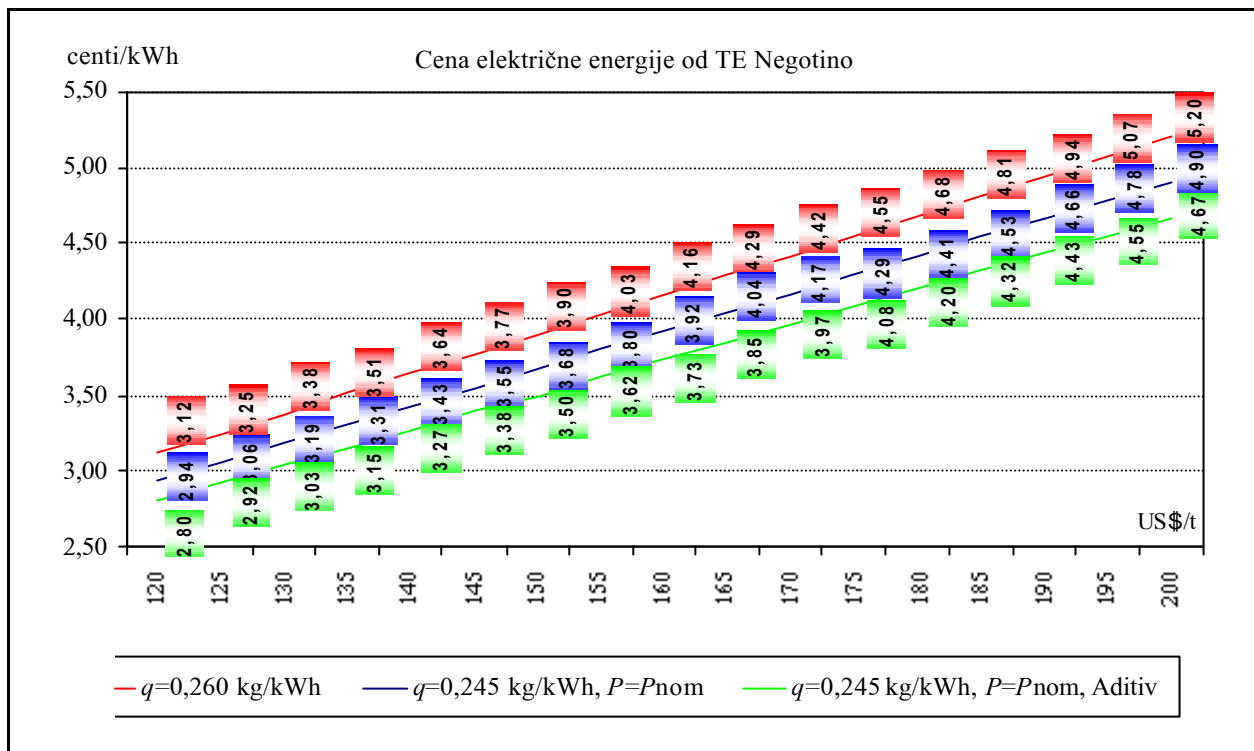
Na dijagramu na slici 14 je predstavljena ušteda goriva u slučaju proizvodnje električne energije u TE Negotino od 1 000 GWh i to za tri varijante predstavljene na slici 13.

I pored svih diskvalifikacija, nisu isključene sve mogućnosti da će TE Negotino realno biti u funkciji u idućem periodu. Navešćemo samo nekoliko argumenata u pravcu ove teze. Elektroenergetski izvori u Makedoniji (termo i hidro bez TE Negotino) realno mogu da obezbede 6 500 GWh električne energije. Konzum u 2003. godini u Makedoniji iznosio je oko 7 300 GWh. Ovi podaci pokazuju da je oko 800 GWh u 2003. godini obezbeđeno uvozom. Ako se uzme prosečno povećanje potrošnje električne energije od 3 % godišnje, jasno je da će se uvozna zavisnost sve više povećavati.



Slika 12. Zavisnost specifične potrošnje od snage generatora



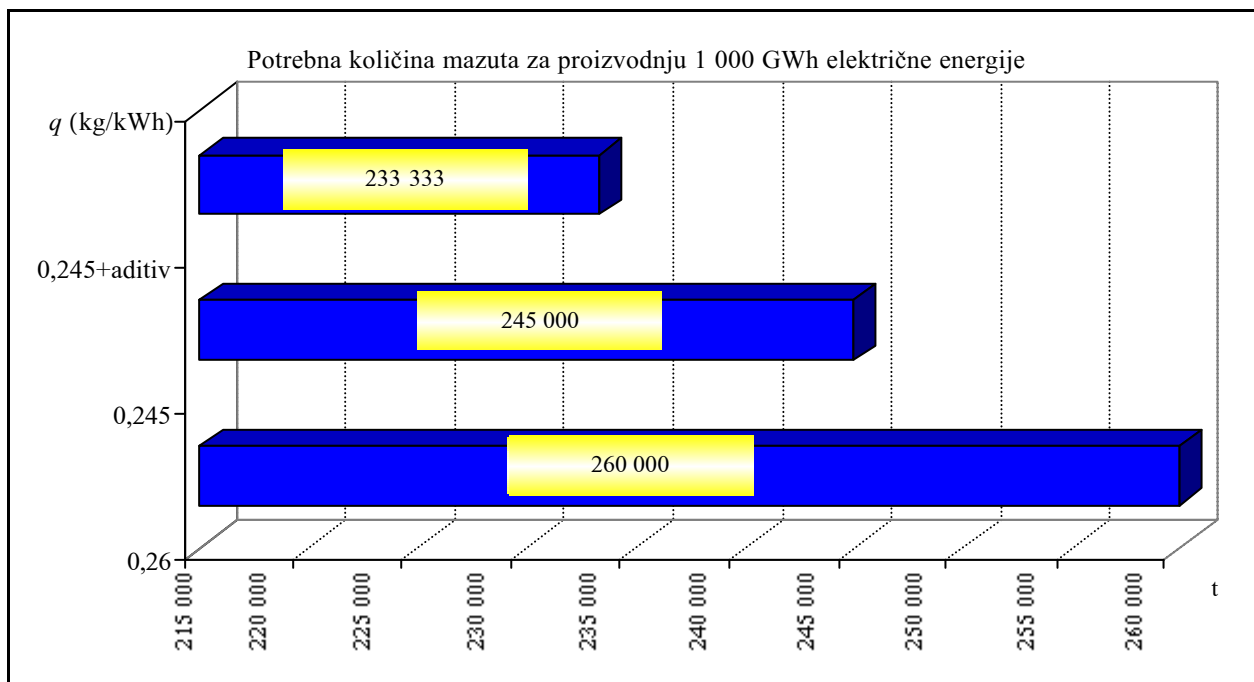


Slika 13. Cene proizvedene električne energije u TE Negotino

Kao kontraargumente konstatacija da će TE Negotino i dalje ostati rezerva sistema možemo da istaknemo :

- Trenutna cena električne energije iz TE Negotino koja u ovom trenutku ne zvuči nimalo konkurent-

no, u bliskoj budućnosti u uslovima liberalizacije može biti isplativija varijanta od uvozne električne energije. Na ovaj zaključak nas navodi činjenica da današnji najveći izvoznik električne energije u regionu, Bugarska, prodaje pre svega električnu



Slika 14. Uštede osnovnog goriva u TEC Negotino u zavisnost od specifične potrošnje mazuta

energiju od nuklearne centrale Kozloduj koja je znatno jeftinija. Kao što smo i prije napomenuli, Liberalizacija regiona u 2006. godini poklapa se sa zatvaranjem još dva bloka u NE Kozloduj (880 MW) i veliko je pitanje kolika će biti izvozna cena električne energije u tom i u idućem periodu.

- Makedonija se u bliskoj budućnosti ne može previše oslanjati na uvoz električne energije, a TE Negotino s obzirom na dobru kondiciju opreme ima realne šanse da bude angažovana i to prvom prilikom kada cena električne energije iz TE Negotino (ma kolika ona bila) bude konkurentna uvoznoj ceni.
- U veoma bliskoj budućnosti, u uslovima pogodno hidrologije, kad i ostali energetske izvori u Makedoniji budu mogli da zadovolje potrebe konzuma, ako region ima značajnu potrebu za električnom energijom (slučaj sa nedostatkom električne energije od leta 2003. godine kada je izvozna cena u regionu dostigla 6 centi/kWh), realan je angažman TE Negotino radi izvoza električne energije.

#### 4. ZAKLJUČCI

- *Potrebno je da se napuste iluzije da će u budućem periodu moći da se proizvede ili kupi jeftina električna energija u zemljama regiona;*
- *Samo dugoročni ugovor između OKTA-e i Elektroprivrede Makedonije može biti osnova za dobijanje prihvatljivih (ekonomski isplativih) cena električne energije od TE Negotino;*
- *Kretanje cene mazuta na svetskom tržištu daje dobre argumente u prilog prihvatljive cene mazuta;*
- *Metoda srednjih sezonskih ili godišnjih cena je dobra osnova za dobijanje cene mazuta koja će biti rastovarena od uobičajenih fluktuacija cene sirove nafte, odnosno cene mazuta na svetskom tržištu;*
- *Koordinirano planiranje između rafinerija i proizvođača električne energije može dati mnogo promjenjivih opcija;*

– *Korišćenje aditiva obezbeđuje značajne zaštede, a time i nižu proizvodnu cenu za kWh električne energije;*

#### 5. LITERATURA

- [1] Janevski S.R, INTERAKCIJA POMEĐU ELEKTROENERGETSKIOT SISTEM I ENERGETSKITE SISTEMI ZA TEČNI GORIVA I PRIRODEN GAS VO REPUBLIKA MAKEDONIJA, Magisterska rabota, Univerzitet „Sv. Kiril i Metodij” Skopje, Elektrotehnički Fakultet -Skopje, 28 June 1999, 101-127.
- [2] Janevski S.R, NEKOI ASPEKTI VO UČESTVOTO NA ELEKTROENERGETSKITE KAPACITETI VO ZADOVOLUVANJETO NA POTREBITE OD ELEKTRIČNA ENERGIJA VO PERIOD 2001-2015 GODINA, ENERGETIKA 30, Septemvri 2001, 15-19.
- [3] Janevski S.R, SVETSKI PAZAR NA SUROVA NAFTA- PREGLED NA MOŽNI SCENARIJA ZA DVIŽENJETO NA CENATA NA SUROVA NAFTA, ENERGETIKA 40, December 2003,18-23.
- [4] Janevski S.R, Bosevski T, TEHNOEKONOMSKI MODEL ZA VOVEDUVANJE NA SEKUNDARNO GORIVO VO TERMOCENTRALITE VO REPUBLIKA MAKEDONIJA, ENERGETIKA 35, Dekemvri 2002, 13-17.
- [5] U.S. Geological Survey, World Petroleum Assessment 2000, World Energy/DDS-60;
- [6] 2001: Energy Information Administration (EIA), Energy Markets and Contingency Information Division. 2025: EIA, Office of Integrated Analysis and Forecasting, IEO2003 WORLD Model run IEO2003.B25 (2003).
- [7] International Energy Annual 2001, DOE/EIA-0219(2001) (Washington, DC, February 2003).
- [8] World Market and Oil Price Chronology: 1970-2002, (Washington, DC, February 2003).
- [9] Podaci arhive svetske publikacije PLATT'S
- [10] Podaci arhive TEC Negotino

Rad je primljen u uredništvo 12. 01. 2004. godine



**Risto Janevski** je rođen 1966. godine u Skoplju, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. U 1994. godini diplomirao je na katedri elektrotehničkog fakulteta univerziteta Kiril i Metodij u Skoplju, a na istoj katedri 1999. godine odbranio je i magistarski rad na temu: *Interakcija između elektroenergetskog sistema i sistema tečnih goriva i gasa u Republici Makedoniji.*

Od 1995. godine radi u makedonskoj rafineriji nafte OKTA Skopje. Kao autor ili saradnik objavio je više od 20 radova na polju energetike u domaćim i stranim publikacijama. Isto tako je saradivao na više projekata koje su predvodili Istraživački centar za Energetiku, informatiku i materijale pri Makedonskoj akademiji nauka i umetnosti.

---

Miodrag Arsić,  
Stojan Sedmak i Vujadin Aleksić

# Ocena integriteta i produženje radnog veka rotornih bagera II 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 II**

*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. The 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*

## 7. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA INTEGRITET KONSTRUKCIJA

Kvalitativna etapa u istraživanju rasta zamorne prsline nastupila je primenom parametara mehanike loma, s obzirom na to da klasična koncepcija nije mogla da uzme u obzir plastične deformacije, koje prethode napredovanju prsline, i subkritični rast prsline.

### 7. 1. Teorijska razmatranja

Polje napona oko prsline izračunava se uz pretpostavku da se na vrhu prsline javljaju zanemarljivo male plastične deformacije, što podrazumeva singularni komponentni napon na frontu prsline, koji je potpuno određen faktorom intenziteta napona  $K_I$  [3].

Za zatezanje upravno na pravac prsline

$$K_I = \sqrt{2} f \frac{a}{w} \quad (16)$$

gde je:  $K_I$  – faktor intenziteta napona

$S$  – nazivni zatezni napon

$a$  – polovina dužine prsline

$f(a/w)$  – funkcija korekcije koja zavisi od dimenzija i oblika uzorka i oblika prsline.

S obzirom na to da rast prsline pri promenljivom opterećenju mašinskih delova i konstrukcija ima najbitniji uticaj na njihov vek, radi procene broja ciklusa opterećenja do pojave preloma i sprovođenja kompleksnih mera kontrole u izradi i praćenja u radu, od praktičnog je značaja utvrđivanje zavisnosti između prisutnog naponskog stanja na vrhu prsline, koje se pri promenljivom opterećenju određuje opsegom faktora intenziteta napona  $\Delta K$ , i brzine rasta prsline  $da/dN$ , jer u tom će trenutku prsline dostići kritičnu veličinu zavisi, u prvom redu, od spoljnog opterećenja i brzine rasta prsline.

Za promenljivo opterećenje upravno na pravac prsline opseg faktora intenziteta jednak je:

$$K = \sqrt{a} f \frac{a}{w} \quad (17)$$

gde je:  $DK$  – opseg faktora intenziteta napona

$DS$  – opseg napona

$a$  – polovina dužine prsline

$f(a/w)$  – funkcija korekcije koja zavisi od dimenzija i oblika uzorka i oblika prsline.

Pošto je rast prsline pri promenljivom opterećenju direktno povezan sa plastičnim deformacijama na vrhu prsline, u razmatranjima se mora uzeti u obzir i veličina plastične oblasti. Dimenzija ove plastične oblasti data je izrazom za radijus

za ravno stanje napona  $r_{pl} = \frac{1}{2} \frac{K}{R_e}^2$

pri ravnoj deformaciji  $r_{pl} = \frac{1}{2} \frac{K}{R_e}^2$  (18)

Iz datih zavisnosti se vidi da se radijus plastične oblasti ( $r_{pl}$ ) povećava sa rastom dužine prsline.

Do preloma mašinskih delova i konstrukcija pri promenljivom opterećenju će doći kada prsline dostigne kritičnu dužinu  $a_c$ . Kritična dužina prsline se može proračunati ako je poznata vrednost kritičnog faktora intenziteta napona  $K_c$ , ili se utvrđuje eksperimentalnim putem.

Mnogobrojna ispitivanja sprovedena sa ciljem da se utvrdi zavisnost između brzine rasta prsline i promenljivog opterećenja pokazala su da u logaritamskim koordinatama zavisnost  $da/dN$  od  $\Delta K$  predstavlja krivu, sigmaidalnog oblika (S - kriva), slika 29 i 30.

U prvom delu kriva se približava opsegu faktora intenziteta napona  $\Delta K_{th}$ , tzv. pragu zamora, ispod koga postojeća prsline dalje ne raste. Prag zamora se može shvatiti kao zamorna čvrstoća dela sa prslinom.

U drugom delu krive rasta prsline, ponašanje materijala odnosno stabilan rast prsline se sa dovoljnom tačnošću opisuje jednačinom Paris - Erdogana.

$$\frac{da}{dN} = C K^m \quad (19)$$

gde su  $C$  i  $m$  karakteristike otpornosti materijala prema rastu prsline, koje se određuju eksperimentalno.

Pretpostavi li se da je opseg napona  $DS$  u toku veka trajanja mašinskog dela, odnosno konstrukcije konstantan i da su poznate karakteristike otpornosti materijala prema rastu prsline  $C$  i  $m$  i funkcija popravke  $f(a/w)$ , jednačina Paris - Erdogana biće

$$\frac{da}{dN} = C \sqrt{a} f \frac{a}{w}^m \quad (20)$$

Integracijom jednačine od početne dužine prsline  $a_0$  (na početku dejstva promenljivog opterećenja) do kritične dužine prsline  $a_c$  (do završnog loma) dobija se ukupan broj ciklusa opterećenja  $N_u$  od iniciranja zamorne prsline do njenog kritičnog razvoja.

$$N_u = \frac{1}{\frac{m}{2} C} \frac{1}{\sqrt{a} f \frac{a}{w}^m} \frac{1}{a_0^{\frac{m}{2}}} \frac{1}{a_k^{\frac{m}{2}}} \quad (21)$$

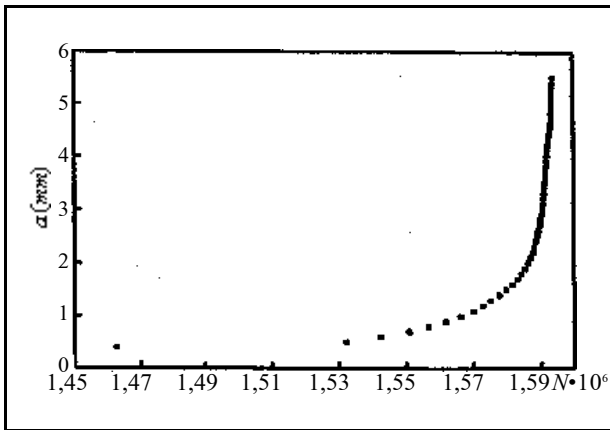
Kritična dužina prsline  $a_k$  se dobija iz izraza

$$a_k = \frac{1}{F} \frac{K_c}{W} \quad (22)$$

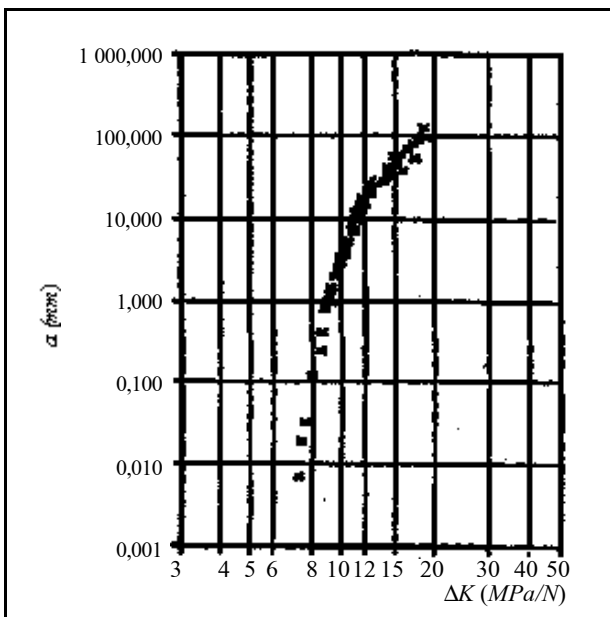
Kao što se vidi, ukupan vek na osnovu rasta zamorne prsline, iskazan brojem ciklusa do završnog loma, može analitički biti proračunat ako su poznati koeficijenti  $C$  i  $m$  i zavisnost opsega faktora intenziteta napona od relativne dužine prsline ( $a/w$ ).

## 7. 2. Rezultati ispitivanja i procena veka

Rezultati ispitivanja promene dužine prsline  $a$  u zavarenom spoju sa povećanjem broja ciklusa  $N$  prikazani su na slici 28, a rezultati ispitivanja zavisnosti brzine rasta prsline od opsega faktora intenziteta napona  $da/dN$ - $DK$  prikazani su na slici 29. Sa slika se vidi da je ukupni kritični broj ciklusa do loma 15 937 500 ciklusa, a prag zamora,  $\Delta K_{th} = 7,24 \text{ MPa} \sqrt{m}$ .



Slika 28. Promena dužine prsline  $a$  sa povećanjem broja ciklusa  $N$



Slika 29. Zavisnost  $da/dN$  -  $DK$  za prslinu u zavarenom spoju

Postupak za procenu veka konstrukcije sa prslinom na bazi rezultata eksperimentalnih ispitivanja je prikazan na slici 30. Značaj prsline treba analizirati s obzirom na mogući krti lom, odnosno kritični faktor intenziteta napona  $K_{Ic}$  i s obzirom na njen zamorni rast  $da/dN$ , odnosno prag zamora  $\Delta K_{th}$ .

Prema rezultatima sa slike 28 ukupni kritični broj ciklusa opterećenja do loma je 15 937 500 ciklusa, pa je vek kritičnog zavarenog spoja sa prslinom  $T_r = 15,94 \times 10^6 / 25 \times 60 \times 3 520 = 3,02$  godine, što se dobro slaže sa statističkim podacima iz eksploatacije.

## 8. OCENA POUZDANOSTI SKLOPOVA I BAGERA KAO CELINE

Rotorni bager predstavlja skup elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika strukturiranih na način koji obezbeđuje izvođenje predviđenih postupaka u radu i obavljanju postavljenih funkcija u vremenu i uslovima okoline. Sposobnost obavljanja radne funkcije u vremenu naziva se **radna sposobnost** rotornog bagera.

Ponašanje rotornog bagera u realnim uslovima eksploatacije je ono što se ne može predvideti inženjerskim metodama već se moraju koristiti metode teorije verovatnoće. Pouzdanost mašinskih delova i sklopova bagera u tom smislu predstavlja verovatnoću da će sistem uspešno obavljati radnu funkciju, u granicama dozvoljenog odstupanja, u projektovanom vremenu trajanja i datim uslovima okoline.

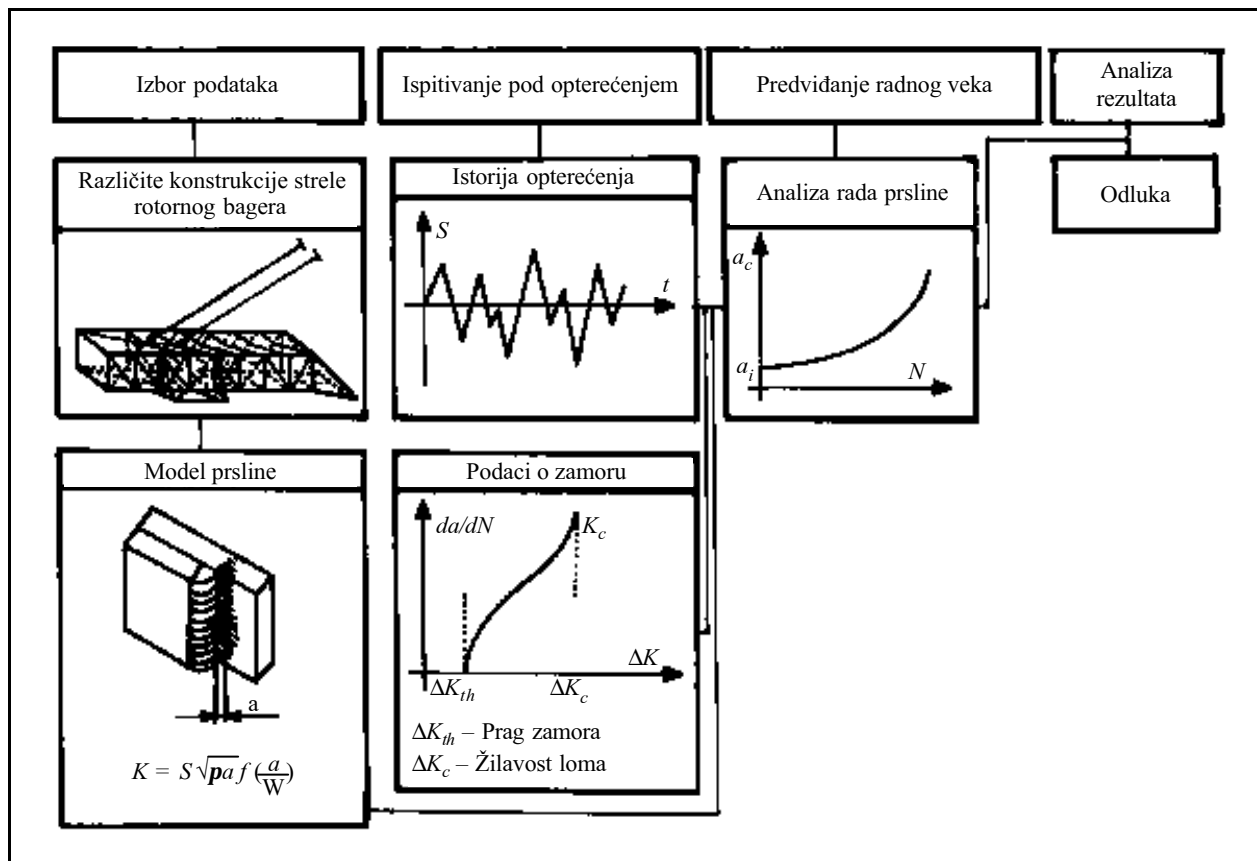
### 8. 1. Teorijske postavke

Razvoj koncepta pouzdanosti je u osnovi zasnovano na upoređenju određenih veličina koje karakterišu funkcije radne sposobnosti. Dva su glavna pristupa za ocenu pouzdanosti sistema i to:

- Ocena pouzdanosti zasnovana na vremenskim parametrima:
  - stanje u radu - sistem radno sposoban,
  - stanje u otkazu - sistem radno nesposoban.
- Ocena pouzdanosti zasnovana na upoređivanju radnih i kritičnih napona.

#### 8. 1. 1. Ocena pouzdanosti zasnovana na vremenskim parametrima

Pouzdanost može da se predstavi kao površina ispod krive koja označava radnu sposobnost sistema, i granicama  $t = 0$ , kada sistem počinje da vrši funkciju kriterijuma i trenutka vremena  $t = t_{grs}$  kada sistem gubi radnu sposobnost i nije u mogućnosti da zadovolji funkciju kriterijuma, slika 32. Ovo se može predstaviti sledećom jednačinom:

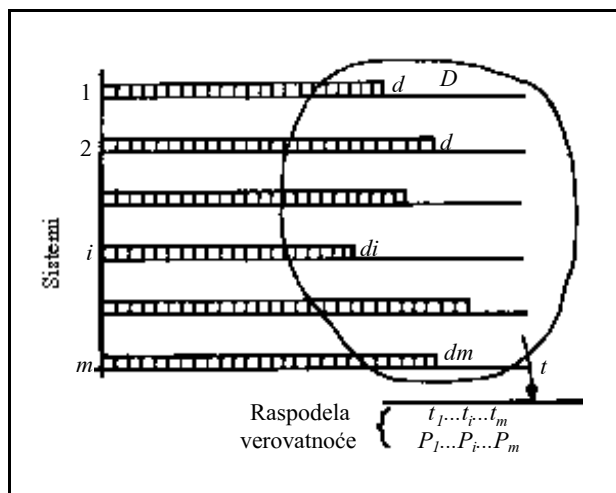


Slika 30. Postupak za predviđanje veka rotornog bagera na osnovu ispitivanja u eksploataciji

$$\text{Pouzdanost} = \int_0^{t_{grs}} (radnospobnost) dt \quad (23)$$

gde je:  $t_{grs}$  - vreme kada tehnički sistem gubi radnu sposobnost.

Vrednost integrala zavisi samo od brojne vrednosti njegove gornje granice  $t_{grs}$ , jer je donja granica



Slika 31. Jednorodni sistemi u otkaznom stanju u različitim trenutcima eksploatacije

$t = 0$ . Ovako određena pouzdanost predstavlja veličinu koju možemo da odredimo tek posle pojave stanja u otkazu sistema. Želja je da se ta vrednost zna pre početka rada sistema tj. da se predvidi taj trenutak.

Znajući ponašanje rotornih bagera u praksi, nije teško zaključiti da je prelaz iz stanja „u radu” u stanje „u otkazu”, u stvari trenutak koji se ne može predvideti unapred. Svaki sistem iz grupe jednorodnih sistema preći će u stanje „u otkazu” u različitom trenutku eksploatacije slika 31.

Radni vek  $T_r$  komponente bagera može da se predvidi na osnovu radnih časova, odnosno broja ciklusa  $N_r$  i prosečne frekvence  $f_{av}$ :  $T_r = N_r / f_{av}$ .

Prema statistici, rotorni bager se koristi 3 520 časova godišnje, a prosečna frekvencija napona, merena kao dvostruka amplituda, je 1 do 2 sec u transportu i 2 do 3 sec u radu, sa prosečnom vrednošću 2,4 sec. Spektar opterećenja radnog napona je određen za 440 časova, što odgovara  $n_b = 165\,296$  ciklusa. Za tako definisani spektar je prosečna frekvencija  $f_{av} = n_b / 440 \times 60 = 6,26$  ciklusa. Za zamornu čvrstoću (92,22 MPa, slika 27) i prosečno trajanje ciklusa od 2,4 sec je vek  $T_r = 1,8 \times 10^8 / 25 \times 60 \times 3\,520 = 34$  godine, što je realna vrednost.

8. 1. 2. Ocena pouzdanosti zasnovana na upoređenju radnih i kritičnih napona

Kada su u pitanju odgovorne konstrukcije, pod njihovom pouzdanošću se u prvom redu podrazumeva verovatnoća ispravnog funkcionisanja u predviđenim uslovima rada i veku trajanja. Danas se još uvek za dokaz pouzdanosti najčešće koristi izračunavanje faktora sigurnosti (S), koji predstavlja odnos između dozvoljenog napona zavarenog spoja ( $\sigma_{dzs}$ ) ili pouzdanost ( $R_{zs}$ ) i osnovnog (nominalnog) napona ( $\sigma$ ):

$$S = \frac{\sigma_{dzs}}{R_{zs}} \quad (24)$$

Ovo je uobičajena deterministička metoda, koja koristi fiksne, diskretne vrednosti za faktor sigurnosti i druge uticajne faktore, slika 32a. Ima projektanta koji smatraju da mogu potpuno da eliminišu otkaze ako uzmu moguću vrednost uticajnih faktora. Zato, treba uzeti u obzir odgovarajuće funkcije raspodele napona odnosno primeniti tzv. probabilistički proračun pouzdanosti, slika 32b.

U tom slučaju ne može se više govoriti o faktoru sigurnosti već samo o verovatnoći da je pouzdanost jednaka:

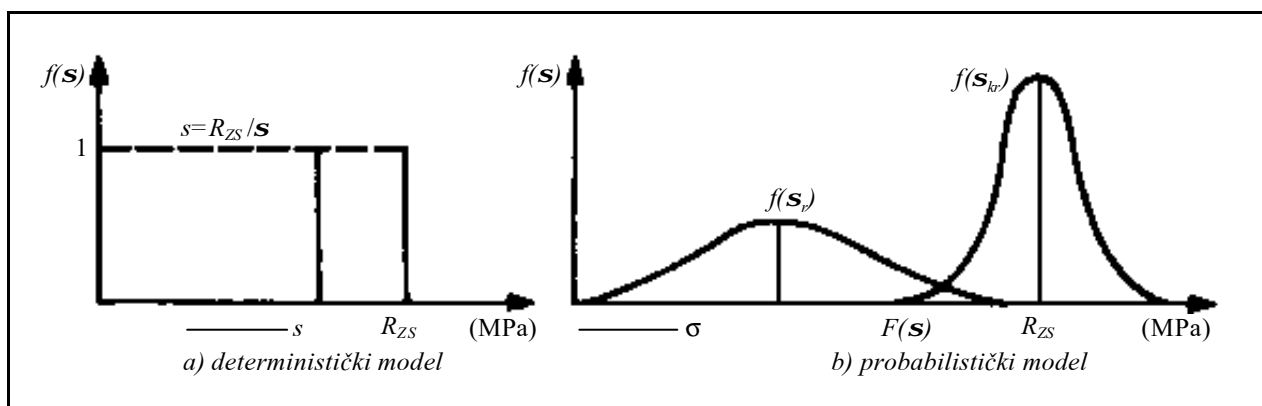
$$R > s \text{ odnosno } R - s > 0 \quad (25)$$

Kako su sve uticajne veličine na pouzdanost slučajno promenljive koje se bliže realnosti sama pouzdanost se može kvalifikovati kao probabilistička.

Pouzdanost odnosno verovatnoća otkaza odgovornih elemenata na nosećoj konstrukciji rotornih bagera u probabilističkom smislu zavisi od:

- spektra raspodele radnih napona u toku radnog veka za određene uslove rada,
- vrednosti zamorne čvrstoće, veličine rasipanja i verovatnoće otkaza za odgovarajuća naponska stanja,
- vrednost radne čvrstoće, utvrđene eksperimentalnim ispitivanjima, za određene uslove rada i verovatnoće razaranja,
- veličine rasipanja radnih napona i verovatnoće pojave kritičnih napona u predviđenim uslovima rada.

Svi navedeni elementi su potrebni za određivanje pouzdanosti odnosno verovatnoće otkaza, ako su najviši radni naponi u jednom delu svoga spektra,



Slika 32. Shematski prikaz determinističkog i probabilističkog modela proračuna pouzdanosti

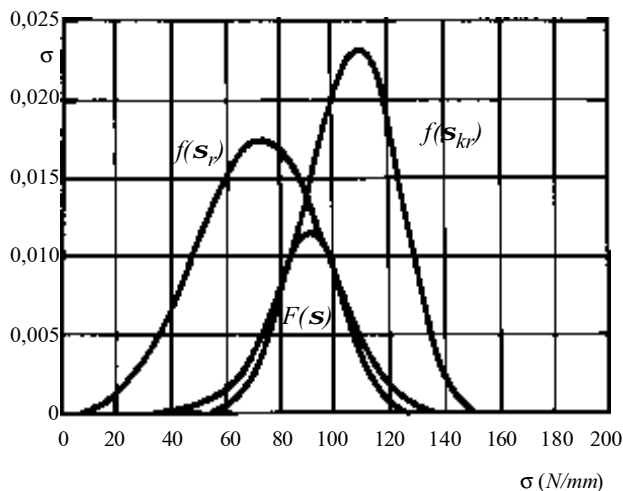
Tabela 7.

Parametri Vejbulobog zakona raspodele raspona radnih napona za kritične preseke u mernim zonama bagera

	$f(s) = \frac{r}{m} \exp\left(-\frac{r}{m} s\right)$				$f(s_{kr}) = \frac{kr}{m} \exp\left(-\frac{kr}{m} s_{kr}\right)$							
Parametri	b	m	d-test		b	m	d-test		b	m	d-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
Kritično	86	5,8	78,2	0,087<0,112	62	4,2	51,4	0,094<0,121	112	7,0	106,7	0,092<0,109

veći od najmanjeg kritičnog napona. Preklapanje ovih napona može nastati, ne samo usled nepredvidivih uslova rada i nepravilnog rukovanja rotornim bagerom, već se usvaja i kao polazna pretpostavka pri proračunu čvrstoće odgovornih elemenata nosećih konstrukcija rotornih bagera, s obzirom na to da su zahtevi za lakšim konstrukcijskim rešenjima prioritetni.

Prikaz preklapanja funkcija gustine raspodela najvećih radnih i kritičnih napona za funkcije raspodela, prema tabeli 7 dat je na slici 33 [14].



Slika 33. Prikaz preklapanja kritičnih i najvećih radnih napona za date funkcije raspodele

Relativna učestanost radnih napona na slici 33 prikazana je u kontinualnom obliku funkcije gustine raspodele  $f(s_r)$ , a kritični napon u obliku funkcije gustine raspodele  $f(s_{kr})$ . Verovatnoća otkaza odnosno pouzdanost kritičnog zavarenog spoja ( $R_{zs}$ ) na bazi njihovog preklapanja, za Weibulovu raspodelu, dobija se na osnovu jednačine u opštem obliku:

$$R_{zs} = 1 - \int_0^{\infty} e^{-y} e^{-\left(\frac{kr}{r}\right)^r} e^{-\left(\frac{kr}{r}\right)^r} dx \quad (26)$$

gde je:  $y = \frac{kr}{kr}$

- $f(s_r)$  – gustina raspodele radnih napona
- $f(s_{kr})$  – gustina raspodele kritičnih napona
- $R_{zs}$  – pouzdanost zavarenog spoja
- $h_{kr}$  – parametar razmere
- $b_{kr}$  – parametar oblika
- $g_{kr}$  – parametar položaja.

Zamenom eksperimentalno utvrđenih parametara dvoparametarske Weibulove raspodele za kritični presek (tabela 7) dobijaju se sledeće funkcije gustine raspodele za radne i kritične napone:

$$f(s_r) = \frac{3,7}{81} \left(\frac{r}{81}\right)^{3,7-1} e^{-\frac{r}{81}^{3,7}} \quad (27)$$

$$f(s_{kr}) = \frac{7,0}{112} \left(\frac{kr}{112}\right)^{7,0-1} e^{-\left(\frac{kr}{112}\right)^{7,0}} \quad (28)$$

a pouzdanost

$$R_{zs} = 1 - \int_0^{\infty} e^{-y} e^{-\left(\frac{112}{81}x\right)^{7,0}} dx \quad (29)$$

gde je:

$$y = \frac{kr}{kr}$$

Izračunavanjem integrala (29) metodom brojnog integraljenja dobija se da je pouzdanost kritičnog zavarenog spoja ( $R_{zs}$ ) jednaka  $R_{zsa} = 1 - 0,3704 = 0,6296$ .

Na osnovu višegodišnjih analiza otkaza i pokazatelja o ugroženosti kritičnih zavarenih spojeva na streli rotora utvrđena pouzdanost za jedan od odgovornih zavarenih spojeva se može smatrati dovoljno realnom.

Polazeći od principa da sve veličine kojima se određuje pouzdanost odnosno verovatnoća otkaza imaju svoje verovatnoće pojave sledi zaključak da i pouzdanost treba posmatrati u određenim područjima preklapanja za različite verovatnoće najvećih radnih i kritičnih napona. U tom smislu utvrđeno je da je potrebno pouzdanost odnosno verovatnoću otkaza prikazati u zavisnosti od stepena preklapanja, usvajajući pri tome različite veličine raspodele najvećih radnih i kritičnih napona. Na taj se način dobija jasna predstava o pojedinim uticajima na pouzdanost odnosno verovatnoću otkaza u širokim područjima njihovih vrednosti, što se u ovom slučaju može iskazati funkcijom gustine Gausove normalne raspodele, koja je na slici 33, ucrtana sa faktorom normalizacije 2.9. Opšti oblik normalne raspodele dat je jednačinom (30). Utvrđena funkcija gustine raspodele verovatnoće otkaza sa parametrima normalne raspodele data je jednačinom (31).

$$f(s) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{s^2}{2S^2}} \quad (30)$$

gde je  $s$  srednja vrednost napona,  $S$  rasipanje srednje vrednosti

$$f(s) = \frac{1}{11,8\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{91,4}{11,8}\right)^2} \quad (31)$$

Za ocenu radnog veka odgovornih konstrukcija potrebno je definisati spektar promenljivog opterećenja, koji odražava realne radne uslove. Zbog toga je neophodno da se izmere deformacije za različite, reprezentativne radne uslove rotornog bagera i da se na osnovu toga odrede spektri radnih napona.



## 9. MERE PREVENTIVE OŠTEĆENJA I PRODUŽENJE VEKA BAGERA

Prevreteni lom ili oštećenje delova i elemenata konstrukcije rotornih bagera izazvano je istovremenim uticajem velikog broja tehnološko - metalurških, konstrukcijskih i eksploatacijskih faktora. Zato povoljna konstrukcijska rešenja, koja bi obezbedila pogonsku sigurnost delova i integritet konstrukcija se mogu ostvariti samo potpunim poznavanjem njihovog ponašanja u različitim režimima rada.

### 9. 1. Tehnička dijagnostika

Prilikom eksploatacije rotornih bagera dolazi do postepenog gubljenja korisnih osobina sklopova i njegovih sastavnih delova. Takođe, degradacija osobina materijala i/ili deformacija elemenata može biti ubrzana zbog eksploatacionih i remontnih grešaka i zato su neophodna periodična ili stalna dijagnostička merenja i izvođenja periodičnih ispitivanja, tako da procesi koji bi mogli stvoriti uslove za stvaranje otkaza sistema budu pod sistematičnom kontrolom.

Izvođenje tehničke dijagnostike se mora zasnivati na tri osnovna principa:

1. Obim ispitivanja i merenja mora da proizilazi iz istorije upotrebe rotornih bagera uz ekspertske poznavanje njegove konstrukcije i uslova rada.

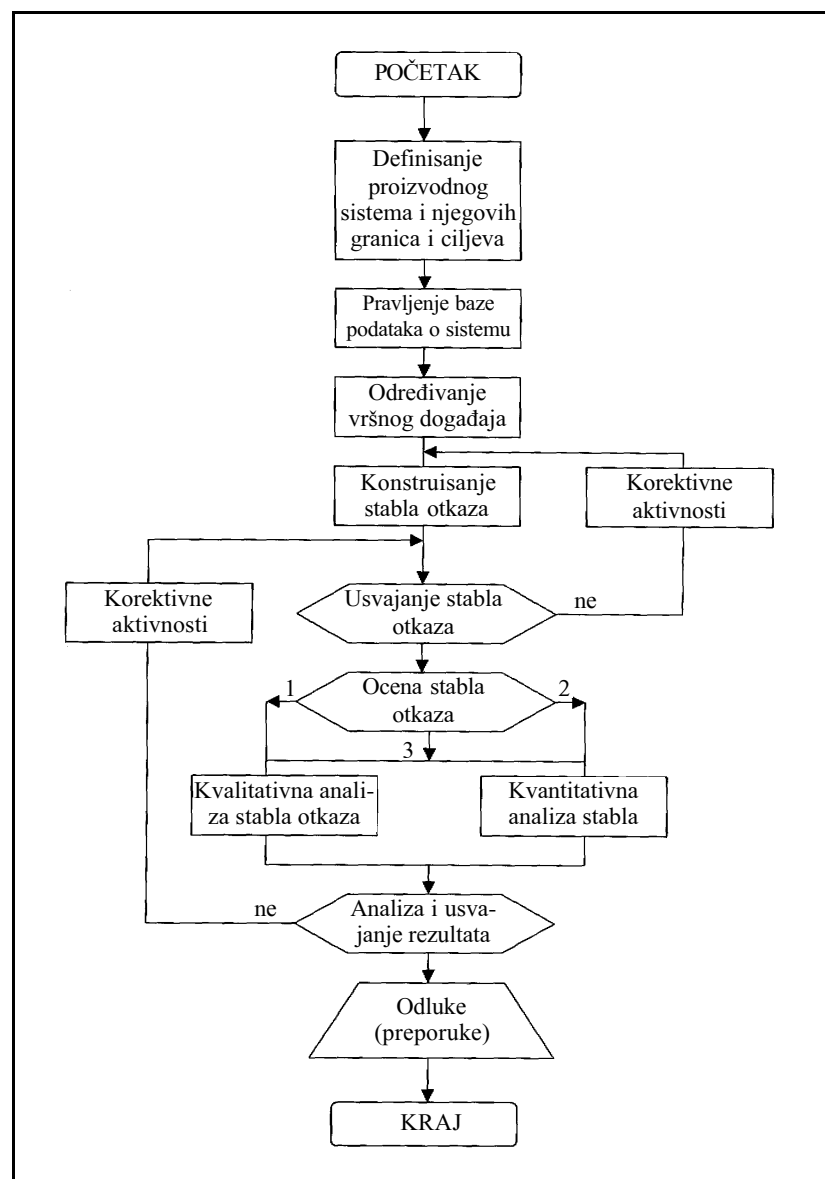
2. Ispitivanje i merenje se mora sprovoditi po određenoj proceduri, primenom adekvatne opreme i kvalifikovanih kadrova.

3. Rezultate ispitivanja treba prikazati na način da zaključci obuhvataju eksploataciju proizvodno tehničkih sistema, raspoloživost ispitnog osoblja i tim stručnjaka sa odgovarajućim iskustvom i znanjem iz oblasti projektovanja, konstruisanja, montaže, eksploatacije, održavanja, pouzdanosti, mehanike loma i dr.

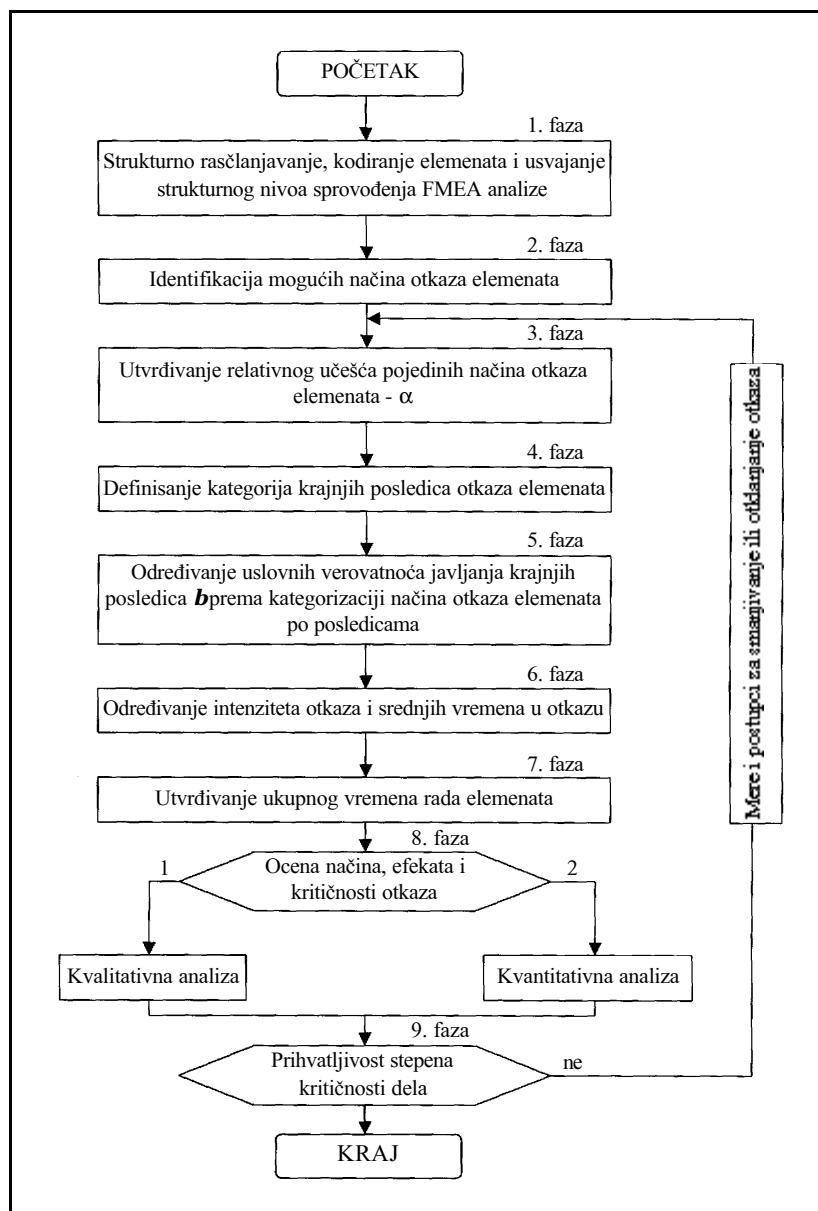
Pravilno sprovedena dijagnostika obezbeđuje delove bagera od iznenadnog otkaza, zaposlenima bezbedan rad, racionalnu tehnokonomsku eksploataciju i održavanje.

Veliki proizvodni sistemi, kakav je i BTO sistem, zbog složenosti strukture, uslova rada i velikog broja sastavnih delova vrlo se teško mogu analizirati. U ovim slučajevima, korišćenjem manjih, nužnih uprošćavanja u zavisnosti od potreba, efikasno se primenjuje analiza stabla otkaza, slika 34. Za analizu načina i efekata otkaza, kao metoda kvalitativne i kvantitativne analize pouzdanosti sastavnih delova tehnoloških sistema u svim fazama njegovog životnog ciklusa i preventivnu analizu svih potencijalnih otkaza elemenata sistema i njihovih uticaja primenjuje se metoda FMEA, slika 35.

Na osnovu obavljenih istraživanja otkaza i uzroka neispravnosti pogona kopanja i reduktora pogona kopanja bagera metodom stabla otkaza, analizom načina efekata i kritičnosti otkaza metodom



Slika 34. Blok dijagram postupka analize stabla otkaza



Slika 35. Blok dijagram FMEA postupka analize

FMEA, i pokazatelja pouzdanosti dobijenih na osnovu analize sakupljenih podataka za realne uslove eksploatacije, može se sasvim precizno izvršiti optimalno postavljanje sistema kontinualnog dijagnosticiranja reduktora pogona kopanja bagera na primeni PLC-PC sprege [15].

Na slici 36 dat je simboličko - šematski prikaz konfiguracije sistema kontinuiranog upravljanja, nadgledanja i dijagnosticiranja reduktora kopanja bagera kroz sve systemske nivoe. Na slici se vidi da je za PLC [16] moguće direktno vezati operatorski interfejs i ručni programator. Ručni programator ima numeričku tastaturu sa svetlosnim indikatorima za označavanje statusa i operatorski terminal na kome se može kod

boljih modela definisati i do 200 poruka sa numeričkim i varijabilnim porukama. Operatorski interfejs ima alfa-numerički displej sa funkcionalnom tastaturom i služi za prikaz vrednosti procesnih varijabli, statusa, alarma i poruka, dnevnika greška-sistemskih i onih definisanih korisničkim programom sa vremenom nastanka i zadatim parametrima po nadimku ili adresi.

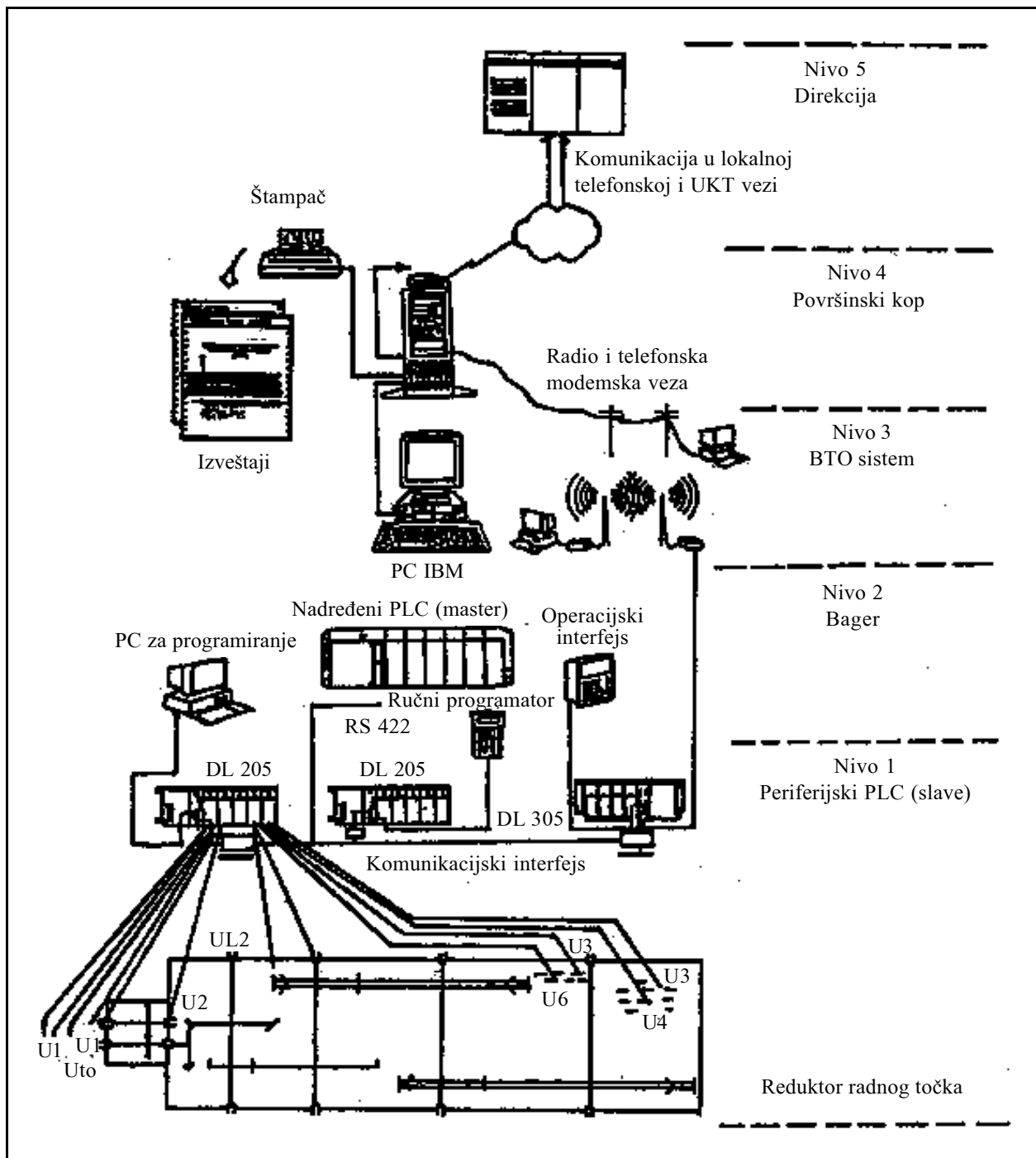
## 9. 2. Baze podataka

Baze podataka realizovanih istraživanja na adekvatnim konstrukcijama pružaju velike mogućnosti u opsežnim analizama ponašanja odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija u cilju utvrđivanja promena mehaničkih svojstava materijala, delova i zavarenih spojeva konstrukcija pri variranju velikog broja uticajnih faktora, a da se neki nepoželjni efekti svedu na podnošljivu vrednost, odnosno da se realizuje povoljno konstrukcijsko rešenje kao celine.

Važne informacije za usavršavanje metoda projektovanja i konstruisanja odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija, za poboljšanje svojstava postojećih materijala i tehnologija njihove obrade i za razvoj novih materijala predstavljaju analize oštećenja i lomova delova i elemenata nosećih konstrukcija. Takođe, analize oštećenja i lomova omogućuju razvoj novih tehničkih rešenja i metoda ispitivanja još u fazi prototipa. Analize

oštećenja i lomova u cilju utvrđivanja uzroka koji do njih dovode, da bi se isti otklonili, predstavlja proces koji zahteva sistematizovan prilaz problemu, slika 37.

Podaci o opterećenju, karakteristikama osnovnog materijala i njegovim zavarenim spojevima, tehnologiji izrade, tehničkim i fizičkim karakteristikama zabeleženih lomova i predviđenim merama preventive oštećenja i razaranja unose se u odgovarajuću bazu podataka. Takođe, baze podataka treba da sadrže i podatke sakupljene pri ispitivanju prethodnih struktura adekvatnih nosećih konstrukcija. Na slici 38 prikazana je struktura potrebne baze podataka za odgovorne delove i elemente nosećih konstrukcija rotornih bagera.



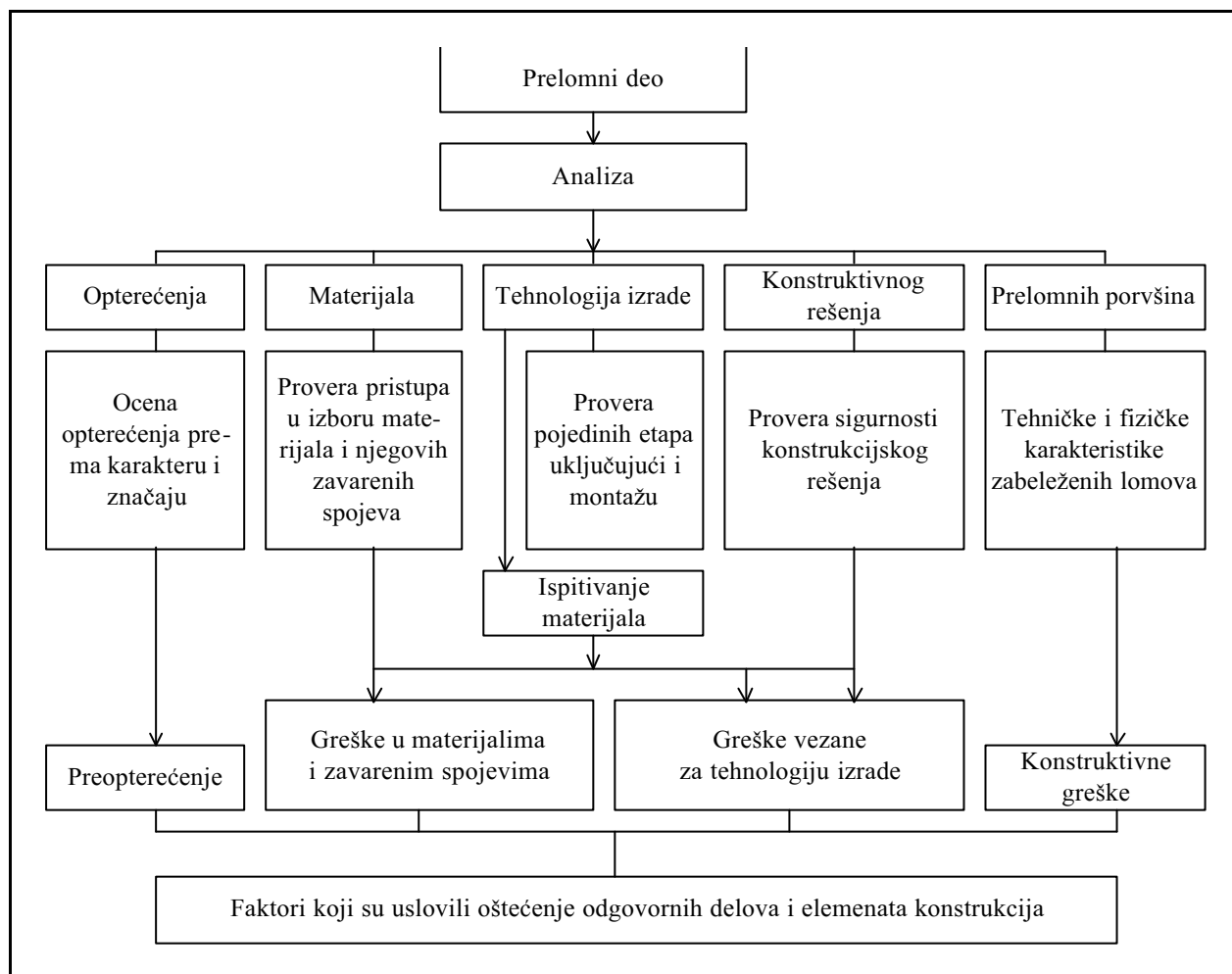
Slika 36. Prikaz konfiguracije sistema upravljanja, nadgledanja i dijagnosticiranja reduktora kopanja rotornog bagera

Brzu i pouzdanu ocenu integriteta i podobnosti za upotrebu odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija rotornih bagera moguće je doneti isključivo stvaranjem baze podataka i osnova za razvoj računarskih programa. Prateći softverski paketi omogućili bi efikasnije korišćenje baze podataka, analizu pojedinih uticajnih faktora, tehnika poboljšanja, mogućnosti preventive njihovog razaranja i

pretraživanje varijantnih rešenja u svim fazama projektovanja i razvoja konstrukcija.

### 9. 3. Mere preventive oštećenja i lomova

Analizom oštećenja i lomova odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija utvrđuju se uzroci koji dovode do razaranja i omogućuje se do-



Slika 37. Proces analize oštećenja i lomova odgovornih delova i elemenata konstrukcija

nošenje odluke o isključenju konkretnog tehničkog rešenja ili mere preventive, slika 39.

Odluka o isključenju konkretnog tehničkog rešenja ujedno podrazumeva razradu novog optimalnog konstrukcijskog rešenja pri čemu se variraju opterećenja, za različite režime rada, dimenzije delova i elemenata nosećih konstrukcija, oblici zavarenih spojeva, vrste materijala, postupci i kvalitet izrade.

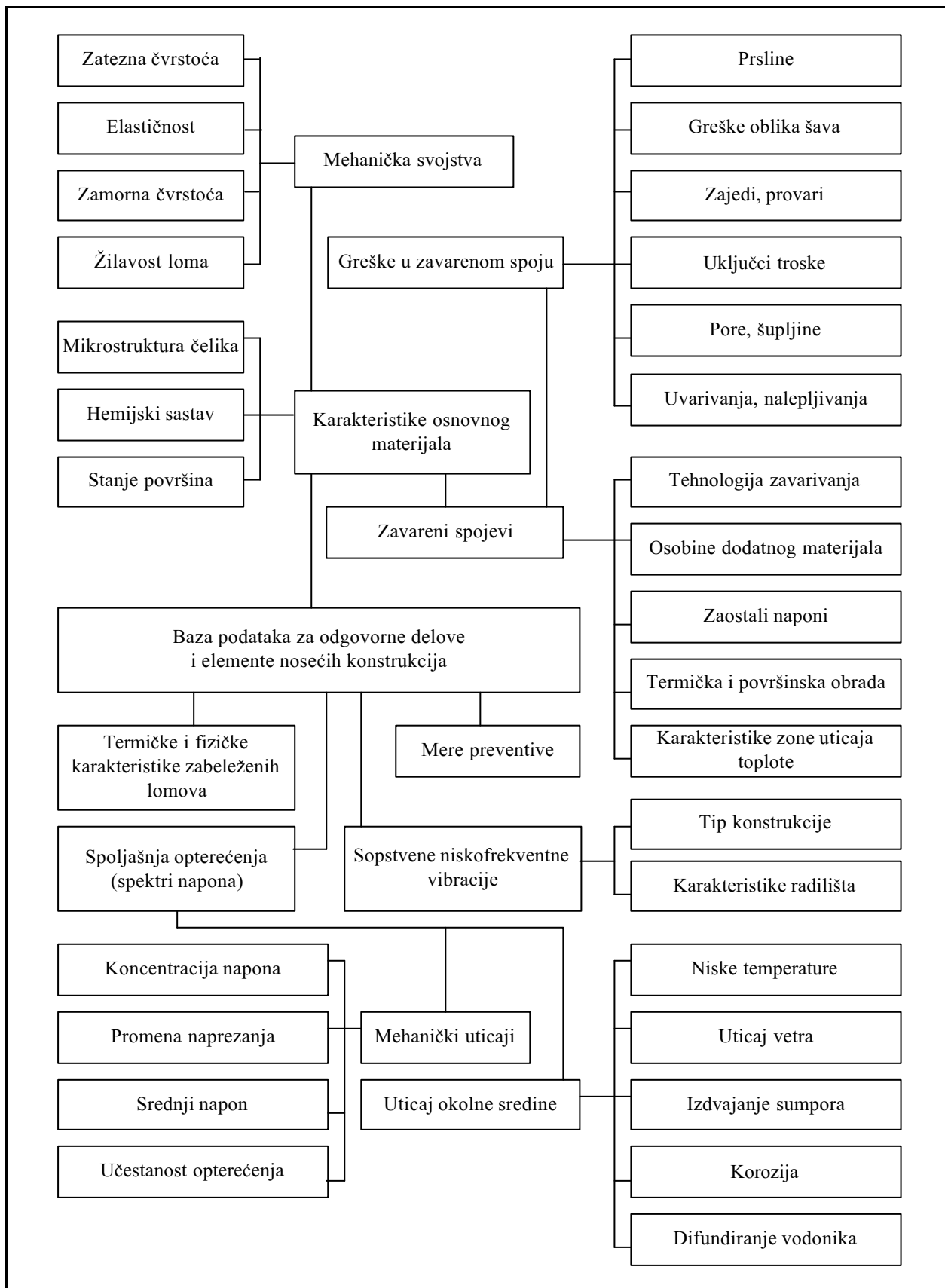
Izmena karaktera opterećenja saglasno uslovima eksploatacije sastoji se u eksperimentalnom utvrđivanju radnih opterećenja odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija i izmeni konstrukcijskog rešenja ili u određivanju uslova rada i režima opterećenja za pouzdan rad konkretnog tehničkog rešenja.

Izmena tehnološkog procesa izrade sastoji se u pretraživanju: različitih oblika i dimenzija delova i elemenata nosećih konstrukcija, postupaka zavarivanja, osnovnog materijala i postupka termičke obrade.

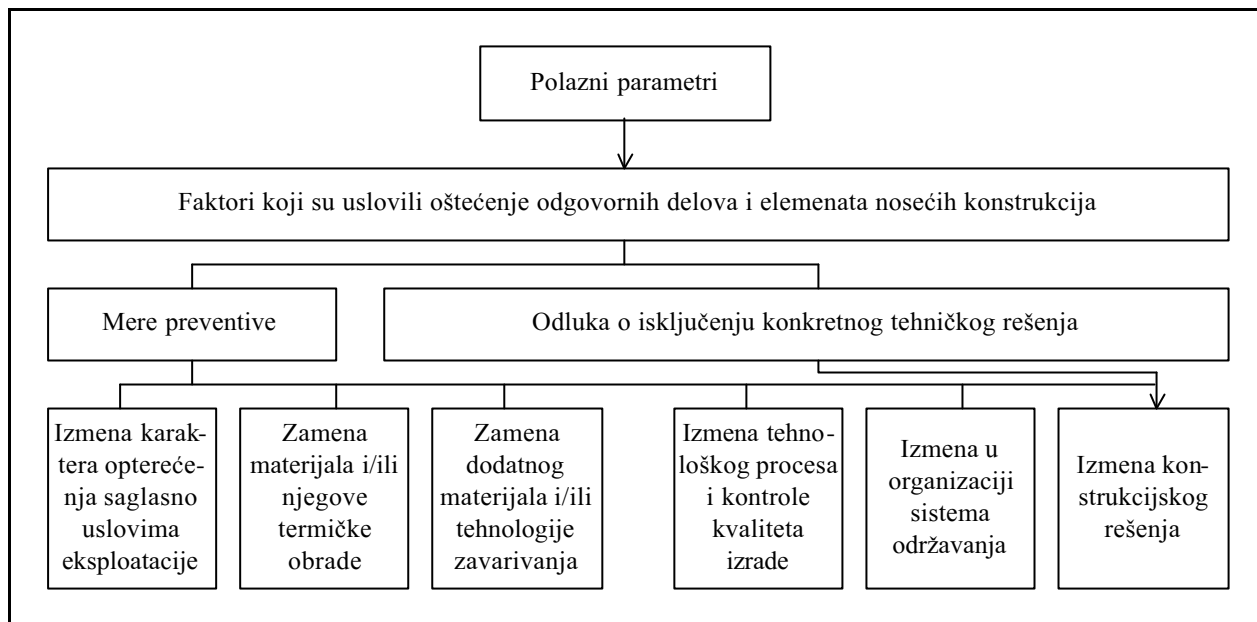
Izmena kontrole kvaliteta izrade podrazumeva predviđanje strožijih zahteva kontrole i ispitivanje pre početka izrade, u toku izrade i nakon montaže.

S obzirom na to da napred navedene mere preventive oštećenja i lomova predstavljaju kompleksna i skupa rešenja u cilju povećanja sigurnosti odgovornih delova i elemenata nosećih konstrukcija, poslednjih godina mnogi eminentni svetski instituti, izvršili su opsežna eksperimentalna istraživanja za iznalaženje tehnika i metoda za jednostavnije i jeftinije poboljšanje statičkih i zamornih karakteristika delova i elemenata konstrukcija.

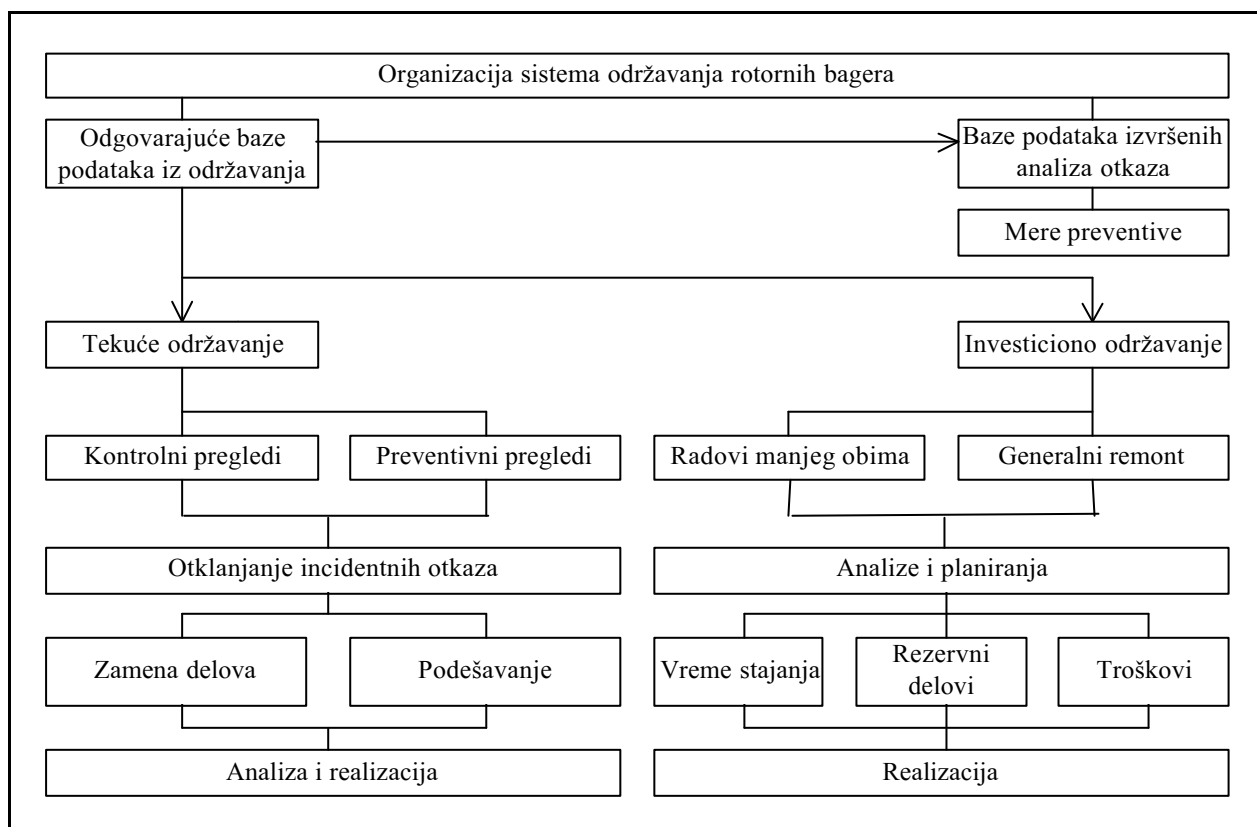
Tehnika poboljšanja do kojih se došlo, nisu podjednako uspešne kod različitih konstrukcijskih rešenja, jer njihov efekat zavisi od vrste i režima opterećenja, karakteristika materijala, strukture zavarenih elemenata, pa preporuke za primenu pojedinih metoda, u prvom redu, zavise od mogućnosti izvođenja konstrukcije i iskustva konstruktora.



Slika 38. Struktura baze podataka za odgovorne delove i elemente nosećih konstrukcija



Slika 39. Mere preventive



Slika 40. Organizacioni model sistema održavanja rotornih bagera

#### 9. 4. Organizaciona shema sistema održavanja rotornih bagera

Kontinualni tehnološki proces otkopavanja, transporta i odlaganja otkrivke i deponovanja uglja ostva-

ruje se kompaktnim BTO-kompleksima. Kompaktni BTO sistem koji čine: rotorni bager, transporter sa gumenom trakom i odlagač zahtevaju posebnu organizaciju sistema održavanja. Organizacija sistema održavanja rotornih bagera zavisi pre svega od njego-

ve veličine, oblika i konstrukcije, broja zaposlenih, iskustvu stručnjaka i odgovarajućih baza podataka iz održavanja i ispitivanja prethodnih pogonskih agregata i nosećih konstrukcija različitih tipova bagera.

Na bazi realizovanih istraživanja [1–16] i višegodišnjeg iskustva autora u održavanju BTO sistema, na slici 40 je dat organizacioni model sistema održavanja rotornih bagera.

## 10. 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.*

## 11. 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 ZAVARENIH 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., Čirković B.: ANALIZA UZROKA HAVARIJE ZAVARENOG NOSAČA SATELITA REDUKTORA ZA POGON ROTORA BAGERA SRS 1300.26/5.0, Međunarodno savetovanje „Zavarivanje 96”, Beograd, 1996, str. 29.
- [6] Volkov D. P., Čerkasov 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., Čirković 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., Čirković 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 ZAVARENIH 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 prslina 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.



---

*Đuro Radinović*

# Dostignuća u dugoročnoj prognozi vremena i njihova primena u elektroprivredi

Pregledni rad  
UDK: 551.509.33; 621.311.21

---

*Rezime:*

*U radu su prikazana neočekivano dobra dostignuća u dugoročnoj prognozi vremena postignuta poslednjih godina. Ta dostignuća se odnose na procese globalnih razmera. Međutim, ona se mogu primeniti na procese regionalnih razmera u oblasti Evrope. Metodika tih istraživanja je izložena u ovom radu. Može se verovati da bi postignuti rezultati u tim istraživanjima predstavljali velik doprinos u planiranju i ekonomičnijem funkcionisanju sistema elektroprivrede u Srbiji i Crnoj Gori.*

**Ključne reči:** *dugoročna prognoza vremena, elektroprivreda*

---

*Abstract:*

*ACHIEVEMENTS IN LONG-TERM WEATHER FORECASTING  
AND THEIR APPLICATION IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY*

*Unexpected achievements in long-range weather forecasting have been obtained during the last few years. These achievements relate to the global scale atmospheric processes. However, they could be applied on the regional scale atmospheric processes in the European area. The methodology of these studies is described in this paper. It is believed that the expected results in these studies could be of great interest in the planning and economic functioning of the Electric Power System in Serbia and Montenegro.*

**Key words:** *long-range weather forecasting, electric power system*

---

## 1. UVOD

Elektroprivreda je delatnost čije funkcionisanje u velikoj meri zavisi od vremenskih uslova. Stoga je prognoza vremena jedan od značajnih faktora u upravljanju elektroenergetskim sistemom i planiranju korišćenja raspoloživih resursa. Zato je potrebno da se prati razvoj prognoze vremena, kao i njena primena u Elektroprivredi Srbije i Crne Gore. Poslednji neočekivani napredak u dugoročnoj prognozi vremena, kojem je doprinela i naša Elektroprivreda, bio je povod da se napiše ovaj pregledni rad.

## 2. RAZVOJ KRATKOROČNE PROGNOZE VREMENA

Početkom 20. veka, Norvežanin Viljem Bjerknnes [1] je pokazao da se vreme može predvideti ako je poznato početno stanje atmosfere i ako se uzmu u obzir zakoni fizike koji utiču na ponašanje atmosfere. Iz tog stava je proizašao sistem diferencijalnih parcijalnih jednačina, koje je bilo moguće rešiti numeričkim metodima tek razvojem moćnih računara. Tako je u drugoj polovini 20. veka došlo do snažnog

---

*Prof. dr Đuro Radinović, – 11 070 Beograd, Bulevar Arsenija Čarnojevića 124*

razvoja matematičkih prognostičkih modela i znatnog unapređenja kratkoročne prognoze vremena.

Međutim, početno stanje atmosfere još uvek nije moguće dovoljno tačno predstaviti, a sistem prognostičkih jednačina nije u stanju da verno opiše komplikovane procese u atmosferi kao što su transformacija energije, turbulencija, trenje i dr. Stoga, rešenja prognostičkih jednačina sadrže greške koje se vremenom povećavaju. Tako, početni determinizam atmosferskih pojava već posle nedelju dana dobija stohastički karakter i kratkoročne prognoze vremena gube praktičnu vrednost.

### **3. OSNOVA DUGOROČNE PROGNOZE VREMENA**

Problem dugoročne prognoze vremena se rešava na sasvim drugi način. Tu se polazi od stanovišta da je atmosfera deo geofizičkog sistema i da je njeno ponašanje kontrolisano spoljnim uticajima ostalih komponenata tog sistema koga čine vasioni faktori, okeani, kopno, polarni led, biljni pokrivač i dr.).

Polazeći od činjenice da skoro celokupna energija koja pokreće procese u atmosferi dolazi od Sunca, normalno je pretpostaviti da promene na površini Sunca utiču na vreme na Zemlji. Tako je razvijen metod dugoročne prognoze vremena zasnovan na broju Sunčevih pega.

Dugogodišnja osmatranja granice leda u polarnim oblastima Severnog Atlantika pokazala su da se ta granica u toku godine pomera meridionalno za više hiljada kilometara. Kad se pomeri daleko na jug to se zove jaki led, a kad se zadrži više na severu, slabi led. Serije ciklona koji preko Severnog Atlantika dospevaju na Evropski kontinent slede tu granicu i ostvaruju određen uticaj na vreme u Evropi. Taj uticaj se proteže na 1-2 sezone unapred od osmotrenog stanja granice polarnog leda.

Stalne promene meteoroloških elemenata navele su mnoge istraživače da primenom statističkih tehnika utvrde neku periodičnost ili međusobnu zavisnost. Tako je formulisano više metoda dugoročne prognoze zasnovane na prostoj i višestrukoj korelaciji.

Dugogodišnjim meteorološkim osmatranjima zapaženo je da se neki tipovi vremena u određeno doba godine javljaju češće nego što bi se moglo očekivati na bazi slučaja. Kao rezultat tih zapažanja, u narodu su nastale mnoge izreke kao što su „miholjsko leto”, „januarsko topljenje”, „ledeni sveti” i dr. Na toj osnovi je formulisano metod singulariteta za izradu dugoročne prognoze vremena.

Metod dugoročne prognoze vremena koji je dobio najširu primenu je metod analogija. Osnovna ideja na kojoj se zasniva ovaj metod je vrlo jednostavna: ako se nađu dve slične vremenske situacije

njihov dalji razvoj će biti sličan. U svetu je dosad korišćeno više načina primene ovog metoda. U Meteorološkoj službi Velike Britanije osnovu analogije predstavljale su anomalije (odstupanja od normale) prizemne temperature. U Meteorološkoj službi SR Nemačke korišćene su anomalije vazdušnog pritiska na morskome nivou. U Meteorološkoj službi SAD korišćene su anomalije polja pritiska u sredini troposfere, itd.

Dugoročne prognoze vremena koje su se izradivale po napred navedenim i mnogim drugim manje poznatim metodima, ostvarivale su se u granicama klimatološke verovatnoće. Pošto se jednom izračunata klimatološka verovatnoća može koristiti bez dodatnog rada, to svi ovi metodi nisu bili od praktičnog značaja.

### **4. DOPRINOS ELEKTROPRIVREDE SRBIJE RAZVOJU DUGOROČNE PROGNOZE VREMENA**

Jedan događaj vezan za dugoročnu prognozu vremena i Elektroprivredu Srbije je vredan pomena. U poslednjoj fazi izgradnje HE „Đerdap I”, grupa stručnjaka iz Direkcije za izgradnju te HE je došla u Republički hidrometeorološki zavod Srbije da se informiše za dugoročnu prognozu vremena, u cilju planiranja momenta pregrađivanja Dunava. Objasnjeno im je da ne postoji metod dugoročne prognoze vremena čije bi ostvarenje bilo pouzdanije od klimatološke verovatnoće.

Međutim, izloženo im je uverenje da metod analogija daje slabe rezultate, jer se izbor analogija, odnosno izbor stepena sličnosti dveju vremenskih situacija zasniva na vrlo promenljivim meteorološkim veličinama (prizemna temperatura, pritisak na morskome nivou, visina standardne izobarske visine i sl.). U razgovorima je istaknuto uverenje da bi metod analogija baziran na RT 1 000-500 hPa, što predstavlja toplotno stanje donje polovine mase atmosfere, verovatno dao mnogo pouzdanije dugoročne prognoze. Ali, za potvrdu tog uverenja, bilo je potrebno da se izvedu određeni eksperimenti i obavi znatna priprema podataka.

Predstavnici HE „Đerdap I” su prihvatili da finansiraju tu pripremu podataka i izvođenje eksperimenata. Eksperimenti su potvrdili izraženo uverenje i na osnovu te prognoze određeno je vreme pregrađivanja Dunava. Zatim je taj metod sa postignutim rezultatima objavljen u američkom naučnom časopisu „Monthly Weather Review” No. 103, 1975. godine [2]. Istovremeno je ovaj metod operativno uveden u Republičkom i Saveznom hidrometeorološkom zavodu za izradu mesečnih prognoza vremena.

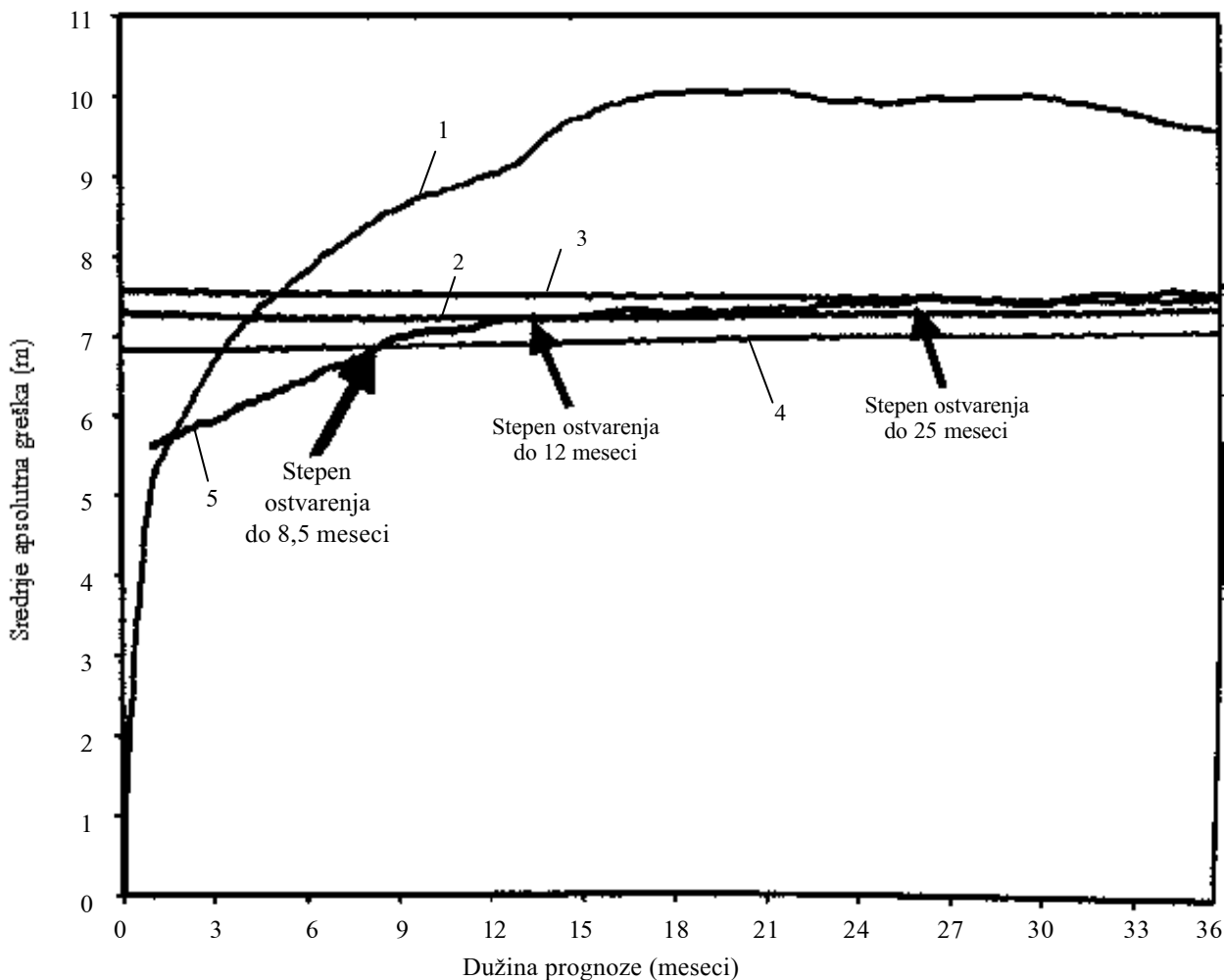
## 5. OBJEKTIVNA SEZONSKA ANALOGNA PROGNOZA VREMENA

Drugi značajan događaj, zbog kojeg je uglavnom i napisan ovaj rad, desio se 4. februara 2003. godine. Toga dana, održan je u Vašingtonu naučni Seminar sa temom „Objektivna sezonska analogna prognoza vremena korišćenjem NCEP reanaliza”. Organizatori ovog Seminara su bili Nacionalni centar za životnu sredinu SAD, Nacionalna meteorološka služba SAD i grupa univerziteta iz SAD. Rezultati istraživanja izloženi na ovom Seminaru su predstavljani na Internetu „google, weather forecasting + analogs”.

Ovaj Seminar je održan posle jedne značajne promene u orijentaciji istraživanja u oblasti prognoze vremena. Naime, u drugoj polovini 20. veka, većina istraživača je bila upućena na rešavanje proble-

ma unapređenja kratkoročne prognoze vremena. Međutim, krajem 20. veka, Svetska meteorološka organizacija i veći meteorološki centri u svetu su došli do zaključka da se u kratkoročnim prognozama u sadašnje vreme dostigao vrh i da se u skoroj budućnosti ne mogu očekivati neka značajnija unapređenja. Stoga se stalo na stanovište da težište istraživanja treba usmeriti na unapređenje dugoročne prognoze vremena.

Prvi korak u toj novoj istraživačkoj orijentaciji bio je da se iz raspoloživih podataka na svetu formira jedna baza meteoroloških podataka globalnih razmera. Toga zadatka su se prihvatili Nacionalni centar za životnu sredinu SAD (NCEP) i Nacionalni centar za atmosferska istraživanja SAD (NCAR). Baza meteoroloških podataka NCEP/NCAR sadrži niz reanaliziranih podataka za period 1948-2002. godine u intervalima od 6 časova interpolisanih u tačke geografske



- 1) Održavanje anomalije; 2) Prosek prethodnih 10 godina; 3) 54-godišnji klimatološki prosek  
4) 54-godišnji klimatološki korigovani prosek 5) Analogija

Slika 1. Valjanost analognih prognoza u odnosu na različite klimatološke proseke

mreže u rezoluciji 2,5° geografske širine i 2,5° geografske dužine koja pokriva ceo globus. To je nesumnjivo zasad najpotpunija arhiva meteoroloških podataka na svetu. Tu bazu podataka je nabavio Institut za meteorologiju Fizičkog fakulteta u Beogradu.

Posle provere svih metoda dugoročne prognoze vremena koji su se zasnivali na principu analogije, a koji su ukazivali na mogući uspeh, utvrđeno je da metod zasnovan na RT 1 000-500 hPa, koji je razvijen u Srbiji, daje najbolje rezultate. Njihova istraživanja su se ograničila na dugoročnu prognozu jedne od najznačajnijih atmosferskih pojava, a to je El ninjo. El ninjo je pojava koja povremeno nastaje, jednom u 3-5 godina, u ekvatorijalnom pojasu između Čilea na istoku i Malezijskih ostrva na zapadu Tihog okeana. Ona nastaje u vreme kada oslabe pasati koji na površini okeana u to područje dovode hladniju vodu iz viših geografskih širina i mešanjem snižavaju temperaturu površinskog sloja vode.

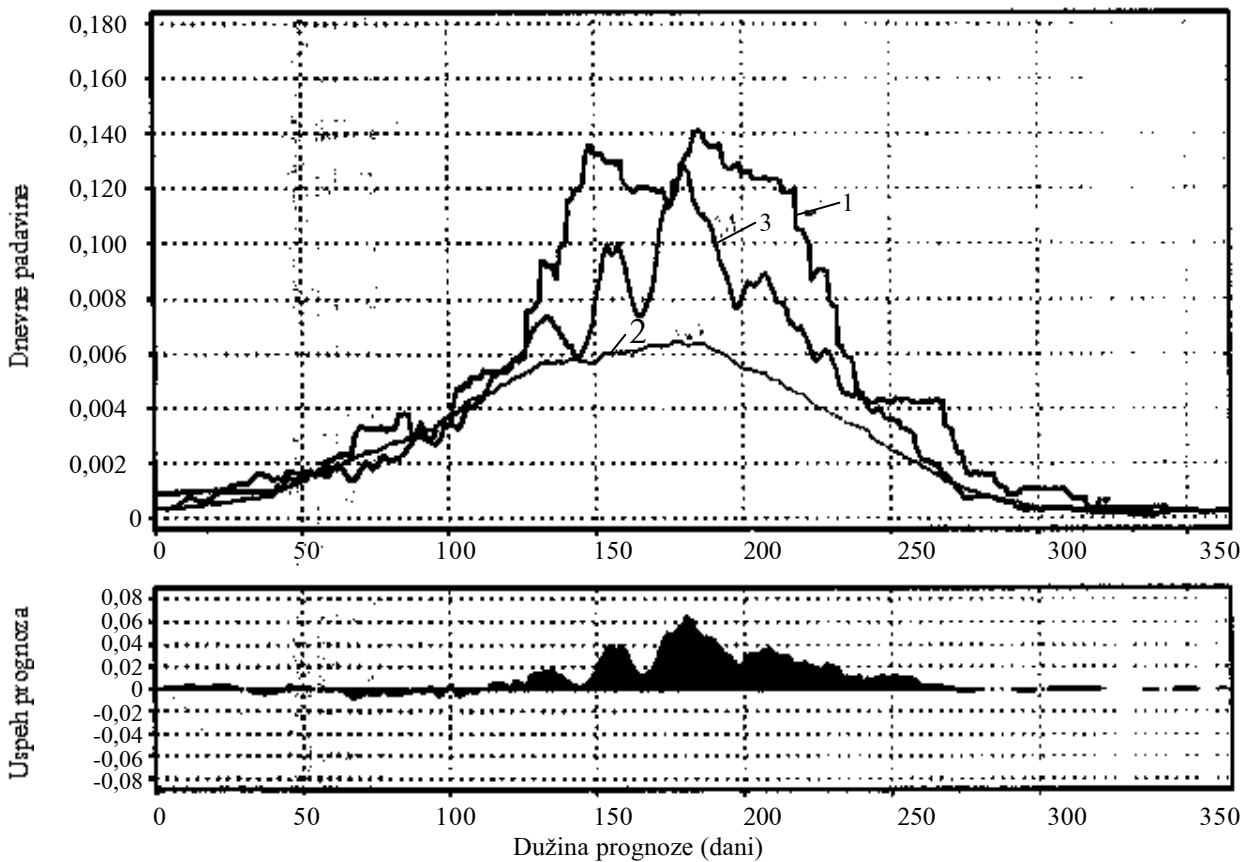
Kada pasati oslabe, površinska voda od silnog zagrevanja dostigne 27 °C stepeni, a jako isparavanje napuni atmosferu vodenom parom. Tada atmosfera postaje vrlo nestabilna i eksplozivna napunjena ogromnom količinom latentne toplote. Zato nastaju

vremenske nepogode, tropski cikloni i tornada, pomoću kojih se atmosfera oslobađa suvišne energije. El ninjo se održava nekoliko meseci do nekoliko sezona, sa promenljivim intenzitetom i utiče na vreme većeg dela tropskog pojasa i na pojedine vantropske oblasti. Nastup pojave El ninjo, dužina njenog trajanja i njen intenzitet su dosad bili nepredvidljivi.

Ekperimenti izvedeni metodom zasnovanom na analogiji RT 1 000-500 hPa i na bazi reanaliziranih meteoroloških podataka NCEP/NCAR, pokazali su da se mogu dobiti prognoze vremena koje su bolje od klimatoloških prognoza (verovatnoće) za više meseci unapred. To je ilustrovano na slici 1 [3].

Sa ove slike se vidi da dugoročna prognoza vremena po metodu analogije RT 1 000-500 hPa ima manju srednju apsolutnu grešku od 54-godišnjeg niza popravljene zbog zagrevanja atmosfere za period od 8,5 meseci, od 10-godišnjeg poslednjeg niza za 12 meseci i od 54-godišnjeg klimatološkog niza za 25 meseci unapred.

Pojava El ninja utiče na sve meteorološke elemente i pojave u oblastima do kojih dopire dejstvo te pojave. Taj uticaj se naročito odražava na režim padavina. Da bi se ispitala sposobnost analognog



1) Verifikacija; 2) Klimatološka verovatnoća; 3) Analogni prognoza

Slika 2. Prognoza količine padavina u San Diegu vezana za pojavu El ninja u 1997. godini data 6 meseci unapred

metoda prognoze da predvidi te promene, izrađena je prognoza količine padavina za San Diego, mesto koje se nalazi u Kaliforniji na zapadnoj obali SAD. Prognoza je izrađena za 1997. godinu, kada je bila jedna od najizrazitijih pojava El ninja u prošlom veku. Pojava El ninja je prognozirana godinu dana unapred, a sa njom i povećana količina padavina, koja prati tu pojavu. Ilustracije radi, na slici 2 [3] je pokazana prognoza padavina koja je data 6 meseci unapred sa ocenom njenog ostvarenja.

Sa slike 2 se vidi da je na osnovu srednje karte RT 1 000-500 hPa za leto 1997. godine pronađena analogna karta koja je ukazala na to da će naredne zime maksimum padavina u San Diegu biti znatno veći od prosečne klimatološke vrednosti. Taj maksimum je bio još izrazitiji nego što je prognoziran, jer je El ninjo bio ekstremno izrazit.

## 6. ZAKLJUČCI

*Na osnovu opsežnih eksperimenata sa metodom dugoročne prognoze vremena zasnovanog na analogiji RT 1 000-500 hPa, grupa istraživača je zaključila da ovaj metod daje velike mogućnosti za njegovo dalje unapređenje i dalje poboljšanje dugoročne prognoze vremena. Taj metod je u svojoj osnovnoj formi potekao iz Srbije i normalno je da imamo jasan koncept za njegovo dalje usavršavanje. Pored toga raspolaže se sa bazom meteoroloških podataka koja je za oko sto puta veća od one koju smo dosad koristili. Takođe, podrazumeva se da dovoljno dobro poznajemo karakteristike opšte cirkulacije atmosfere, koje odražavaju odlike vremena pojedinih sezona*

*u godini za naše područje i okolne oblasti. Stoga bi bilo veoma korisno da se pristupi takvim istraživanjima.*

*U tom cilju, već je izrađen odgovarajući istraživački Projekat i napisana Metodologija rada na Projektu „Dugoročna prognoza vremena”. Ostalo je još da se reši, po običaju kod nas najteži problem, a to je da se pronađe finansijer. Može se očekivati da će, za ovakvu vrstu istraživanja, faktori koji bi imali najviše koristi od tih istraživanja pokazati veće interesovanje, kao što su pokazali rukovodioci Direkcije za izgradnju HE „Đerdap I” pre više od tri decenije. Njihovo razumevanje za ovakva istraživanja je omogućilo da ideja o dugoročnoj prognozi vremena zasnovana na analogiji RT 1 000-500 hPa ugleda svet i dobije najviša svetska priznanja.*

## 7. LITERATURA

- [1] Bjerknes, V.: DAS PROBLEM DER WETTERVORHERSAGE, BETRACHTET VOM STANDPUNKTE DER MECHANIK UND DER PHYSIK. Meteorologische Zeitschrift, Band 212, 1904.
- [2] Radinović, Đ.: AN ANALOG METHOD FOR WEATHER FORECASTING USING THE 500/1000 MB RELATIVE TOPOGRAPHY. Monthly Weather Review, Vol. 103, 1975.
- [3] Hart, R., J. Ross, M. Fritsch, C. Hosler and R. Grumm, 2003: Breathing new life into an old friend: OBJECTIVE SEASONAL ANALOG FORECASTING USING NCEP REANALYSES. Seminar 4 February 2003, Wasington. Penn State University and National Weather Service State College, PA. Internet, google, weather forecasting + analogs, 72 pp.

Rad je primljen u uredništvo 20. 05. 2004. godine



**Đuro Radinović**, redovni profesor Fizičkog fakulteta u Beogradu (u penziji) rođen je 1929. godine u Golubiću kod Knina. Diplomirao je 1954. a doktorirao 1962. godine na Meteorološkom odseku Prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu. Bio je ekspert UN za meteorologiju u Sudanu i Alžiru. Zatim je bio direktor Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije, Saveznog hidrometeorološkog zavoda i Instituta za meteorologiju Fizičkog fakulteta. Autor je deset univerzitetskih udžbenika i skripti i preko 40 naučnih radova i monografija.

---

# Uputstvo autorima za saradnju u stručnom glasilu „Elektroprivreda”

**U stručnom glasilu se objavljuju kategorisani članci:  
originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi i stručni radovi  
iz oblasti elektroprivrede, odnosno energetike.**

---

*Pismo: ćirilica ili latinica. Na početku se navode imena autora sa zvanjima i akademskim titulama, naziv preduzeća, odnosno dela preduzeća ili ustanove sa adresom, kao i naslov rada (na srpskom i engleskom jeziku). Rezime rada (na srpskom i engleskom jeziku) sadrži kratko izloženu osnovnu strukturu i sadržaj rada, i ne treba da sadrži više od 200 reči. Ključne reči se takođe navode na srpskom i engleskom jeziku.*

*Treba izbegavati celovita matematička izvođenja vezana za relacije koje opterećuju proučavanje rada. Neophodna matematička izvođenja mogu se dati, po potrebi, kao celine u vidu jednog ili više priloga. Treba obavezno koristiti SI sistem jedinica i opšte prihvaćene pojmove.*

*Jednačine treba numerisati uz desnu marginu teksta, u malim (okruglim) zagradama. Pozivanje na jednačine u tekstu vrši se pomoću malih zagrada, a pozivanje na literaturu pomoću srednjih (uglastih) zagrada. Značenje skraćenice objasniti pri njenom prvom korišćenju u tekstu. Strane reči se prevode na srpski, a original se piše u zagradi iza prevoda. Napomena u tekstu treba da bude što manje, a ukoliko ih ima, treba da budu kratke. Napomene se označavaju rednim arapskim brojevima i navode se na dnu stranice, kao fusnote. Napomene u tabelama označavaju se malim slovima i navode se odmah ispod tabele. Na kraju rada prilaže se spisak korišćene literature. Za članke, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov ra-*

*da, pun naziv časopisa, broj i godina publikovanja i prvi i poslednji broj stranice. Za knjige, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov knjige, izdavač i godina izdanja. Za referate sa konferencija, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naziv referata, pun naziv konferencije, broj referata, mesto i vreme održavanja konferencije.*

*Rad ne treba da prelazi 15 kucanih strana formata A4 sa marginama od 3 cm. Tabele, slike i fotografije treba obeležiti po redosledu i uključiti u tekst.*

*Autor može dati predlog kategorizacije rada u skladu sa Uputstvom za uređivanje časopisa (originalni naučni rad, prethodno saopštenje, pregledni članak i stručni članak). Autor ne može istu ili sličnu verziju rada istovremeno ponuditi drugim časopisima radi objavljivanja.*

*Autor dostavlja rad u elektronskom obliku na disketi i na papiru, u tri primerka. Za elektronski oblik rada, preporučuje se autoru da koristi program za pisanje teksta Word i tip slova Times New Roman (font 12, a razmak 1,5).*

*Rad se šalje na adresu:*

**ZAJEDNICA  
JUGOSLOVENSKE  
ELEKTROPRIVREDE**  
Balkanska 13/II, 11000 Beograd

---

# Kriterijumi za kategorizaciju radova u stručnom časopisu „Elektroprivreda”

---

## **ORIGINALNI NAUČNI RAD**

*U ovu kategoriju svrstavaju se radovi, koji sadrže originalne rezultate istraživanja, interesantne za širi krug stručnjaka u području koje je predmet rada. Primena dobijenih rezultata treba da bude prikazana na realnim primerima iz inženjerske prakse. Ovi radovi treba da su napisani tako, da je na osnovu izloženih sadržaja i informacija, moguće praktično primeniti saopštene rezultate i proveriti urađene primere.*

## **PRETHODNO SAOPŠTENJE**

*Kao prethodno saopštenje svrstava se rad koji sadrži elemente originalnosti, ali koji nisu dovoljni da bi se rad mogao smatrati u potpunosti originalnim naučnim radom iz jednog ili više navedenih razloga:*

- doprinosi su manjeg značaja*
- nisu obuhvaćeni neki od značajnih činilaca*
- nema primene na realnom primeru*
- rešenje nije realizovano (kada je reč o novom uređaju, mernoj metodi ili objektu)*

## **PREGLEDNI RAD**

*Ovi radovi sadrže celoviti prikaz stanja i tendencija razvoja pojedinih oblasti nauke i tehnologije. Radovi ove kategorije obavezno sadrže kritički osvrt i ocenu onoga što je razmatrano. Citirana literatura u radu treba da bude dovoljno obuhvatna, kako bi se na osnovu nje omogućio što širi i bolji uvid u predmetne sadržaja. Obavezno je citiranje relevantnih referenci autora, koje se odnose na razmatranu problematiku, čime se potvrđuje kompetentnost sa pisanje radova iz ove kategorije. Ukupan broj razmatranih citata ne bi trebalo da bude manji od 15 i trebalo bi pretežno da bude iz vodećih svetskih publikacija.*

## **STRUČNI RAD**

*Ovi radovi mogu da sadrže prikaz rešenja nekog uređaja, sklopa ili instrumenta koje je originalno u domaćim uslovima, kao i prikaz značajnih praktičnih realizacija, projekata, studijskih analiza i sl. Radovi ove kategorije mogu da sadrže doprinose primeni poznatih metoda i naučnih rezultata i njihovom prilagođenju potrebama aktuelne prakse.*

REDAKCIJA  
časopisa „Elektroprivreda”



Виле хотела ПАРК



## СТАРА ПЛАНИНА ХОТЕЛ НА БАБИНОМ ЗУБУ



## Хотел ПАРК Б У Д В А

„ЕПСТУРС“ д.о.о.-Београд, Војводе Степе 412/а, Тел: 011/3973-035, 3973-169, 2491-195 Факс: 011/3973-640

Комерцијални сектор: 011/3231-690, 3234-496

АГЕНЦИЈЕ: Београд, Тел: 011/646-971, 646-797, 686-125, 2686-069, Факс: 011/687-025;

Ниш, Тел: 018/547-615, 522-675; Нови Сад, Тел: 021/4821-222 лок: 2598

ПОСЛОВНИЦЕ: Пожаревац, Тел/Факс: 012/531-156; Сурдулица, Тел/Факс: 017/813-088

ТУРИСТИЧКИ ЦЕНТРИ: „Будва“: Тел: 086/451-882, 452-866 Факс: 086/451-971; „Стара планина“ Тел: 019/731-780, Факс: 019/731-781