



# Elektroprivreda

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

Godina  
Year

LVIV

Jul-Septembar  
July-September

Broj 3  
No.

Sadržaj

Strana  
Page

Content

<i>Dragan P. Popović i Miloš Lj. Stojković</i>		
DINAMIČKI ASPEKTI UPRAVLJANJA NAPONIMA GENERATORA I NAPONSKO-REAKTIVNA STANJA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA	3	DYNAMICAL ASPECTS OF GENERATOR VOLTAGES CONTROL AND VOLTAGE-REACTIVE STATES OF ELECTRIC POWER INTERCONNECTION
<i>Saša Minić,</i>		
<i>Tijana Janjić, Miloje M. Kostić, Milan Ivanović,</i>		
<i>Branislav Čupić i Maja Marković</i>		
NAPONSKO-REAKTIVNE PRILIKE U PRENOSNOJ MREŽI SRBIJE I EFEKTI MERA ZA NJIHOVO POBOLJŠANJE	14	REACTIVE POWER/VOLTAGE CONDITIONS IN SERBIAN TRANSMISSION NETWORK AND IMPROVEMENT MEASURES EFFECTS
<i>Branko D. Stojanović</i>		
REKONFIGURACIJA SIMETRIČNIH RADIJALNIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA U SVRHU SMANJENJA GUBITAKA AKTIVNE SNAGE	25	NETWORK RECONFIGURATION IN BALANCED DISTRIBUTION SYSTEMS FOR ACTIVE POWER LOSS REDUCTION
<i>Vladimir I. Balkovoj</i>		
PROCENA ZAŠTITE OPGW NA DALEKOVODIMA 110 kV SA ELEKTRIČNO POJAČANOM IZOLACIJOM	40	EVALUATION OF OPGW PROTECTION ON 110 kV TRANSMISSION LINES WITH ELECTRICALLY REINFORCED INSULATION
<i>Miloje M. Kostić</i>		
POBOLJŠANI POSTUPAK INVERZNOG OBRATANJA ZA DIREKTNO MERENJE VISOKOFREKVENTNIH GUBITAKA OPTEREĆENJA U ASINHRONIM MOTORIMA	55	REVERSE ROTATION TEST IMPROVEMENT PROCEDURE FOR DIRECT MEASUREMENT OF HIGHER FREQUENCIES STRAY-LOAD LOSS IN INDUCTION MOTORS
<i>Miloš Lj. Tanasijević i Dejan D. Ivezić</i>		
MODEL EVALUACIJE UPOTREBNOG KVALITETA ROTORNIH BAGERA NA BAZI EKSPERTSKIH PROCENA	65	EVALUATION MODEL FOR BUCKET WHEEL EXAVATORS QUALITY OF SERVICE BASED ON EXPERTISE JUDGMENT
<i>Žarko Markov i Goran Nedić</i>		
ODREĐIVANJE DOZVOLJENIH GUBITAKA PAKETA U IP TELEFONSKOJ MREŽI EPS-a	75	DETERMINATION OF PERMITTED PACKET LOSS IN THE IP TELEPHONE NETWORK OF SERBIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY
<i>Dušan Nešić</i>		
PRVA ISKUSTVA SA ADSS OPTIČKIM KABLOVIMA	81	FIRST EXPERIENCES WITH ADSS (ALL DIELECTRIC SELF-SUPPORTING) CABLES
<i>Ljiljana Rašković i Časlav Lačnjevac</i>		
ANTI-KOROZIJA ZAŠTITA ENERGETSKIH POSTROJENJA PREMAZNIM SREDSTVIMA	89	ANTI-CORROSION PROTECTION OF ENERGETIC PLANTS BY COATING SUBSTANCES
<i>Tina Dašić</i>		
Prikaz knjige HIDROENERGETSKI POTENCIJALI CRNE GORE – MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA ZA RAZVOJ I UNAPREĐENJE ŽIVOTNE SREDINE	96	Review of book HYDRO-ENERGETIC RESOURCES OF MONTENEGRO – POSSIBILITIES OF UTILIZATION FOR DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENT
<i>Radmilo Ivanković</i>		
Prikaz knjige RUDARSTVO NA TLU SRBIJE	98	Review of book MINING IN SERBIA

**IZDAVAČ:**  
**PUBLISHER:**

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

11 000 Beograd, Balkanska 13

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

Telefaks: 686-398

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

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

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

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.

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

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

Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, predsednik;

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

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

Dr Slobodan Ružić, dipl. ing. el., Agencija za energetske efikasnost, inženjering i konsalting

„Energy Saving Group”, Beograd, član;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Lela Lončar, dipl. filolog, Beograd, član.

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

Jovo Todorović dipl. teh.

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

Zlata Milinović,

dipl. filolog

CIP – Katalogizacija u publikaciji  
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.9

621.31

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

Tromesečno

ISSN 0013-5755 = Elektroprivreda

COBISS.SR-ID 32023

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

# Dinamički aspekti upravljanja naponima generatora i naponsko-reaktivna stanja elektroenergetskih interkonekcija

Originalni naučni rad  
UDK: 621.31; 62-523; 621.313.312

---

*Rezime:*

U radu se izlažu dinamički aspekti verifikacije jedne metode za brzo i dovoljno tačno definisanje naponskih referenci generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja elektroenergetskih interkonekcija. Razvoj ove metode bio je podstaknut poznatim saznanjem o veoma značajnom uticaju adekvatnog izbora vrednosti naponskih referenci angažovanih generatora na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike. Njena verifikacija već je bila obavljena u okviru statičkog simulacionog modela, na primerima ostvarenog i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju. U ovom radu, verifikacija razvijene metode biće izvršena u okviru dinamičkog simulacionog modela, za identična ostvarena i perspektivna stanja prenosne mreže Srbije.

**Ključne reči:** upravljanje, naponi generatora, dinamički aspekti, naponsko-reaktivna stanja, prenosna mreža, Srbija

---

*Abstract:*

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

This paper presents dynamical aspects of verification of a method for fast and sufficiently accurate definition of generator voltages to realize the favourable voltage-reactive states of electric power interconnection. The development of this method is inspired by known fact of great influence of adequate choice of generators voltage on established voltage-reactive states. The verification of method proposed is already made in context of steady-state simulation model, on the example of realized and perspective states of Serbian transmission network, in its wide environment. In this paper, the verification of method, in context of dynamic simulation model, will be made for identical realized and perspective states of Serbian transmission network.

**Key words:** control, generator voltages, dynamical aspects, voltage-reactive states, Serbian transmission network

---

## 1. UVOD

Imajući u vidu već više puta isticanu veliku aktuelnost i izuzetan praktičan značaj problematike na-

ponsko-reaktivnih prilika EES-a Srbije, u Elektroprivredi Srbije je, sredinom 2004. godine, formiran Stručni tim za reaktivnu energiju, koji je sačinio plan kratkoročnih i srednjeročnih mera za rešavanje na-

*Prof. dr Dragan P. Popović, naučni savetnik Instituta „Nikola Tesla”, Miloš Lj. Stojković, dipl. ing. el.  
– Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a*

ponsko-reaktivne problematike [1], a sve u cilju iznalaženja najpovoljnijih tehnno-ekonomskih rešenja.

Do sada rezultati sprovedenih istraživačkih aktivnosti na planu naponsko-reaktivnih stanja prenosne mreže Srbije (ugradnja prvih 200 Mvar na niskom naponu [2], sagledanih novih 200 Mvar (170 Mvar na niskom naponu i 30 Mvar na srednjem naponu) [3], reaktiviranje oko 80 Mvar kod industrijskih potrošača, kao i rezultati Studije [4], koja se bavila naponsko-reaktivnom problematikom prenosne mreže Srbije, za vrememenski period do 2015. godine), ukazuju na realne mogućnosti uspešnog rešavanja ove problematike u nas. Uz prethodno navedeno, tim konstatacijama u značajnoj meri je doprinela rekonekcija sa interkonekcijom UCTE [5, 6, 7], kao i sagledani dalji razvoj prenosne mreže Srbije [8].

U pomenutoj Studiji [4], između ostalog, dobiten je niz korisnih rezultata i pokazatelja, odnosno na jedan indikativan način istaknut je veliki praktičan značaj adekvatnog izbora napona generatora, na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike u prenosnoj mreži Srbije. Tu se prvenstveno misli na mogućnost smanjivanja gubitaka aktivne i reaktivne snage u maksimalnim stanjima, a u minimalnim stanjima, na minimizaciju potreba za potpobuđenim režimima generatora ili pak za njihovu harmonizaciju, odnosno raspodelu tih režima na generatore koji su najpogodniji za to.

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

Prethodno rečeno otvara pitanje opravdanosti uvođenja automatske sekundarne i tercijarne regulacije napona [9] u EES Srbije. U tome, kao uzor mogu da posluže dosadašnja iskustva Francuske i Italije, gde se te regulacije obavljaju automatski. Sekundarna regulacija napona imala bi regionalni karakter (pored poboljšanja ekonomije pogona, imala bi za cilj i povećanje rezervi sigurnosti). Stoga bi bila neophodna koordinacija delovanja sekundarnih regulatora na nivou celog EES, što bi se postiglo uvođenjem tercijarne regulacije napona (globalna ekonomija i upravljanje reaktivnim snagama na nivou celog EES).

Pre sprovedenja samih analiza opravdanosti uvođenja ovih regulacija na automatizovani način, bilo bi potrebno da se posveti posebna pažnja adekvatnim njenim metodološkim i praktičnim aspektima. U ovom, veoma širokom i kompleksnom kon-

tekstu, posebno mesto imaju odgovarajuće metode, koje bi bile u stanju da dovoljno tačno vrše evaluaciju relevantnih tehničkih efekata, koji mogu da nastanu uvođenjem ovih regulacija.

Rad [10] bavio se jednom od takvih metoda, od niza mogućih, u pomenutom cilju evaluacije relevantnih tehničkih efekata. U njemu je bio izložen razvoj i praktična primena jedne metode (i odgovarajućeg računarskog programa) za brzo i dovoljno tačno definisanje napona angažovanih generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja. Verifikacija predložene metode obavljena je u okviru statičkog simulacionog modela, na primerima ostvarenog i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju, što je bio predmet pomenutog rada [10]. U njemu je istaknuto, citiramo – „*da bi se dobila potrebna sigurnost i pouzdanost dobijenih rezultata, verifikacija predložene metode će se obaviti u okviru dinamičkog prilaza, što će biti predmet posebnog rada, koji se nalazi u pripremi*”. Stoga, u ovom radu, njena verifikacija biće izvršena u okviru dinamičkog simulacionog modela, za identična ostvarena i perspektivna stanja prenosne mreže Srbije, koja su razmatrana u [10]. To je prvenstveno urađeno, dakle, ne samo da bi se detaljnije sagledala sama „fizika” razmatranog problema upravljanja naponima generatora, već u cilju da bi se pomenuta metoda, odnosno njena primena, što bliže približila realnoj pogonskoj praksi.

## 2. KRAĆI PRIKAZ METODE UPRAVLJANJA NAPONIMA GENERATORA

U radu [10] detaljno je bio izložen razvoj i praktična primena jedne metode (i odgovarajućeg računarskog programa – **DEFNAPON**) za brzo i dovoljno tačno definisanje napona angažovanih generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja. S obzirom na prirodu tretiranog problema, bilo je potrebno da se, za razmatrano ustaljeno stanje, nađe neka praktična mera osetljivosti promena aktivnih i reaktivnih snaga angažovanih generatora pri promeni napona na krajevima pojedinih odabranih generatora. Za taj cilj, dobru indicaciju daju sledeće linearizovane matrične jednačine [10]:

$$\Delta P_G = \frac{\partial P_G}{\partial V_G} \Delta V_G \quad (1)$$

$$\Delta Q_G = \frac{\partial Q_G}{\partial V_G} \Delta V_G \quad (2)$$

gde je:

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

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

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

$\frac{\partial P_G}{\partial V_G}$  – matrica osetljivosti promene angažovanih aktivnih snaga izvora, pri promeni napona na njihovim krajevima, kvadratna matrica reda  $N_{GI}$ ;

$\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  – matrica osetljivosti promene angažovanih reaktivnih snaga izvora, pri promeni napona na njihovim krajevima, kvadratna matrica, takođe reda  $N_{GI}$ .

Oznaka  $N_{GI}$  je broj generatorskih čvorova u EES od interesa (u našem slučaju to je EES Srbije), dobijen eliminacijom svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji i svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa.

Posredstvom matrice jednačina (1) i (2), specificirajući korekcije napona odabranih generatora (definisane odgovarajućih elemenata vektora  $\Delta V_G$ ) u odnosu na posmatrano stanje, dobijaju se i odgovarajuće korekcije njihovih aktivnih  $\Delta P_G$  i reaktivnih  $\Delta Q_G$  snaga. Evidentno je, imajući u vidu da su

matrice osetljivosti  $\frac{\partial P_G}{\partial V_G}$  i  $\frac{\partial Q_G}{\partial V_G}$  „pune” matrice,

da će, generalno gledano, u teoretskom smislu, promena naponske reference samo na jednom generatoru, dovesti do promena aktivnih i reaktivnih snaga kod svih generatora. Naravno, u praktičnom smislu, te promene će biti značajnije, ako se vrši korekcija naponskih referenci na relevantnim generatorima.

Rešavanje inverznog problema od prethodno formulisanog, postiže se posredstvom sledećih matrice jednačina [10]:

$$\Delta V_G = \left( \frac{\partial P_G}{\partial V_G} \right)^{-1} \Delta P_G \quad (3)$$

$$\Delta V_G = \left( \frac{\partial Q_G}{\partial V_G} \right)^{-1} \Delta Q_G \quad (4)$$

Dakle, posredstvom matrice jednačina (3) i (4), specificirajući željene korekcije aktivnih (definisane odgovarajućih elemenata vektora  $\Delta P_G$ ), odnosno reaktivnih (definisane odgovarajućih elemenata vektora  $\Delta Q_G$ ) snaga odabranih generatora u odnosu na posmatrano stanje, dobijaju se potrebne korekcije naponskih referenci generatora  $\Delta V_G$ .

S obzirom da se i ovaj rad bavi naponsko-reaktivnom problematikom, predmet primarne pažnje su procesi u tzv.  $Q-V$  konturi, odnosno primena matrič-

nih jednačina (2) i (4). Međutim, pri tome se ne zanemaruju procesi u tzv.  $P-\delta$  konturi, koji nisu dominantni, ali se i oni, kako će se to videti u narednom izlaganju, javljaju, ali u znatno manjem intezitetu, pri promeni naponskih referenci generatora, saglasno matričnim jednačinama (1) i (3).

Naravno, javlja se neizbežno pitanje kod promocije novih metoda, pogotovo ako su one jednostavne po formi kao što je ova, kako izvršiti njihovu valjanu verifikaciju? U radu [10], kako je to već bilo rečeno, ta verifikacija je obavljena u okviru tzv. statičkog prilaza, a da bi se dobila potrebna sigurnost i pouzdanost dobijenih rezultata, ona će biti obavljena i u okviru tzv. dinamičkog prilaza, što je glavni cilj ovoga rada.

### 3. NAČINI VERIFIKACIJE PREDLOŽENE METODE

#### 3.1. Statički prilaz verifikaciji

U predloženoj metodi, kako je to pokazano u [10], vrši se upravljanje naponima generatora, promenom njihovih naponskih referenci. Posredstvom matrice jednačine (2), specificirajući korekcije napona odabranih generatora u odnosu na polazno stanje, dobijaju se i odgovarajuće korekcije njihovih reaktivnih snaga. Posredstvom matrice jednačine (4), rešava se inverzni problem, odnosno specificirajući željene korekcije reaktivnih snaga odabranih generatora u odnosu na posmatrano stanje, dobijaju se potrebne korekcije napona generatora. Dakle u oba slučaja operiše se sa *novim vrednostima napona angažovanih generatora*.

Na taj način, verifikacija u okviru tzv. statičkog prilaza obavljena je određivanjem novih tokova snaga za nove vrednosti napona generatora, i utvrđivanjem razlika u dobijenim rezultatima [10]. Taj proračun novih tokova snaga i naponskih prilika za nove vrednosti napona generatora obavljen je primenom procedure, koja je detaljno opisana u [11, 12]. Ova vrsta verifikacije, kako je to pokazano u radu [10], je integralni deo računarskog programa *UCOSFI*. Takođe, kako je to pokazano u [10], u razmatranim primerima EES-a Srbije u svom širokom okruženju, u okviru statičke verifikacije predložene metode, najveća vrednost greške se kretala oko 4 procenta.

#### 3.2. Dinamički prilaz verifikaciji

##### 3.2.1. Uvodne napomene

U cilju sagledavanja proučavanog fenomena upravljanja naponima generatora, odnosno objašnjenje

nja same njegove „fizike”, bilo je neophodno da se raspolaze sa odgovarajućom metodologijom (i odgovarajućim računarskim programom). Ta metodologija bi trebalo da na adekvatan način simulira dinamičko ponašanje EES-a, nakon izvršenih korekcija napona izabranih generatora. Dakle, bilo je neophodno modelovanje kompletne električne mreže razmatrane interkonekcije i svih njenih relevantnih komponenti, uključujući odgovarajuće regulacione i zaštitne uređaje (u prvom redu to se odnosi na detaljnije modelovanje sinhronih mašina i njihovih regulacionih sistema). Takođe, takav prilaz je zahtevao razvoj efikasne metode numeričke integracije aktuelnih sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina.

U Institutu „Nikola Tesla” razvijena je jedna takva metodologija i odgovarajući računarski program (*DINST*). Ova metodologija je bazirana na tzv. standardnim modelima relevantnih komponenti EES-a, koji se uobičajeno koriste u tzv. sistemskim analizama [13, 14, 15, 16]. U narednom izlaganju, s obzirom na ograničeni prostor za ovaj rad, u okviru modelskih aspekata, biće izložen model sinhrono mašine i modeli pobudnog sistema i sistema regulacije pobude, jer su prelazni procesi u njima relevantni za pručavani fenomen upravljanja naponima generatora. Takođe, biće kratko izložene osnovne karakteristike računarskog programa *DINST*.

### 3.2.2. Modelski aspekti

Za praćenje prelaznih stanja sinhronih mašina, poslužiće sledeće diferencijalne jednačine:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{\omega M} (P_m - P_G) \quad (6)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fq} - E_q) \quad (7)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_{q0}} E_d \quad (8)$$

gde je:

$\delta$  – električni ugao  $q$  ose rotora sinhrono mašine u odnosu na proizvoljno izabranu osu sa sinhronom brzinom obrtanja;

$\omega$  – električna ugaona brzina sinhrono mašine (sopstvena kružna učestanost);

$\omega_s$  – sinhrona kružna učestanost sinhrono mašine;

$P_G$  – električna snaga sinhrono mašine;

$P_m$  – mehanička snaga sinhrono mašine;

$M = T_J S_n$  – konstanta sinhrono mašine;  $T_J$  – vremenska konstanta inercije agregata;  $S_n$  – nominalna prividna snaga;

$E'_q$  – elektromotorna sila (ems), uslovljena fluksnim obuhvatom u uzdužnoj osi sinhrono mašine, koji odgovara tranzijentnom periodu;

$E'_d$  – ems, uslovljena fluksnim obuhvatom u poprečnoj osi;

$E'_{fq}$  – ems, srazmerna naponu na krajevima pobudnog kola;

$E_q$  – ems, uslovljena strujom pobudnog kola;

$E_d$  – ems, uslovljena strujom u poprečnoj prigušnoj konturi;

$T_{d0}$  – vremenska konstanta elektromagnetne inercije pobudnog namotaja pri otvorenim statorskim i ostalim rotorskim konturama i

$T_{q0}$  – vremenska konstanta poprečne prigušne konture.

Jednačine (5) i (6) su posledica elektromehaničke jednačine kretanja rotora sinhrono mašine, odnosno izvršeno je njeno prevođenje na tzv. normalni oblik. Jednačina (7) opisuje prelazni proces u pobudnom kolu sinhrono mašine, a jednačina (8), prelazni proces u poprečnim prigušnim konturama rotora.

Električna aktivna i reaktivna snaga na krajevima sinhrono mašine izražavaju se na sledeći, poznati način:

$$P_G = \frac{E'_q V_d}{x'_d} - \frac{E'_d V_q}{x'_q} - \frac{x'_q - x'_d}{x'_d x'_q} V_d V_q \quad (9)$$

$$Q_G = \frac{E'_q V_q}{x'_d} + \frac{E'_d V_d}{x'_q} - \frac{V_q^2}{x'_d} - \frac{V_d^2}{x'_q} \quad (10)$$

gde je:

$$V_d = V \sin(\delta - \theta) \quad (11)$$

$$V_q = V \cos(\delta - \theta) \quad (12)$$

$V, \theta$  – moduo i ugao fazora napona na krajevima sinhrono mašine;

$x'_d, x'_q$  – sinhrona i tranzijentna reaktansa sinhrono mašine u podužnoj i poprečnoj osi.

U okviru dinamičkog prilaza verifikacije predložene metode, nezaobilazno je obuhvatanje prelaznih stanja u pobudnom sistemu i sistemu regulacije pobude sinhrono mašine. Za to mogu da posluže standardizovani, tzv. „IEEE modeli” [13], kao i sledeći sistem simultanih jednačina [17]:

$$\frac{du_0}{dt} = -\frac{u_0}{T_{u_0}} + \frac{\Delta V}{T_{u_0}} \quad (13)$$

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{k_{u_1}}{T_{u_0} T_{u_1}} u_0 - \frac{u_1}{T_{u_1}} + \frac{k_{u_1}}{T_{u_0} T_{u_1}} \Delta V \quad (14)$$

$$\frac{d\omega_0}{dt} = -\frac{\omega_0}{T_{\omega_0}} + \frac{\Delta\omega}{T_{\omega_0}} \quad (15)$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -\frac{k_{\omega_1}}{T_{\omega_0}} \omega_0 - \frac{\omega_1}{T_{\omega_1}} + \frac{k_{\omega_1}}{T_{\omega_0} T_{\omega_1}} \Delta\omega \quad (16)$$

$$\frac{dE_{fq}}{dt} = \frac{1}{T_E} (k_{u_0} u_0 + u_1 + k_{\omega_0} \omega_0 + \omega_1 - E_{fq}) + \frac{E_{fq0} - f_{SAT}(E_{fq})}{T_E} \quad (17)$$

gde je:

$\Delta V = V_r - V$  – ulazna veličina naponskog kanala regulatora pobude (odstupanje tekuće vrednosti napona na krajevima  $V$  od podešene, referentne vrednosti  $V_r$ );

$\Delta\omega = \omega - \omega_s$  – ulazna veličina kanala učestanosti (odstupanje tekuće vrednosti sopstvene učestanosti  $\omega$  od referentne  $\omega_s$ );

$k_{u_0}, k_{\omega_0}$  – pojačanja po nultom i prvom izvodu naponskog kanala sistema regulacije pobude;

$T_{u_0}, T_{u_1}$  – vremenske konstante elektromagnetne inercije kanala napona;

$k_{\omega_0}, k_{\omega_1}$  – pojačanja po nultom i prvom izvodu kanala učestanosti sistema regulacije pobude;

$T_{\omega_0}, T_{\omega_1}$  – vremenske konstante elektromagnetne inercije kanala učestanosti;

$u_0, \omega_0$  – izlazne veličine mernog organa regulatora pobude po kanalu napona, odnosno učestanosti;

$u_1, \omega_1$  – izlazne veličine derivacionog organa regulatora pobude po kanalu napona, odnosno učestanosti;

$T_E$  – vremenska konstanta pobudnog sistema;

$E_{fq0}$  – ems, srazmerna naponu pobudnog kola u polaznom, stacionarnom stanju;

$f_{SAT}(E_{fq})$  – uticaj zasićenja magnetnog kola.

Prethodno dati sistem jednačina (13)-(17), odnosi se na model tzv. multivarjabilnog, odnosno višezlaznog sistema regulacije pobude, koji je, zbog nepostojanja takvih modela u okviru standardnih „IEEE modela”, posebno razvijen za potrebe analiza dinamičkih stanja EES-a Srbije i njegovog okruženja. Njegova generalna forma omogućuje da se odgovarajućim izborom parametara izvrši njegovo svodenje (redukovanje) na postojeće, poznate modele, prisutne u praksi.

Dakle, u okviru dinamičkog prilaza verifikaciji predložene metode upravljanja, „inicijalni poreme-

ćaj” je promena vrednosti naponskih referenci  $V_r$  izabranih generatora. Ta operacija, inače, se praktično veoma jednostavno obavlja od strane rukovoca u elektranama („podizanje”, odnosno „spuštanje” napona generatora). Ta operacija dovodi do pojave regulacionih grešaka  $\Delta V = V_r - V$ , koje aktiviraju rad sistema za regulaciju pobude, koji (rad) dovodi do novih vrednosti ems  $E_{fq}$  (ems, srazmerna naponu pobudnog kola).

Time se „provocira” prelazni proces, u kome dolazi do promena ostalih ems, a time i do promena vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga na krajevima generatora. Sa promenom aktivnih snaga, „aktiviraju” se i elektromehaničke jednačine kretanja sinhronne mašine, odnosno dolazi do promena njihovih električnih ugaonih brzina, koje dalje aktiviraju sisteme regulacija turbine, koji na svom izlazu daju nove vrednosti mehaničkih snaga. Međutim, kako je to utvrđeno na praktičnim primerima, za razmatrane „poremećaje”, te promene mehaničke snage su, iako postoje, simbolične.

Prelazni proces, izazvan promenama naponskih referenci izabranih generatora, praktično se završava kada se regulacione greške anuliraju, i kada se dobija novo kvazistacionarno stanje, sa novim vrednostima napona, aktivnih i reaktivnih snaga na krajevima generatora.

#### 4. UNAPREĐENA VERZIJA RAČUNARSKOG PROGRAMA *DINST*

Računarski program *DINST* za analize tranzijentne stabilnosti, razvijen u Institutu „Nikola Tesla”, baziran je na prethodno izloženom strožem modelovanju sinhronih mašina i njihovih regulacionih sistema, uključujući i pomenute standardizovane modele hidropostrojenja i termopostrojenja.

U metodologiji, u kojoj je baziran ovaj računarski program, matematički model tokova snaga, odnosno jednačine balansa formirane su preko strujnih injeckiranja u svim čvorovima EES-a, predstavljenog matricom admitansi čvorova, u kojoj su uključene i grane sinhronih mašina [18]. Pri tome, izvršena je dekompozicija problema, odnosno, određivanje stanja svodi se na iterativno rešavanje sistema linearizovanih algebarskih jednačina srazmerno niskog reda (red jednak dvostrukom broju sinhronih mašina) i sistema fazorskih jednačina, čiji je red jednak broju nepoznatih fazora napona „neproizvodnih” čvorova. Sistem algebarskih jednačina je rezultat primene poznatog postupka Gaussove eliminacije, koji EES svodi samo na svoj „proizvodni” deo i pogodnog korišćenja veze kompleksnih, fazorskih veličina i njihovih komponenti u sopstvenim „ $q-d$ ” koordinatnim sistemima sinhronih mašina. Do reše-

Tabela 1.

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

Redni broj	Naziv elektrane	$Q_{GO}$ (Mvar)	$Q_{GU}$ (Mvar)	$Q_G$ (Mvar)	$Q_{GD}$ (Mvar)	$\Delta Q_G$ (%)	$\Delta Q_{GD}$ (%)
1.	TE Nikola Tesla B 1, 2	280,0	473,1	475,8	472,4	-0,570	0,148
2.	TE Nikola Tesla A 1, 2	163,9	244,8	239,3	238,8	2,287	2,513
3.	TE Nikola Tesla A 3, 4	210,6	312,1	304,2	311,2	2,589	0,289
4.	TE Nikola Tesla A 5, 6	162,6	277,0	278,6	275,0	-0,592	0,727

nja za ostali „neproizvodni” deo EES dolazi se preko sistema fazorskih jednačina, kod kojih je matrica koeficijenata donja trouglasta, formirana tokom pomenutog postupka Gaussove eliminacije.

U okviru ovoga prilaza, uz određivanje električnih uglova individualnih mašina i njihovih relevantnih veličina (aktivne i reaktivne snage, naponi, struje i odgovarajuće elektromotorne sile) prate se i stanja na svim relevantnim elementima EES-a tokom odvijanja prelaznog elektromehaničkog procesa (određivanje aktivnih i reaktivnih snaga, struja i fazora napona), čime se dobija detaljni uvid u sam tok odvijanja „odziva” EES-a na pojavu različitih vrsta kvarova, odnosno kratkih spojeva. Na kraju, u okviru metodologije, na kojoj je baziran ovaj računarski program, inkorporiran je jedan efikasan način numeričke integracije aktuelnih diferencijalnih jednačina [17, 19].

Za razvoj ovog računarskog programa korišćen je *Visual Fortran Professional Edition 6.0.0*, a omogućeno je tretiranje elektroenergetskih interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora i 200 regulacionih basena. Unošenje ulaznih podataka i prikazivanje niza relevantnih rezultata je omogućeno posebnim editorima za čiji je razvoj korišćen *Microsoft Visual Basic 5.0*.

## 5. VERIFIKACIJA METODE U OKVIRU DINAMIČKOG PRILAZA

Prva praktična iskustva u primeni predložene metode, odnosno računarskog programa *DEFNAPON*, stečena su tokom rada na Studiji [4], u kojoj su sve analize naponsko-reaktivnih prilika urađene na modelu realne elektroenergetske interkonekcije koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i relevantni delovi mreže 150 kV), uz napomenu da je kompletno modelovana mreža 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/X kV/kV. Kako je to već rečeno, rezultati

verifikacije (uspešne) predložene metode u okviru statičkog prilaza, izloženi su u [10].

Naredni primer bavi se verifikacijom predložene metode, u okviru dinamičkog prilaza, a odnosi se na ostvareno stanje EES-a Srbije 26. januara 2006. godine, u okviru koga su inkorporirani tranziti, vezani za tada aktuelne programe razmene između EES-a u razmatranoj interkonekciji. Ukupna potrošnja EES-a Srbije, na krajevima TS 110/x kV/kV, je iznosila 6 746,6 MW i 1 940,1 Mvar. Ukupan broj modelovanih čvorova je iznosio 1 100 (od toga 100 njih su bili generatorski čvorovi), a red sistema diferencijalnih jednačina, merodavnih za praćenje „dinamike” (sa kojim je operisao računarski program *DINST*), iznosio je 1 326. U pripremi podataka za ove analize, korišćeni su i podaci iz Studije [20].

U ovom primeru, izvršena je simultana promena napona na krajevima generatora u TE Nikola Tesla A 1, 2, 3, 4, 5 i 6 i TE Nikola Tesla B 1 i 2, od početnih 1,00  $U_n$  do 1,05  $U_n$ . Efekti toga upravljanja naponima su interpretirani preko pokazatelja datim u tabeli 1.

U njoj se najpre daju vrednosti reaktivne snage pomenutih generatora u polaznom stanju  $Q_{GO}$  (Mvar), zatim daju se nove vrednosti reaktivnih snaga generatora  $Q_{GU}$  (Mvar), dobijene uprošćenim prilazom (rešavanjem matrične jednačine (2), reda 32, za zadate korekcije napona izabranih generatora) i vrednosti reaktivne snage  $Q_G$  (Mvar), dobijene proračunom tokova snaga i naponskih prilika u razmatranoj interkonekciji, za nove zadate vrednosti napona generatora. Veličina  $\Delta Q_G$  (u %) je greška koju čini uprošćena metoda u okviru statičkog prilaza. Sve je to već bilo dato u [10].

Novina u ovoj tabeli je veličina  $Q_{GD}$  (Mvar), koja je dobijena u okviru primene dinamičkog simulacionog modela (primena računarskog programa *DINST*). Takođe, novina je i veličina  $\Delta Q_{GD}$  (u %), koja predstavlja grešku uprošćene metode, u poređenju sa vrednostima dobijenim u okviru dinamičkog prilaza. Na ovom praktičnom primeru potvrđena je upotrebnost vrednosti predložene metode, odnosno računarskog programa *DEFNAPON*, jer greška u od-



ređivanju novih vrednosti reaktivnih snaga nije prelazila 3 %.

U kontekstu ove dinamičke verifikacije, kao dobra ilustracija poslužiće slike 1-6, na kojoj se daju promene relevantnih veličina posmatranih generatora, nakon izvršenih korekcija napona generatora TE Nikola Tesla A i B. Period praćenja je iznosio 10 s, dovoljno dugo da bi se dostiglo novo, kvazistacionarno stanje.

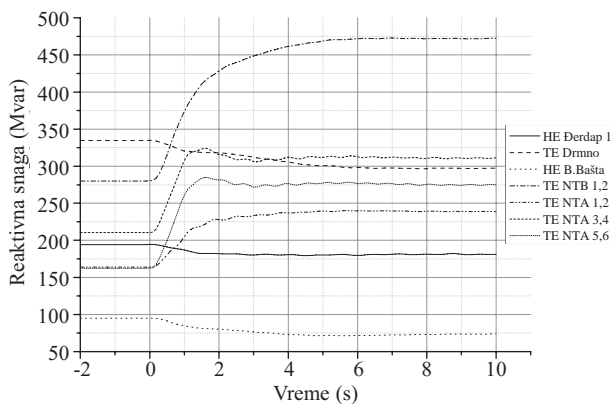
Slika 1. daje dinamiku promene reaktivne snage izabranih generatora, nakon pomenute korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B. Na kraju perioda praćenja, nove vrednosti reaktivnih snaga su se ustalile (za generatore u TE Nikola Tesla A i B, to su vrednosti  $Q_{GD}$ , date u tabeli 1).

Slika 2. daje dinamiku promene aktivne snage izabranih generatora, nakon pomenute korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B. Sa nje se jasno vidi da postoje prelazni procesi u tzv.  $P-\delta$  konturi, ali koji nisu dominantni. Odnosno, samo dolazi do malih promena aktivnih snaga, koje su uzrokovane takođe malim promenama u gubicima aktivne snage, usled novih napona, odnosno tokova reaktivnih snaga.

Dalje, slika 3. daje promene napona na krajevima izabranih generatora.

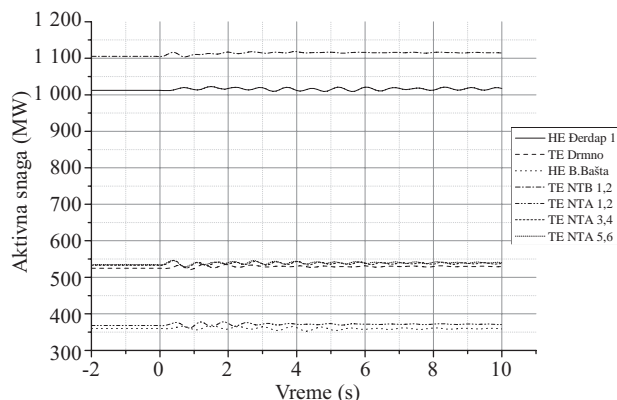
Promene električnih uglova izabranih generatora (referentna elektrana – HE Đerdap 1), daju se na slici 4. Te promene uglova (koje su, takođe, relativno male) su logična posledica povećanja napona (odnosno odgovarajućih elektromotornih sila), pri praktično istim vrednostima datih aktivnih snaga.

Slika 5. daje promene elektromotorne sile  $E_{fg}$  (srazmerna naponu na krajevima pobudnog kola) izabranih generatora, a slika 6, promene njihovih elektromotornih sila  $E_q$  (uslovljena strujom pobudnog kola). Sa ovih slika se jasno uočava dobar i kva-

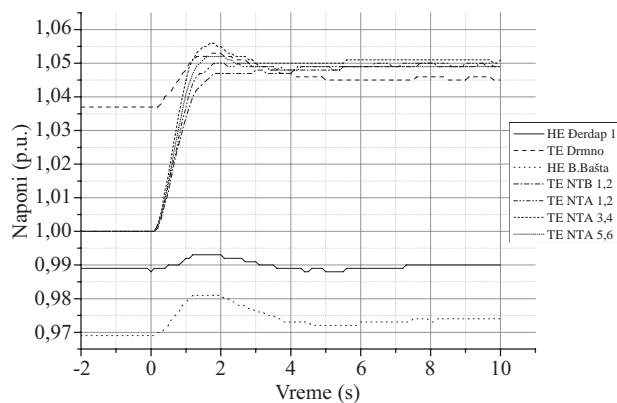


Slika 1. Promene reaktivne snage izabranih generatora, nakon korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B

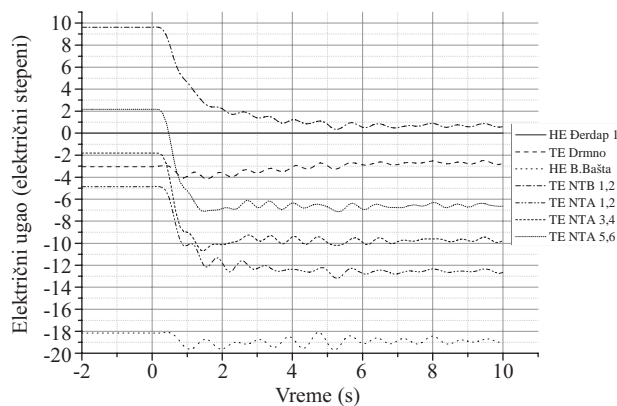
litetan rad sistema za regulacije pobude posmatranih generatora.



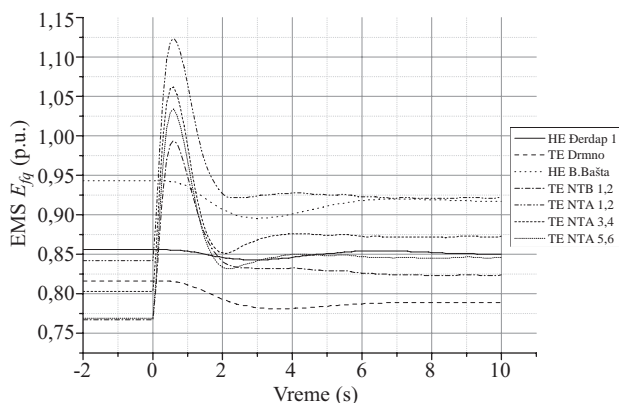
Slika 2. Promene aktivne snage izabranih generatora, nakon korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B



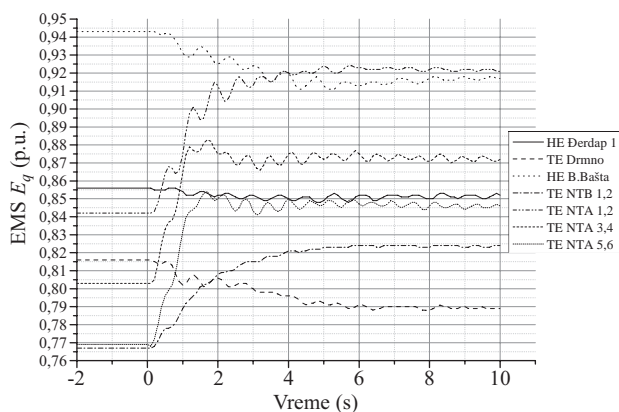
Slika 3. Promene napona na krajevima izabranih generatora, nakon korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B



Slika 4. Promene električnih uglova izabranih generatora, nakon korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B



Slika 5. Promene elektromotorne sile  $E_{fq}$  izabranih generatora, nakon korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B



Slika 6. Promene elektromotorne sile  $E_q$  izabranih generatora, nakon korekcije napona generatora u TE Nikola Tesla A i B

Takođe, u okviru ovih karakterističnih praktičnih primera primene predložene nove metode, obuhvaćena su i minimalna stanja prenosne mreže Srbije. Kao dobra ilustracija, u ovom radu daju se rezultati koji se odnose na minimalno stanje, koje se očekuje 2015. godine, imajući u vidu da će ono biti zaostrenije u odnosu na postojeća minimalna stanja, iz razloga koji su detaljno elaborirani u Studiji [4]. To je bila logična posledica sagledanog daljeg razvoja

prenosne mreže Srbije, odnosno uvođenja novih elemenata, saglasno podacima iz Studije [8]. Sprovedene široke analize u [4], omogućile su konstataciju da, i za očekivana minimalna stanja 2015. godine, postoje realni uslovi da se ostvare povoljne naponsko-reaktivne prilike, uz mogućnost racionalizacije, odnosno harmonizacije primene potpobuđenih režima angažovanih generatora u EES Srbije.

Kao ilustracija prethodno rečenog, poslužiće naredna tabela 2, koja se odnosi na očekivano minimalno stanje 2015. godine. U njoj se daju rezultati simultane promene napona generatora u HE Đerdap 1 (od početnih  $1,000 U_n$  do  $0,980 U_n$ ) i u TE Nikola Tesla A 1, 3, 5 TE Nikola Tesla B 1 (od početnih  $0,975 U_n$  do  $0,985 U_n$ ). U toj tabeli sa  $U_{GO}$  je označena početna vrednost napona prethodno pomenutih generatora (u r.j.). Oznaka  $U_{GN}$  odnosi se na nove, zadate vrednosti napona (takođe u r.j.), a veličina  $\Delta U_G$  (u %) predstavlja promenu napona generatora. Vrednosti reaktivnih snaga u polaznom stanju označene su sa  $Q_{GO}$  (Mvar), a nove vrednosti reaktivnih snaga generatora, dobijene rešavanjem matrice jednačine (2), sa  $Q_{GU}$  (Mvar). Veličina  $Q_G$  (Mvar) predstavlja nove vrednosti reaktivnih snaga, dobijene proračunom tokova snaga i naponskih prilika u razmatranoj interkonekciji, za nove zadate vrednosti napona generatora, a veličina  $\Delta Q_G$  (u %) je greška koju čini uprošćena metoda u okviru statičkog prilaza.

Sve je to već bilo dato u [10]. Novina u ovoj tabeli je veličina  $Q_{GD}$  (Mvar), koja je dobijena u okviru primene dinamičkog simulacionog modela (primena računarskog programa *DINST*). Takođe, novina je i veličina  $\Delta Q_{GD}$  (u %), koja predstavlja grešku uprošćene metode, u poređenju sa vrednostima dobijenim u okviru dinamičkog prilaza.

Saglasno iznetim pokazateljima u tabeli 2, evidentno je da bi predloženi novi plan napona relaksirao potrebu za potpobuđenim režimima rada tada angažovanih generatora u TE Nikola Tesla A i B, što je i bio cilj, a što svakako ima veoma pozitivne eksploatacione efekte. Ujedno, i na ovom praktičnom primeru potvrđena je upotrebnost predložene

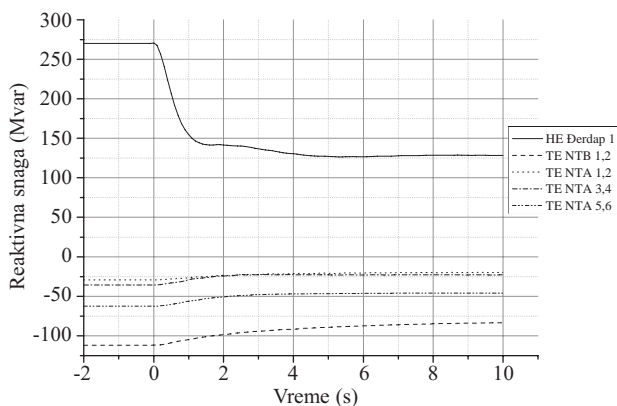
Tabela 2.

Poređenje rezultata uprošćenog, strožijeg (statičkog) i strožijeg (dinamičkog) prilaza, nakon korekcija napona generatora u HE Đerdap 1 i TE Nikola Tesla A i B.

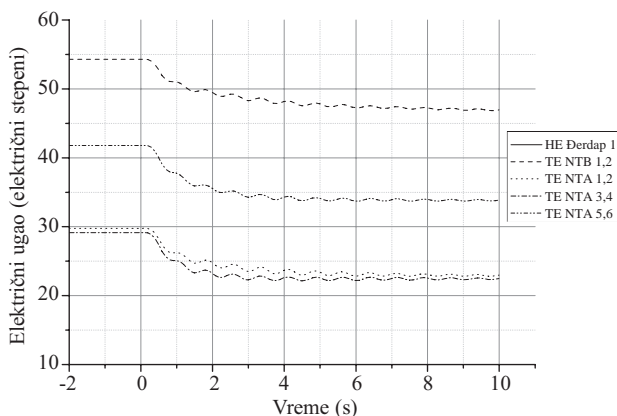
Redni broj	Elektrana	$U_{GO}$ (r.j.)	$U_{GN}$ (r.j.)	$\Delta U_G$ (%)	$Q_{GO}$ (Mvar)	$Q_{GU}$ (Mvar)	$Q_G$ (Mvar)	$Q_{GD}$ (Mvar)		$Q_{GD}$ (%)
1.	HE Đerdap 1	1,000	0,980	- 2,0	270,3	131,1	133,8	128,4	-1,948	2,103
2.	TE Nikola Tesla B1	0,975	0,985	1,0	-111,9	-84,0	-82,6	-83,4	1,712	0,719
3.	TE Nikola Tesla A1	0,975	0,985	1,0	-29,3	-19,0	-18,6	-19,6	2,350	3,061
4.	TE Nikola Tesla A3	0,975	0,985	1,0	-35,7	-23,0	-22,4	-22,9	2,314	0,437
5.	TE Nikola Tesla A5	0,975	0,985	1,0	-62,4	-44,0	-45,6	-45,9	1,899	4,139

metode, odnosno računarskog programa **DEFNAPON**, jer najveći iznos greške u određivanju novih vrednosti reaktivnih snaga, u okviru dinamičke verifikacije, se kretao oko 4 %.

U kontekstu ove dinamičke verifikacije, kao dobra ilustracija poslužiće slike 7-10, na kojima se daju promene relevantnih veličina generatora u HE Đerdap i TE Nikola Tesla A i B, nakon prethodno pomenute korekcije njihovih napona.



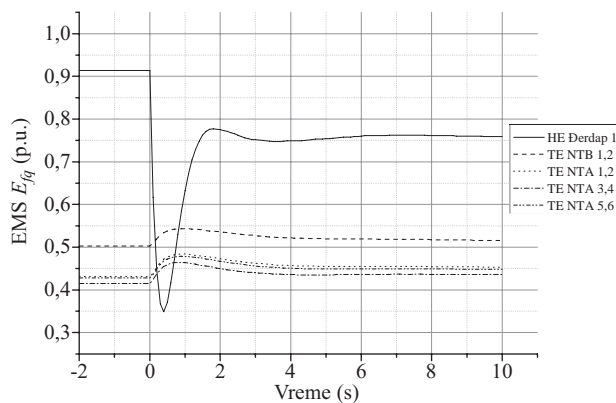
Slika 7. Promene reaktivne snage generatora u HE Đerdap i TE Nikola Tesla A i B, nakon korekcije njihovih napona



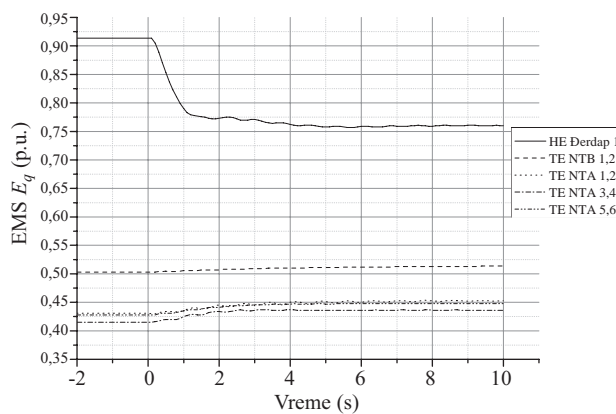
Slika 8. Promene električnih uglova generatora u HE Đerdap i TE Nikola Tesla A i B, nakon korekcije njihovih napona

Dakle, potvrđena je upotrebna vrednost predložene metode, odnosno računarskog programa **DEFNAPON**, jer najveći iznos greške u određivanju novih vrednosti reaktivnih snaga, u okviru dinamičke verifikacije, se kretao oko 4 %.

Predmet narednih istraživanja biće definisanje mesta i uloge predložene metode, u širem kontekstu odvijanja sekundarne i tercijarne regulacije napona, ako se prethodno utvrdi tehno-ekonomska opravdanost njenog automatskog odvijanja u prenosnoj mreži Srbije. Naravno, ta regulacija će se i dalje obavljati „ručno”, u okviru koje, predložena metoda, praće-



Slika 9. Promene elektromotorne  $E_{fq}$  sile generatora u HE Đerdap i TE Nikola Tesla A i B, nakon korekcije njihovih napona



Slika 10. Promene elektromotorne  $E_q$  sile generatora u HE Đerdap i TE Nikola Tesla A i B, nakon korekcije njihovih napona

na razvijenim računarskim programom, može da nađe svoje odgovarajuće mesto.

## 6. ZAKLJUČCI

U radu su izloženi relevantni metodološki i praktični aspekti verifikacije, u okviru dinamičkog simulacionog modela, jedne metode upravljanja naponima generatora. Namena ove metode je da brzo i dovoljno tačno definiše napone generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja prenosnih mreža. Njena verifikacija već je bila obavljena u okviru statičkog simulacionog modela, na primerima ostvarenog i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju. U ovom radu, verifikacija razvijene metode je izvršena u okviru dinamičkog simulacionog modela, za identična ostvarena i perspektivna stanja prenosne mreže Srbije. Takođe, i u okviru ove vrste verifikacije, utvrđena je visoka upotrebna vrednost predložene metode, jer najveća vrednost greške u određivanju

novih vrednosti reaktivnih snaga generatora se kretala oko 4 %.

Na taj način, predložena metoda, čiju materijalizaciju čini razvijeni računarskim program **DEF-NAPON**, mogla bi da nađe svoje odgovarajuće mesto, u okviru analiza i pripreme pogona, koje se obavljaju u odgovarajućim stručnim službama u Elektromreži Srbije. Naravno, ako potencijalni Korisnik oceni da to može da mu koristi u praksi.

## 7. LITERATURA

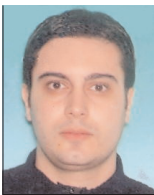
- [1] IZVEŠTAJ STRUČNOG TIMA ZA PROBLEMATIKU REAKTIVNE SNAGE I ENERGIJE U EES EPS-a, Beograd, oktobar, 2004.
- [2] IZBOR NAČINA SMANJENJA REAKTIVNOG OPTEREĆENJA U ELEKTRODISTRIBUTIVNOJ MREŽI ZA 200 Mvar, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2005.
- [3] IZBOR OPTIMALNOG NAČINA SMANJENJA REAKTIVNOG OPTEREĆENJA S GLEDIŠTA PRENOSNE MREŽE PO TS 110/X kV/kV U MREŽI EMS-A, U UKUPNOM IZNOSU OD DODATNIH 200 Mvar (170 Mvar NA NISKOM NAPONU I 30 Mvar NA SREDNJEM NAPONU), Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2006.
- [4] PLANIRANJE IZVORA REAKTIVNE SNAGE U PRENOSNOJ MREŽI EES SRBIJE – II FAZA – finalna verzija, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2007.
- [5] Tubić D. Stojković B. PONOVRNO POVEZIVANJE SA GLAVNIM DELOM UCTE MREŽE, časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 2004, str. 3-8
- [6] Mijailović S., Vujasinović Z., Cvijetić I., Marković S., REKONEKCIJA UCTE-A: NOVI USLOVI EKSPLOATACIJE, 13. simpozijum „Upravljanje i telekomunikacije u EES”, Tara, 29. maj-02. jun, 2006, Referat C2 I01
- [7] Cvijetić I., EXPERIENCES AND OUTCOMES AFTER RE-SYNCHRONIZATION OF THE UC-TE 2, EPS, Power System Control Department, 2005.
- [8] STUDIJA DUGOROČNOG RAZVOJA PRENOSNE MREŽE 400 kV, 220 kV I 110 kV NA PODRUČJU REPUBLIKE SRBIJE, ZA PERIOD DO 2025. GODINE, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2006.
- [9] Čalović M., Stefanov P., Sarić A., UPRAVLJANJE NAPONIMA I REAKTIVNIM SNAGAMA”, poglavlje u monografiji „PLANIRANJE I EKSPLOATACIJA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, Institut „Nikola Tesla”, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Institut „Mihajlo Pupin”, Beograd, 1995.
- [10] Popović D. P., UPRAVLJANJE NAPONIMA GENERATORA I NAPONSKO-REAKTIVNA STANJA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, str. 12-26, 2007.
- [11] Popović D. P., ODREĐIVANJE TOKOVA SNAGA U POLAZNIM USTALJENIM STANJIMA U ANALIZAMA SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, časopis „Elektroprivreda”, br. 2, str. 13-26, 2000.
- [12] Popović D. P., STATIČKA SIGURNOST ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, Monografija, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, juni 2004.
- [13] IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR EXCITATION SYSTEM MODELS FOR POWER SYSTEM STABILITY STUDIES, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981
- [14] IEEE Working Group Report: DYNAMIC MODELS FOR STEAM AND HYDRO TURBINE IN POWER SYSTEM STUDIES, IEEE Transactions, Vol. PAS-92, Dec. 1972.
- [15] IEEE Working Group Report: DYNAMIC MODELS FOR FOSSIL FUELLED STEAM UNITS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 91, pp. 753-761
- [16] IEEE Working Group Report: HYDRAULIC TURBINE AND TURBINE CONTROL MODELS FOR SYSTEM DYNAMIC STUDIES, Transactions on Power Systems Vol. 7, No. 1, February 1992, pp. 167-179
- [17] Popović D. P., AN APPROACH TO THE EVALUATION OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENT PROCESS IN POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 7, No. 2, 1984, pp. 141-151.
- [18] Popović D. P., AN EFFICIENT NETWORK SOLUTION METHOD IN TRANSIENT STABILITY STUDIES OF POWER SYSTEMS, Inter. Confer. „Signals & Systems”, Brighton (UK), July 12-14, 1989.
- [19] Popović D. P., A SIMPLE AND RELIABLE PROCEDURE FOR THE EVALUATION OF SHORT-TERM DYNAMIC PROCESS IN POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 8, No. 4, October 1986, pp. 195-204.
- [20] REGULACIJA NAPONA ODNOSNO POBUDNE STRUJE SINHRONIH GENERATORA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA SRBIJE SA GLEDIŠTA ZAHTEVA SISTEMA, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2005.

Rad je primljen u uredništvo 3. 07. 2007. godine



**Dragan P. Popović** rođen je 1943. godine u Beogradu gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1965. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1981. godine na smeru Elektroenergetski sistemi, a doktorsku tezu odbranio maja 1984. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Po diplomiranju, zaposlio se u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla”, gde se i sada nalazi, na radnom mestu višeg savetnika u centru „Elektroenergetski sistemi”. Godine 1997. izabran je u najviše naučno-istraživačko zvanje naučni savetnik. Maja meseca 2005 godine, izabran je za dopisnog člana Jugoslovenske inženjerske akademije u Odeljenju za elektrotehniku.

Predaje na doktorskim studijama Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i na master i doktorskim studijama Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Član je Komisije za sticanje naučnih zvanja Ministarstva nauke Republike Srbije. Do sada je bio autor preko 70 studija iz problematike planiranja, pogona i upravljanja elektroenergetskih sistema. Takođe, kao autor (pretežno) ili koautor, do sada je objavio jednu monografiju, jedan udžbenik, preko 180 naučnih i stručnih radova i razvio je veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih stanja elektroenergetskih interkonekcija.



**Miloš Stojković** je rođen 5. 10. 1978. godine u Vranju. Završio je Elektrotehnički fakultet u Beogradu (smer Elektroenergetski sistemi) 2004. godine. Godine 2005. upisao je postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od septembra 2005. godine stalno je zaposlen u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” (trenutno u zvanju Saradnik).

---

Saša Minić,  
Tijana Janjić, Miloje M. Kostić, Milan Ivanović,  
Branislav Čupić i Maja Marković

# Naponsko-reaktivne prilike u prenosnoj mreži Srbije i efekti mera za njihovo poboljšanje

Stručni rad

UDK: 621.311.1; 621.315; 621.316; 621.3.026.5; 621.3.027

---

Rezime:

U ovom radu prikazana je analiza naponsko-reaktivnih prilika u prenosnoj mreži Srbije. Izvršene analize ukazale su na potrebu za smanjenjem reaktivnih opterećenja po TS 110/X kV/kV. U radu je prikazana indeksna metoda bazirana na vrednostima marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage u sistemu koje su dobijene optimalnim proračunom tokova snaga, a na osnovu kojih je izvršen izbor TS 110/X kV/kV u kojima je neophodno smanjenje reaktivnog opterećenja u unapred definisanom iznosu. U radu su detaljno analizirani tehnički i ekonomski efekti predloženih i realizovanih mera.

**Ključne reči:** prenosna mreža, reaktivna snaga, kompenzacija

---

Abstract:

REACTIVE POWER/VOLTAGE CONDITIONS IN SERBIAN TRANSMISSION NETWORK  
AND IMPROVEMENT MEASURES EFFECTS

Reactive power audit in Serbian transmission network is presented in this paper. Performed analyses indicated the need to reduce reactive loads of 110/X kV/kV substations. Selection of 110/X kV/kV substations, in which it is necessary to reduce reactive loads in predetermined total amount, is made by index method presented in this paper. Technical and economical effects of proposed measures for reactive loads reduction are analyzed in detail.

**Key words:** transmission network, reactive power, compensation

---

## 1. UVOD

Reaktivno opterećenje prenosne mreže Srbije (merenja su na 35 kV u TS 110/35 kV/kV i na 110 kV u ostalim TS 110/X kV/kV) dostiglo je više od trećine aktivnog opterećenja u trenutku vršnog opterećenja 2004. godine. Nivo reaktivnog opterećenja bio je posebno visok u kritičnim tačkama prenosne mreže – na krajevima visoko opterećenih i dugačkih pe-

tlji 110 kV što je prouzrokovalo i značajne gubitke aktivne i reaktivne snage i visok nivo reaktivnog opterećenja generatora.

Činjenica da je EES Srbije tokom 2004. godine još uvek radio kao deo druge UCTE sinhronne zone, a nepovezan sa prvom UCTE sinhronom zonom, uslovlila je da su ispadi pojedinih generatorskih jedinica zbog manjka reaktivne snage mogli dovesti do redukcija čak i u slučajevima kada se raspolagalo

---

Saša Minić, dipl. ing. el., Tijana Janjić, dipl. ing. el.,  
Miloje M. Kostić, dipl. ing. el., Milan Ivanović, dipl. ing. el., Branislav Čupić, dipl. ing. el., Maja Marković, dipl. ing. el. –  
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a

dovoljnom aktivnom snagom. Jedan takav ispad dogodio se tokom maja 2004. godine i uslovio je niz poteza na ubrzanju redukciji reaktivnog opterećenja od strane EPS-a.

Izvršene analize funkcionisanja EES-a Srbije ukazale su na niz kritičnih tačaka u sistemu u kojima bi se redukcija reaktivnog opterećenja po TS 110/X kV/kV mogla pokazati visoko rentabilnom i samo sa gledišta efekata u prenosnoj mreži. Na bazi ovih analiza doneta je odluka o hitnoj redukciji reaktivnog opterećenja u iznosu od 200 Mvar kroz kompenzaciju reaktivne snage na niskom naponu, koje bi se realizovalo na bazi posebnog elaborata u kojem bi se istražile posledice predloženog smanjenja [1]. Pored ove, donete su odluke o promeni cena reaktivne energije za potrošnju po različitim naponskim nivoima i akciji aktiviranja kondenzatorskih baterija kod industrijskih potrošača u većoj meri na bazi analiza mogućnosti njihovog uključenja sa gledišta uticaja na distorziju harmonika napona i struje (ova akcija je sprovedena kroz poseban projekat – [2]).

Aspekti vezani za sprovođenje mere smanjenja reaktivnog opterećenja u iznosu od 200 Mvar, koje je realizovano na bazi istraživanja sprovedenih u [1] i analiza efekata ove i drugih mera detaljno su prikazani u ovom radu. U narednom poglavlju najpre će se izložiti sa kojim se podacima raspolagalo pri analizi, način dopunjavanja nedostajućih podataka i analiza greške koja se pri tome čini.

## **2. PODACI ZA ANALIZU NAPONSKO-REAKTIVNIH PRILIKA**

Za analizu reaktivno-naponskih prilika modelovana je prenosna mreža Srbije napona 400, 220 i 110 kV. Opterećenja su modelovana po TS 110/X kV/kV, pri čemu su modelovana na onoj strani gde postoji merenje: na 35 kV u TS 110/35 kV/kV, a na 110 kV u ostalim TS 110/X kV/kV. To znači da su modelovani i svi transformatori 110/35 kV/kV u mreži Srbije.

U EPS-u se raspolaze kvalitetnom bazom petnaestominutnih aktivnih opterećenja po svim mernim mestima (nešto više od 250 mernih mesta). Njena eventualna nepopunjenost na određenim mestima u određenim vremenskim periodima može se kvalitetno kompenzovati analizom u prethodnim periodima ili podacima sa kojima raspolazu pojedina distributivna preduzeća.

Problem, međutim, predstavljaju reaktivna opterećenja. Za najveći broj mernih mesta u okviru prenosne mreže EES-a Srbije ne raspolaze se petnaestominutnim opterećenjima. U toku je nabavka i montiranje nove merne opreme i opreme za akvizi-

ciju podataka kojom će se ovaj problem prevazići. Međutim, do tog momenta potrebno je formirati kvalitetnu podlogu za analize naponsko-reaktivnih prilika. Imajući u vidu da se po svim mernim mestima raspolaze podacima o mesečnim protocima aktivne i reaktivne energije, kao adekvatna zamena za realna reaktivna opterećenja za sada se koriste proračunska opterećenja dobijena na bazi prosečnog mesečnog odnosa reaktivne i aktivne energije i aktivnog opterećenja u analiziranom trenutku. Pri tome se, naravno, čini greška. Aspekti ove greške analizirani su na primerima mernih mesta gde se raspolaze i aktivnim i reaktivnim opterećenjima.

Za sva merna mesta na kojima se raspolaze merenjem reaktivne snage izvršeno je poređenje proračunske vrednosti na bazi prosečnog mesečnog odnosa reaktivne i aktivne snage iz meseca u kojem je opterećenje zabeleženo i tačne vrednosti zabeležene u trenutku minimalnog i maksimalnog opterećenja EES-a Srbije. Za analizirana merna mesta (njih 42) uočeno je da je zbir tačnih reaktivnih opterećenja u minimalnom režimu za 26 % veći od proračunskog, a u maksimalnom režimu, praktično, jednak proračunskom. To znači da zaključci doneti za minimalan režim u pogledu eventualnih prenapona ili odlaska elektrana u potpobudu idu značajno na stranu sigurnosti (jer je modelovani režim oštrije od realnog), a zaključci doneti za maksimalan režim su validni.

Analize naponsko-reaktivnih prilika izvršene su za tri karakteristična stanja u 2004. godini:

- vršno opterećenje (13. 2. 2004. godine u 19<sup>15</sup> – ukupno modelovano opterećenje po TS 110/X kV/kV je 5 585 MW i 1 915 Mvar);
- apsolutni letnji minimum (14. 6. 2004. u 3<sup>15</sup> – 1 732 MW i 909 Mvar) i
- izabrano srednje opterećenje (18. 5. 2004. godine u 19<sup>45</sup> – 3 739 MW i 1 739 Mvar). Za srednje opterećenje izabran je trenutak neposredno pre situacije koja je dovela do havarijskog isključenja dela potrošnje, a prvenstveno je prouzrokovana nedostatkom proizvodnje reaktivne snage u mreži EPS-a.

## **3. ANALIZA NAPONSKO-REAKTIVNIH PRILIKA U PRENOSNOJ MREŽI SRBIJE 2004. GODINE PRE MERA ZA SMANJENJE REAKTIVNIH OPTEREĆENJA**

Za analizu naponsko-reaktivnih prilika modelovan je izolovan rad mreže uz manje razmene sa Republikom Srpskom, Crnom Gorom i Kosovom i Metohijom koje ne utiču na zaključke analiza. Angažovanje elektrana je modelovano shodno stanju u modelovanom režimu. Pošto je analiza vršena za optimalan izbor prenosnog odnosa transformatora u

mreži i učvorenju mrežu 110 kV, a razmene sa susednim sistemima uglavnom nisu uzete u obzir, angažovanja elektrana se u određenoj meri razlikuju od realizovanih u analiziranim stanjima. Treba istaći činjenicu da sadašnji rad sistema u interkonekciji utiče na naponske prilike u mreži jer neposredno deluje na napone u graničnim čvorovima prenosne mreže. Ipak, zaključci koji su doneti na bazi dobijenih proračuna su validni imajući u vidu da se efekti smanjenja reaktivnih opterećenja najviše pojavljuju u mreži 110 kV koja je u manjoj meri pod uticajem prilika u interkonektivnim čvorovima i delom u mreži 220 kV.

Analize su pokazale da su naponske prilike u mreži 400 kV relativno dobre i da se može postići stanje takvo da napon padne ispod nominalnog samo u jednoj tački – TS 400/110 kV/kV Subotica 3. Značajno je uočiti i činjenicu da su osim voda HE Đerdap – TS 400/110 kV/kV Bor 2, koji je opterećen sa 66 % nominalne struje, ostali vodovi 400 kV opterećeni sa manje od 50 % nominalne struje.

Naponske prilike u mreži 220 kV su, takođe, relativno dobre. Međutim, situacija sa opterećenjem vodova 220 kV je nešto drugačija, jer postoji nešto veći broj visoko opterećenih vodova. Posebno je naglašen problem visokog opterećenja početne deonice 220 kV magistrale koja se iz pravca HE i RHE Bajina Bašta pruža ka istoku, tj. voda TS 220/35 kV/kV Bajina Bašta – TS 220/110 kV/kV Požega koji je pri maksimalnim opterećenjima opterećen 250-260 MVA. Posledica visokog opterećenja ovog voda je pad napona u mreži 220 kV od HE i RHE Bajina Bašta do TS 220/110 kV/kV Kruševac 1 koji iznosi više od 10 %, a gubici na ovoj deonici su 3,2 MW i 15,9 Mvar.

Relativno je visoko opterećenje i vodova iz pravca TE Nikola Tesla A ka TS 220/110 kV/kV Beograd 3 i Šabac 3, napojnih vodova za TS 220/110 kV/kV Beograd 17 iz pravca TS 400/220 kV/kV Beograd 8 i za TS 220/110 kV/kV Leskovac 2 iz TS 400/220/110 kV/kV Niš 2. Opterećenje pomenutih vodova se kreće u opsegu 60-70 % nominalne struje, a zbog njihove relativno male dužine, nema problema sa naponima u napajanim TS.

Što se tiče mreže 110 kV, njenim dobrim upravljanjem može se postići stanje gde naponi u mreži 110 kV ne padaju ispod 104 kV. Realno stanje je nepovoljnije zbog činjenica da su referentni naponi za regulaciju u TS 220/110 kV/kV obično niži nego što su u modelovanom stanju, a mreža 110 kV na nizu mesta funkcioniše kao radijalna.

U mreži 110 kV ima nekoliko mesta gde visoko opterećenje vodova i njihova relativno velika dužina dovode do značajnih padova napona i velikih gubitaka aktivne i reaktivne snage.

Uočeno je ukupno devet petlji 110 kV sa padovima napona između 5 i 11 % od napojnih tačaka 110 kV do TS 110/X kV/kV sa najnižim naponima u tim petljama. Ove petlje karakterišu veliki gubici aktivnih i reaktivnih snaga. Sa gledišta naponskih prilika, opterećenja i gubitaka kritična je petlja HE Uvac – TS 110/35 kV/kV Sjenica – TS 110/35 kV/kV Novi Pazar 1 (gde je priključen kratkim vodom i TS 110/10 kV/kV Novi Pazar 2) – TS 110/35 kV/kV Raška – TS 220/110 kV/kV Kraljevo 3. Iako je napon u analiziranom stanju u TS 220/110 kV/kV Kraljevo 3 relativno visok – 117,3 kV u TS 110/35 kV/kV Novi Pazar 1 on pada na 104,7 kV, dakle, za 11 %. To je posledica velike ukupne dužine pomenute petlje – oko 152 km i činjenice da je čine vodovi preseka Al<sup>3</sup> 150 mm<sup>2</sup> opterećeni sa 60-70 % nominalne snage. Gubici aktivne snage na ovoj petlji iznose oko 5,5 MW, tj. oko 6 % opterećenja modelovanog na pomenutim TS. Stanje na ovoj petlji ima indirektan uticaj i na pomenutu 220 kV magistralu iz pravca HE i RHE Bajina Bašta ka istoku, jer se eventualnim rasterećenjem pomenutih 110 kV vodova rasterećuju i kritične deonice 220 kV.

Na žalost, i druge 110 kV petlje su napajane sa problematične 220 kV magistrale, tako da gubici aktivne i reaktivne snage na nekim petljama 110 kV dodatno uvećavaju gubitke aktivne i reaktivne snage na magistrali 220 kV HE i RHE Bajina Bašta – TS 220/110 kV/kV Kruševac 1.

Činjenica je da su loše naponsko-reaktivne prilike na nekim mestima u mreži posledica nedovoljne izgrađenosti mreže. Zbog toga je potrebno naglasiti da je u prenosnoj mreži Srbije bila u toku realizacija niza velikih investicija koje imaju značajan uticaj na stanje u mreži 110 kV. Ovaj faktor trebalo je imati u vidu pri izboru TS 110/X kV/kV u kojima je najekonomičnije smanjiti reaktivno opterećenje.

U narednom poglavlju biće izložena metodologija za izbor TS 110/X kV/kV u kojima je optimalno smanjiti reaktivno opterećenje sa gledišta prilika u prenosnoj mreži.

#### **4. METODOLOGIJA ZA OPTIMALAN IZBOR TS 110/X kV/kV ZA REDUKCIJU REAKTIVNOG OPTEREĆENJA**

Pregled savremenih metoda za planiranje novih izvora reaktivne snage dat je u [3]. Većina tehnika za rešavanje analiziranog problema navedenih u ovim radovima pripada nekoj od sledećih kategorija optimizacionih metoda:

- Nelinearno programiranje;
- Linearno programiranje;
- Mešovito celobrojno programiranje;
- Metode dekompozicije;



- Heuristički metodi;
- Simulirano kaljenje;
- Evolutivni algoritmi;
- Veštačke neuralne mreže i
- Indeksne metode;

Planiranje izvora reaktivne snage preko indeksnih metoda podrazumeva da se kroz vrednosti određenih indeksa formiranih na bazi vrednosti odabranih parametara u mreži ukaže na tačke u kojima je najbolje instalirati izvore reaktivne snage. Neke od indeksnih metoda su: analiza osetljivosti koja ukazuje gde instaliranje izvora reaktivne snage ima najveći uticaj na povećanje rezerve u reaktivnoj snazi generatora [4] – [7], metoda troškova i koristi koja kroz analizu u svim čvorovima u mreži ukazuje na onaj čvor gde ugradnja izvora reaktivne snage ima najveći uticaj na smanjenje troškova funkcionisanja EES-a [8] i metoda margine naponske stabilnosti koja za ugradnju izvora reaktivne snage među čvorovima bira onaj sa najvećim odnosom veličine odstupanja napona u havarijskom režimu od trenutne vrednosti i veličine odstupanja napona u normalnom režimu od trenutne vrednosti [9].

Za određivanje liste TS 110/X kV/kV u prenosnoj mreži Srbije u kojima je najbolje smanjiti reaktivno opterećenje korišćena je takođe indeksna metoda. Formiranje liste TS 110/X kV/kV u kojima je najbolje smanjiti reaktivno opterećenje vršeno je na bazi efekata koje to smanjenje ima na redukciju gubitaka aktivne i reaktivne snage u prenosnoj mreži Srbije. Da bi se utvrdio spisak kandidata za listu korišćen je kriterijum maksimalnih vrednosti marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage u maksimalnom režimu u prenosnoj mreži Srbije. Za proračun vrednosti marginalnih troškova korišćen je optimalni proračun tokova snaga u okviru programa CLF-OPF koji se standardno koristi u EPS-u.

Funkcija troškova koja se optimizira u okviru OPF je kvadratna funkcija generisane aktivne i reaktivne snage po generatorskim čvorovima u mreži:

$$F(P_i, Q_i, i=1, \dots, N_{gen}) = \sum_{i=1}^{N_{gen}} (C_{1P_i} \cdot P_i + C_{2P_i} \cdot P_i^2 + C_{1Q_i} \cdot Q_i + C_{2Q_i} \cdot Q_i^2) \quad (1)$$

gde su:

$P_i, Q_i$  – injektirana aktivna i reaktivna snaga u generatorskim čvorovima prenosne mreže,

$N_{gen}$  – broj generatorskih čvorova u mreži,

$C_{1P_i} = 1, C_{2P_i} = 0, C_{1Q_i} = 0,01, C_{2Q_i} = 0$  – linearni i kvadratni koeficijenti sa svojim vrednostima u okviru funkcije troškova.

Na bazi iskustva sa cenama instalisanog MW u elektrani i Mvar u postrojenjima za kompenzaciju

(čiji je odnos približno 100:1) usvojeno je da su vrednosti linearnih koeficijenata troškova generisanja aktivne i reaktivne snage u generatorskim čvorovima u mreži 1 i 0,01 respektivno, a za kvadratne koeficijente u funkciji troškova usvojena je vrednost 0. Pošto je modelovano aktivno i reaktivno opterećenje u mreži konstantno, to znači da je rezultat optimalnog proračuna tokova snaga stanje sa minimalnim gubicima aktivne snage, uz što je moguće niže gubitke reaktivne snage.

Marginalni troškovi aktivne i reaktivne snage u čvoru i se proračunavaju kao parcijalni izvodi funkcije troškova po generisanoj aktivnoj i reaktivnoj snazi u tom čvoru:

$$\frac{\partial F}{\partial P_i}, \frac{\partial F}{\partial Q_i} \quad (2)$$

Marginalni troškovi aktivne i reaktivne snage u čvoru i pokazuju maksimalnu relativnu „cenu” instalisanog MW i Mvar u tom čvoru i koja je konkurentna postojećim generatorskim jedinicama sa gledišta „cene” njihovog injektiranja. Cena injektiranja generatora  $i$  je iskazana kao izraz u zagradi pod sumom u jednačini (1). Za proračun marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage po svim TS 110/X kV/kV korišćen je OPF, a oni su korišćeni kao indeks koji je ukazivao na čvorovišta u mreži sa najvećim efektima smanjenja reaktivnog opterećenja. Dakle, ukoliko se npr. za vrednost marginalnih troškova aktivne snage u nekom čvoru dobije vrednost 1,03, a u generatorskim čvorovima su usvojene vrednosti koeficijenata kao što je prethodno predloženo ( $C_{1P_i} = 1, C_{2P_i} = 0, C_{1Q_i} = 0,01, C_{2Q_i} = 0$ ), to znači da je u pomenutom čvoru ekonomičnije instalirati izvor aktivne snage ako je njegova cena najviše 1,03 puta veća od cene izvora aktivne snage u nekom (obično najbližem) generatorskom čvoru.

Vrednosti marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage čvorova u mreži su u jakoj korelaciji, odnosno, čvorovi sa većim vrednostima marginalnih troškova aktivne snage imaju i povećane marginalne troškove reaktivne snage. Zato je za vrednost indeksa koji ukazuje na čvor u kojem je najekonomičnije smanjiti reaktivno opterećenje odabrana vrednost marginalnih troškova aktivne snage, a ukoliko dva čvora imaju istu vrednost ovog indeksa, za smanjenje reaktivnog opterećenja bira se čvor sa većom vrednošću marginalnih troškova reaktivne snage.

Smanjenje reaktivnog opterećenja modelovano je uvažavajući unapred usvojena ograničenja. Smanjenje po pojedinim TS 110/X kV/kV je realizovano do nivoa reaktivnih opterećenja u minimumu. Na taj način ne bi došlo do prekompenzacije u minimalnim režimima. Postupak modelovanja smanjenja reaktivnih opterećenja se obavlja iterativno. Iterativno sma-

njenje reaktivnih opterećenja po TS 110/X kV/kV omogućava i uvažavanja ograničenja organizacione i tehničke prirode koja definišu maksimalan obim smanjenja reaktivnih opterećenja po pojedinim distributivnim područjima (prostornim celinama).

Pri svakoj fazi iterativnog postupka analizirano je i funkcionisanje prenosne mreže u uslovima minimalnih opterećenja da bi se sagledale eventualne posledice u pogledu prenapona u mreži, ili potrebe da se pojedini generatori uvedu u režim potpobude. Posle svake iteracije ponavlja se proračun optimalnih troškova snaga za novo stanje sa smanjenim reaktivnim opterećenjima u maksimalnom režimu čime se dolazi do novih vrednosti marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage. Naime, smanjenje reaktivnih opterećenja u pojedinim tačkama u mreži utiče na vrednosti marginalnih troškova, a u određenoj meri i na redosled čvorova po veličini marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage. U određenim situacijama, naime, može da se dogodi da se smanjenjem reaktivnih opterećenja u jednoj tački ugrožene 110 kV petlje stanje toliko poboljša, odnosno, vrednosti marginalnih troškova aktivne i reaktivne snage u ostalim tačkama te petlje u tolikoj meri smanje da je ekonomičnije u sledećoj iteraciji smanjivati reaktivno opterećenje na nekom drugom mestu u mreži (u nekoj drugoj petlji 110 kV). Ipak, treba istaći činjenicu da se na bazi izvršenih analiza došlo do zaključka da je ovo retka situacija.

U narednom poglavlju izloženi su rezultati primene predložene metodologije na prenosnu mrežu Srbije.

## 5. REZULTATI PRIMENE METODOLOGIJE I EFEKTI PREDLOŽENIH MERA

U narednoj tabeli data je lista TS 110/X kV/kV sa opterećenjima u maksimalnom režimu i predloženim smanjenjem reaktivnog opterećenja, kao i očekivani efekti smanjenja gubitaka aktivne i reaktivne snage po realizaciji ovih mera.

TS su grupisane prema organizacionim celinama prema kojima su postavljena ograničenja ukupne reaktivne snage koju treba redukovati.

Očekivana smanjenja gubitaka po elementima mreže različitih naponskih nivoa za maksimalna opterećenja iz 2004. godine i postojeće i pojačano stanje prenosne mreže i izabrani srednji režim postojeće prenosne mreže prikazani su u tabeli 2.

Na bazi izvršenih analiza zaključeno je da smanjenje reaktivnog opterećenja na predloženi način ne ugrožava normalno funkcionisanje mreže u minimalnom režimu s gledišta eventualnih prenapona, ulaska generatora u potpobudu, ili potrebe za sla-

bljenjem nivoa sigurnosti mreže (isključenjem nekih vodova) zbog viška reaktivne snage u sistemu.

### 5.1. Efekti predloženih mera

U toku 2005. godine realizovane su dve mere smanjenja reaktivnog opterećenja TS 110/X kV/kV koje se napajaju iz mreže EMS-a: ugradnja kompenzacije na niskom naponu u ukupnom iznosu od ~200 Mvar po TS X/0,4 kV/kV koje se posredno ili neposredno napajaju iz odabranih TS 110/X kV/kV [1] i aktiviranje kondenzatorskih baterija kod industrijskih potrošača u ukupnom iznosu od ~22 Mvar na području ED Kragujevac, ED Požarevac, ED Užice i ED Zaječar [2].

Na bazi tabele 2 nabavljene su baterije kondenzatora za ugradnju na niskom naponu u ukupnom iznosu od ~200 Mvar. Međutim, nominalni napon ovih baterija je 440 V, pa ukoliko bi radile u mreži pod naponom 400 V (koji odgovara faznom naponu od 231 V) reaktivna snaga koju bi one generisale bi iznosila ~165 Mvar. Pošto su u velikom obimu baterije ugrađivane tamo gde daju najveće efekte u distributivnoj mreži u pogledu smanjenja gubitaka i poboljšanja naponskih prilika – na dugačkim vangradskim pravcima sa velikim padovima napona, izvesno je da je iznos reaktivne snage koje su one generisale u mrežu niži i od 165 Mvar.

Predlog dat u tabeli 2 nije dosledno realizovan iz objektivnih razloga. Naime, uvidom u lokalnu distributivnu mrežu procenjeno je da bi u nekim slučajevima ugradnja baterija u distributivnim TS dala veće efekte, pa je ta ugradnja i realizovana. Takođe, kod nekih TS 110/X kV/kV nije bilo dovoljno TS X/0,4 kV/kV kod kojih bi se baterije ugradile, pa je napravljena preraspodela. Analiza efekata ugradnje izvršena je na bazi realizovane kompenzacije reaktivne snage na niskom naponu.

Na bazi priloženih podataka može se doneti niz zaključaka o efektima smanjenja reaktivnog opterećenja po TS 110/X kV/kV:

1. Kompenzacija reaktivne energije na niskom naponu kod TS kod kojih je realizovana u većem iznosu dovela je do značajnijeg porasta maksimalnog aktivnog opterećenja i aktivnog opterećenja ovih TS u trenutku maksimalnog opterećenja sistema. Naime, vršno opterećenje sistema je u 2006. godini u odnosu na 2005. poraslo za 7,5 %. U nizu TS 110/X kV/kV koje su prikazane u priloženim tabelama procenat porasta je značajno veći. Kod nekih je to posledica preuzimanja konzuma usled razvoja mreže, kod drugih – posledica promene uklopnog stanja zbog havarijskih režima, ali postoje TS 110/X kV/kV kod kojih su

Tabela 1.

Pregled TS po kojima se predlaže smanjenje reaktivnih opterećenja, njihova opterećenja u maksimalnom stanju 2004. godine i predloženi iznos smanjenja reaktivnih opterećenja

Naziv TS	Opterećenje u maksimumu (13. 2. 2004. u 19 <sup>15</sup> )		Modelovano smanjenje reaktivnog opterećenja (Mvar)	Naziv TS	Opterećenje u maksimumu (13. 2. 2004. u 19 <sup>15</sup> )		Modelovano smanjenje reaktivnog opterećenja (Mvar)
	P (MW)	Q (Mvar)			P (MW)	Q (Mvar)	
Vršac 1	13,99	5,84	6	Svrljig	8,23	2,32	0,5
Vršac 2	25,17	9,31	4	Knjaževac	18,14	5,30	2,5
Bela Crkva	13,02	3,68	2	Zaječar 1	18,40	2,25	0,5
Senta 1	9,42	2,28	1	Zaječar 2	19,49	6,49	3,5
Senta 2	14,96	5,59	2	SIP	13,43	3,99	2,0
Ada	20,30	7,61	3	Majdanpek 1	8,40	4,06	2,0
Kikinda 1	24,49	5,48	4	Majdanpek 2	7,55	3,79	1,5
Kikinda 2	25,73	7,54	5	Negotin	21,17	7,24	0,5
Odžaci	33,70	11,62	6	Sm. Palanka	39,94	10,11	5,0
Alibunar	19,57	9,14	2	Velika Plana	36,62	10,25	5,0
Beograd 10	55,94	19,54	9	Petrovac	33,24	15,67	2,0
Mladenovac	47,80	13,74	6	Sevojno	5,85	0,62	1,0
Beograd 11	71,12	17,17	7	Sušica	23,76	9,68	3,5
Novi Pazar 1	46,48	14,17	10	Ivanjica	17,69	7,32	4,5
Novi Pazar 2	9,50	2,48	2	Nova Varoš	9,16	4,28	2,0
Raška	29,32	10,97	10	Užice	41,71	15,03	4,0
Sjenica	8,04	3,26	1	Leskovac 1	28,77	9,80	4,0
Aleksandrovac	18,61	7,87	3	Jablanica	31,83	12,44	4,0
Lešnica	18,24	9,10	3	Belo Polje	12,67	4,54	2,0
Loznica	46,33	22,68	8	Lapovo	34,85	12,16	2,0
Trstenik	26,07	8,80	5	Kragujevac 3	36,17	12,29	1,5
Kraljevo 1	22,46	8,55	4	Stragari	5,81	1,97	0,5
Čačak 1	44,29	16,41	6	Kragujevac 8	12,14	4,13	1,0
Gornji Milanovac	29,78	11,87	4	Kragujevac 1	33,26	11,31	1,0
Kruševac 2	39,18	16,57	4	Kragujevac 5	22,70	7,72	1,0
Prokuplje	47,71	13,77	6	Vranje	50,32	10,36	4,0
Kuršumlija	17,14	6,93	6	Bujanovac	35,55	15,07	4,0
Aleksinac	42,27	13,70	5	Ukupno			200
Smanjenje maksimalnih gubitaka aktivne snage (MW)			~8,6	Smanjenje maksimalnih gubitaka aktivne snage (MW)			~80

Tabela 2.

Očekivana smanjenja gubitaka po elementima mreže i naponskim nivoima u maksimalnom stanju 2004. godine (za postojeću prenosnu mrežu i prenosnu mrežu pojačanu novim elementima čija je gradnja u toku) i u analiziranom srednjem stanju 2004. godine

Element mreže	Smanjenje maksimalnih gubitaka aktivne snage (MW)		Smanjenje gubitaka aktivne snage u srednjem stanju (MW)
	Postojeća mreža EPS-a	Pojačana mreža EPS-a	
Transformatori 110/X kV/kV	0,2	0,2	0,2
Vodovi 110 kV	4,2	3,4	3,0
Transformatori 220/110 kV i 220/35 kV/kV	0,2	0,2	0,1
Vodovi 220 kV	3,5	2,9	2,2
Transformatori 400/220 kV i 400/110 kV/kV	0,1	0,1	0,1
Vodovi 400 kV	0,4	0,3	0,4
Ukupno	8,6	7,0	6,0

ovakve promene nemoguće, jer su one izolovane od susednih TS 110/X kV/kV. Nekoliko takvih karakterističnih TS su Raška (porast maksimalne aktivne snage za 18 %), Trstenik (18 %), Sjenica (28 %), Novi Pazar 1 i 2 (zbirno – 16 %).

Iako porast stanovnika na području Sandžaka može donekle da bude opravdanje za visoke stope porasta potrošnje električne energije, na području ED Raška i ED Trstenik nema osnova za takva očekivanja, pa je brži porast od prosečnog verovatno posledica eliminisanja efekta prigušene potrošnje zbog loših naponskih prilika koji se postiže intenzivnom kompenzacijom reaktivne snage, posebno na dugačkim vangradskim izvodima sa lošim naponskim prilikama. Analize izvršene na pojedinačnim dugačkim izvodima sa velikim obimom kompenzacije pokazale su da se na njima može očekivati poboljšanje naponskih prilika i 5-10 % u maksimalnim režimima. Posledica poboljšanih naponskih prilika u određenom procentu približno odgovara porastu aktivnih opterećenja u dvostrukom procentu za opterećenja koja su termogena, a uglavnom su takve karakteristike opterećenja na ruralnim područjima koja su napajana dugačkim izvodima. Ukoliko se pri tome kompenzacija značajnije odrazi i na poboljšanje naponskih prilika u napojnoj tački određenog distributivnog područja (kao npr. u TS Raška, Novi Pazar 1 i 2 i Sjenica) posledica je značajan porast aktivnog opterećenja. Ekonomski efekti ovakve pojave su pozitivni ukoliko je mreža adekvatno dimenzionisana za novi nivo opterećenja, ali mogu biti i negativni ukoliko mreža nije adekvatno dimenzionisana pa se ulazi dublje u zonu neekonomičnog prenosa i distribucije snage.

**2. I pored značajnijeg porasta aktivnog opterećenja** (bilo da se posmatra na nivou pojedinačnih TS 110/X kV/kV, bilo na nivou sistema), reaktivno opterećenje uglavnom značajnije opada. Iako je zbirni porast aktivne snage u TS 110/X kV/kV u kojima je izvršena kompenzacija oko 215 MW pri maksimalnom opterećenju sistema, reaktivno opterećenje je niže za oko 188 Mvar. Samo pet TS 110/X kV/kV ima brži porast reaktivnog opterećenja od aktivnog (TS 110/X kV/kV na području Vojvodine: Indija, Novi Sad 1, Žabalj, Bajmok i Debeljača), a u njima je izvršena relativno mala kompenzacija reaktivne snage. U 21 od ukupno 94 TS 110/X kV/kV javlja se porast reaktivnog opterećenja, ali su u pitanju TS sa velikim porastom aktivnog opterećenja (razvojem potrošnje) i (ili) relativno malom realizovanom kompenzacijom.

Veliki procenat smanjenja reaktivnog opterećenja po TS oslobodio je kapacitete transformatora 110/X kV/kV u njima, ali i u vodovima i TS

220/110 kV/kV, TS 400/110 kV/kV i TS 400/220 kV/kV koje ih napajaju. Tako npr. u TS 110/35 kV/kV Raška, TS 110/35/10 kV/kV Trstenik, TS 110/35 kV/kV Kraljevo 1 i TS 110/35 kV/kV Leskovac 1 prenete aktivne snage su veće za 18 %, 18 %, 15 % i 20 %, redom, a opterećenje transformatora 110/X kV/kV je poraslo svega 11 %, 12 %, 8 % i 17 % redom.

**3. Određen deo smanjenja reaktivnog opterećenja je posledica kompenzacije koju su sami potrošači izvršili.** Naime, ukoliko bi se uzelo da je u smanjenju reaktivnog opterećenja učestvovalo 165 Mvar ugrađenih na niskom naponu (a izvesno je da je manje) i 22 Mvar kod industrijskih potrošača, to u zbiru daje 187 Mvar, a proračunsko smanjenje reaktivnog opterećenja je 188 Mvar. Da su potrošači sami vršili kompenzaciju reaktivne snage ukazuje i primer TS 110/35 kV/kV Kraljevo 1 gde je već u 2005. godini faktor snage sveden na 0,998 sa 0,934 u 2004. godini.

**4. Smanjenje gubitaka u prenosnoj mreži koje je posledica kompenzacije reaktivne snage može se sagledati ukoliko se pretpostavi da bi TS 110/X kV/kV, u kojima je evidentirana kompenzacija reaktivne snage za aktivna opterećenja iz 2006. godine, zadržale faktor snage iz 2004. godine.** Iz tabele 2 vidi se da je očekivano smanjenje gubitaka 8,6 MW, za opterećenja iz 2004. godine, ukoliko su reaktivna opterećenja niža za 200 Mvar po predloženom planu. Međutim, ukoliko se poredi maksimalan režim iz 2006. godine (sa modelovanim opterećenjem od 6 002 MW i 1 723 Mvar) sa režimom u kojem su za TS 110/X kV/kV sa realizovanim smanjenjem reaktivnih opterećenja modelovani faktori snage iz 2004. godine (dakle, sa modelovanim opterećenjem od 6 002 MW i 1 979 Mvar) može se konstatovati da je razlika u gubicima 10,26 MW. To znači da je uz cenu gubitaka vršne snage od 175 €/kW, smanjenje godišnjih troškova gubitaka oko 1,8 miliona evra.

Investicija u kompenzaciju reaktivne snage na niskom naponu kreće se oko 1,1 miliona evra, a aktiviranje baterija kondenzatora od oko 22 Mvar plaćeno je 28 700 evra. Dakle, s gledišta smanjenja gubitaka u prenosnoj mreži kompletna investicija u smanjenje reaktivnog opterećenja u 2005. godini otplatila se za manje od osam meseci. Računajući efekte u distributivnoj mreži, koji su verovatno veći od onih u prenosnoj, dolazi se do zaključka da je vreme otplate kompletne investicije manje od četiri meseca! U elektroenergetskom sistemu Srbije verovatno nikada nije realizovana ovako velika investicija, sa ovako izraženom rentabilnošću.

Značajno su niži i gubici reaktivne snage – za 115,5 Mvar, što znači da je razlika u proizvodnji re-

aktivne snage u elektranama još veća od razlike modelovanih opterećenja.

5. U korelaciji sa smanjenjem gubitaka je i poboljšanje naponskih prilika u mreži 110 kV. Da bi se sa-

gledalo poboljšanje naponskih prilika izvršeno je poređenje, kao i u prethodnoj tački, maksimalnog režima iz 2006. godine sa režimom u kojem su za TS 110/X kV/kV realizovanim smanjenjem reak-

Tabela 3.

Pregled naponskih prilika u TS 110/X kV/kV sa naponima manjim od 108 kV i njihovim napojnim tačkama u nekompenzovanoj mreži i odgovarajućih naponskih prilika u mreži sa realizovanom kompenzacijom

Redni broj	Naziv TS 110/X kV/kV	Napon na sabirnicama 110 kV u nekompenzovanoj mreži (kV)	Napojne tačke 110 kV i naponi na njima (kV)	Napon na sabirnicama 110 kV u nekompenzovanoj mreži (kV)	Napojne tačke 110 kV i naponi na njima (kV)
1.	TS Novi Pazar 2	100,31	TS Kraljevo 3 – 115,72 HE Uvac – 112,04	104,39	TS Kraljevo 3 – 115,84 HE Uvac – 114,38
2.	TS Novi Pazar 1	100,50	TS Kraljevo 3 – 115,72 HE Uvac – 112,04	104,53	TS Kraljevo 3 – 115,72 HE Uvac – 112,04
3.	TS Raška	102,21	Kraljevo 3 – 115,72 HE Uvac – 112,04	106,02	Kraljevo 3 – 115,72 HE Uvac – 112,04
4.	TS Preševo	104,21	HE Vrla 3 – 112,29	104,36	HE Vrla 3 – 112,29
5.	TS Apatin	104,24	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26	104,53	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26
6.	TS Sombor 2	104,39	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26	104,66	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26
7.	TS Stenjevec	104,82	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49	105,66	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49
8.	TS Bela Crkva	105,35	TS Pančevo 2 – 114,48	106,46	TS Pančevo 2 – 114,48
9.	TS Bujanovac	105,36	HE Vrla 3 – 112,29	105,48	HE Vrla 3 – 112,29
10.	TS Sombor 1	105,45	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26	105,68	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26
11.	TS Odžaci	105,79	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26	106,07	TS Srbobran – 113,49 TS Subotica 3 – 112,26
12.	TS Prokuplje	106,07	TS Niš 2 – 113,14 TS Kruševac 1 – 112,49	107,03	TS Niš 2 – 113,14 TS Kruševac 1 – 112,49
13.	TS Kuršumlja	106,16	TS Niš 2 – 113,14 TS Kruševac 1 – 112,49	107,15	TS Niš 2 – 113,14 TS Kruševac 1 – 112,49
14.	TS Vršac 2	106,21	TS Pančevo 2 – 114,48	107,31	TS Pančevo 2 – 114,48
15.	TS Vršac 1	106,29	TS Pančevo 2 – 114,48	107,39	TS Pančevo 2 – 114,48
16.	TS Čuprija	106,44	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49	107,26	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49
17.	TS Novi Popovac	106,45	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49	107,05	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49
18.	TS Paraćin 1	106,47	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49	107,08	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49
19.	TS Paraćin 3	106,57	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49	107,15	TS Kragujevac 2 – 113,84 TE Morava – 113,06, TS Kruševac 1 – 112,49
20.	TS Aleksinac	107,78	TS Niš 2 – 113,14 TS Kruševac 1 – 112,49	108,32	TS Niš 2 – 113,14 TS Kruševac 1 – 112,49
21.	TS Vranje	107,84	HE Vrla 3 – 112,29	107,8	HE Vrla 3 – 112,29

tivnih opterećenja modelovani faktori snage iz 2004. godine. U tabeli 3 izdvojena je 21 TS 110/X kV/kV u kojima je napon na sabirnicama 110 kV u nekompenzovanoj mreži manji od 108 kV.

Za te TS dati su naponi u njihovim napojnim tačkama 110 kV (TS 220/110 kV/kV, TS 400/110 kV/kV ili HE na 110 kV) i pregled naponskih prilika za maksimalni režim iz 2006. godine. Uočava se značajno poboljšanje naponskih prilika na sabirnicama 110 kV u: TS Novi Pazar 1 i 2 i Raška (za oko 4 kV), TS Vršac 1 i 2 i Bela Crkva (za oko 1,1 kV) i TS Kuršumlja i Prokuplje (za oko 1 kV), dok je za ostale TS poboljšanje manje od 1 kV.

6. Pokazalo se da je izbor snaga baterija niskog napona koje će se ugraditi po TS X/0.4 kV/kV pouzdano rešenje. Izabrane snage za ugradnju su bile preliminarno analizirane sa gledišta pojave rezonanci na 5, 7, 11 i 13 harmoniku. Do sada nisu zabeleženi incidenti sa tim baterijama, a može se računati da je kompletan kontingent u pogonu u proseku nešto više od dve godine, što znači da se ima iskustvo od 400 Mvar godina.

Izneti stavovi mogu se sublimirati u zaključak da je smanjenje reaktivnog opterećenja u prenosnoj mreži kroz ugradnju kondenzatorskih baterija na niskom naponu bio izuzetno ekonomičan projekat, koji se već otplatio i doneo je pozitivne efekte u pogledu poboljšanja naponskih prilika i oslobađanja prenosnih kapaciteta u prenosnoj i distributivnim mrežama. Po realizaciji ovog projekta nisu se značajnije ispoljili negativni efekti ugradnje kondenzatorskih baterija u pogledu harmonijskog izobličenja struje koja bi ugrozila pre svega same baterije i u pogledu slabljenja i izobličenja MTK signala. Konačno, imajući u vidu uočene promene faktora snage i porasta opterećenja kod TS 110/X kV/kV ne očekuju se problemi sa gledišta viška reaktivne snage i prenapona u prenosnoj mreži koji se ne bi mogli sanirati dispečerskim akcijama.

## 5.2. Realizacija daljeg smanjenja reaktivnih opterećenja

Visoka rentabilnost realizacije kompenzacije u iznosu od 200 Mvar inicirala je dalji rad na ovoj problematici. Na bazi zaključaka koji su prezentovani u prethodnom odeljku doneta je odluka o daljem smanjenju reaktivnog opterećenja u prenosnoj mreži Srbije koje bi se realizovalo kompenzacijom na niskom naponu u iznosu od 170 Mvar i na srednjem naponu u iznosu od 30 Mvar. Posledice realizacije ove kompenzacije bile su predmet novog istraživanja [10].

Predlog TS 110/X kV/kV u kojima bi se realizovalo smanjenje reaktivnog opterećenja kroz kompenzaciju na niskom naponu formiran je na bazi iste metodologije koja je prikazana u ovom radu. Efekti smanjenja reaktivnog opterećenja u prenosnoj mreži Srbije kompenzacijom na niskom naponu za zadatih 170 Mvar, utvrđeni na bazi detaljno sprovedenih tehno-ekonomskih analiza su i dalje veliki. Pokazuje se da bi se gubici u prenosnoj mreži smanjili za 6,2 MW u analiziranom reprezentativnom maksimalnom režimu, a kompletan kapital uložen u kompenzaciju reaktivne snage na niskom naponu, posredstvom koje bi se smanjilo reaktivno opterećenje, bi se vratio za godinu dana samo s gledišta smanjenja gubitaka u prenosnoj mreži Srbije.

Analiza kompenzacije na srednjem naponu (u TS 35/X kV/kV) je složenija jer je zahtevala analize tokova snaga u distributivnim mrežama u maksimalnim i minimalnim režimima i detaljne analize da li predložena kompenzacija na srednjem naponu zadovoljava s gledišta tehničkih ograničenja u pogledu prostora za smeštaj priključne ćelije X kV u TS 35/X kV/kV i s gledišta harmonijske distorzije struje kroz kondenzatore pri pojavi maksimalne distorzije napona bilo na sabirnicama napojne TS 110/35 kV/kV, bilo na sabirnicama X kV gde se planira priključak kondenzatora. Kao najpovoljnije rešenje u pogledu zadovoljenja tehničkih ograničenja uz relativno nisku cenu kompenzacije pokazala se ugradnja baterija kod kojih bi se javila rezonanca na 9. harmoniku, koju, međutim, sprečava sprega  $\Delta$  transformatora 35/X kV/kV.

Ekonomski efekti smanjenja reaktivnog opterećenja kroz kompenzaciju na srednjem naponu u ukupnom iznosu od 30 Mvar su nešto manji. Naime, ova kompenzacija u proseku košta nešto manje od 28 000 €/Mvar zajedno sa priključnom opremom, dakle, 4,3 puta više od kompenzacije na niskom naponu, a TS 35/X kV/kV u kojima se ona planira nisu uvek na najpovoljnijem mestu sa gledišta efekata u prenosnoj mreži. Stopa rentabilnosti ukupno planiranih oko 857 000 evra za kompenzaciju na srednjem naponu je oko 31 % računajući i očekivano smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži.

Smanjenje reaktivnog opterećenja na predloženi način i dalje ne ugrožava normalno funkcionisanje mreže u minimalnom režimu s gledišta eventualnih prenapona, pri čemu se višak reaktivne snage u minimalnom režimu rešava ulaskom generatora u potpobudu (što je uobičajeno u vođenju mreže u letnjim uslovima), ili isključenjem nekih vodova, a da se pri tome ne naruši usvojeni princip sigurnosti.

## 6. ZAKLJUČCI

U radu su izneti motivi koji su usloveli akcije na smanjenju reaktivnog opterećenja prenosne mreže Srbije. Na bazi razvijene indeksne iterativne metode, koristeći se podacima o funkcionisanju mreže u maksimalnom i minimalnom stanju 2004. godine predložena je lista TS 110/X kV/kV po kojima treba redukovati reaktivno opterećenje u ukupnom iznosu 200 Mvar. Lista je formirana uvažavajući uobičajena tehnička ograničenja za funkcionisanje prenosne mreže i ograničenja tehničko-organizacione prirode u pogledu realizacije kompenzacije na niskom naponu u iznosu od 200 Mvar u što kraćem roku. Na osnovu ove liste realizovana je kompenzacija na niskom naponu u toku 2005. godine.

Analiza pokazuje niz efekata kompenzacije: povećanje aktivnih opterećenja zbog poboljšanja naponskih prilika, bolje iskorišćenje instaliranih kapaciteta elemenata mreže, smanjenje gubitaka aktivne snage u prenosnoj mreži Srbije za oko 10 MW u maksimalnom režimu (stopa rentabilnosti rešenja samo sa gledišta efekata u prenosnoj mreži je ~170 %!), poboljšanje napona u prenosnoj mreži, pouzdanost izabranih snaga baterija za kompenzaciju na niskom naponu itd.

Imajući u vidu realizovane efekte ušlo se u novi ciklus smanjenja reaktivnih opterećenja od čega je planirano oko 170 Mvar kompenzacije na niskom i 30 Mvar na srednjem naponu. Očekivani efekti ovih mera su takođe veliki: očekivana stopa rentabilnosti za kompenzaciju na niskom naponu sa gledišta efekata u prenosnoj mreži je ~100 %, a za kompenzaciju na srednjem naponu imajući u vidu efekte u prenosnoj i distributivnoj mreži ~30 %.

## 7. LITERATURA

- [1] IZBOR NAČINA SMANJENJA REAKTIVNOG OPTEREĆENJA U ELEKTRODISTRIBUTIVNOJ MREŽI ZA 200 Mvar, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, 2005.
- [2] POBOLJŠANJE KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE U EES EPS-a POVEĆANJEM KORIŠĆENJA POSTOJEĆIH KONDENZATORSKIH BATERIJA (III faza – područja ED Kragujevac, ED Požarevac, ED Užice i ED Zaječar), Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, 2005.
- [3] Zhang W., Tolbert L.M., SURVEY OF REACTIVE POWER PLANNING METHODS, Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 12-16, 2005, San Francisco
- [4] M. Negnevitsky, R. L. Le, M. Piekutowsky, 1998, VOLTAGE COLLAPSE: CASE STUDIES, Power Quality, pp. 7-12.
- [5] P. R. Gribik, D. Shirmohammadi, S. Hao, C. L. Thomas, 1990, OPTIMAL POWER FLOW SENSITIVITY ANALYSIS, IEEE Trans. on PAS, vol. 5, no. 3, pp. 969-976.
- [6] V. Ajjarapu, P. L. Lau, S. Battula, 1994, AN OPTIMAL REACTIVE POWER PLANNING STRATEGY AGAINST VOLTAGE COLLAPSE, IEEE Trans. on PAS, vol. 9, no. 2, pp. 906-917.
- [7] W. M. Refaey, A. A. Ghandakly, M. Azzoz, I. Khalifa, O. Abdalla, A SYSTEMATIC SENSITIVITY APPROACH FOR OPTIMAL REACTIVE POWER PLANNING, North American Power Symposium, 15-16 Oct. 1990, 283-292.
- [8] Chattopadhyay, K. Bhattacharya, J. Parikh, 1995, OPTIMAL REACTIVE POWER PLANNING AND ITS SPOT-PRICING: AN INTEGRATED APPROACH, IEEE Trans. On PAS, vol. 10, no. 4, pp. 2014-2020.
- [9] J. A. Momoh, J. Zhu, A NEW APPROACH TO VAR PRICING AND CONTROL IN THE COMPETITIVE ENVIRONMENT, Hawaii International Conference on System Sciences, 6-9 Jan. 1998, vol. 3, 104-111.
- [10] IZBOR OPTIMALNOG NAČINA SMANJENJA REAKTIVNOG OPTEREĆENJA S GLEDIŠTA PRENOSNE MREŽE PO TS 110/X kV/kV U MREŽI EPS-a i EMS-a, U UKUPNOM IZNOSU OD DODATNIH 200 Mvar, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, 2006.

Rad je primljen u uredništvo 19. 01. 2007. godine



**Saša Minić** je rođen 1971. godine. Diplomirao 1994. godine. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer elektroenergetski sistemi. Od 1994. godine zaposlen u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla” u Beogradu. Bavi se analizom rada i planiranjem razvoja prenosnih i distributivnih električnih mreža. Rukovodio izradom većeg broja studija razvoja mreža.



**Tijana Janjić** je rođena 1980. godine u Loznici. Diplomirala je 2004. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, smer za Elektroenergetske sisteme. Radi kao saradnik u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Centru za elektroenergetske sisteme.



**Miloje M. Kostić** je rođen 1950. godine u Bioski gde je završio i osnovnu školu. Srednju elektrotehničku školu je završio 1969. godine u Užicu. U Beogradu je na Elektrotehničkom fakultetu diplomirao 1974. godine, a magistrirao 1983. godine. Doktorirao je 1990. godine na Tehničkom fakultetu u Čačku.

U preduzeću „Prvi partizan” u Užicu je radio od 1974-1991. godine, kada prelazi u Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” u Beogradu, gde radi i sada. Ostvario je značajne rezultate u oblastima (1) Racionalnog korišćenja električne energije u industriji, (2) Elektroenergetike, (3) Energetike motornog pogona i (4) Električnih mašina.

Do sada je objavio 3 knjige, od kojih 2 monografije autora, i 95 radova - 42 u nacionalnim i međunarodnim časopisima i 53 rada u zbornicima domaćih i internacionalnih konferencija. Autor je više primenjenih originalnih tehničkih rešenja i patenata.



**Milan Ivanović** je rođen 13. 5. 1978. godine u Boru. Završio je Elektrotehnički fakultet u Beogradu 2004. godine. Upisao je postdiplomske studije 2004. godine. Zaposlen je u Elektrotehničkom institutu Nikola Tesla od 2005. godine. Sarađivao je na realizaciji više studija i projekata.



**Branislav Čupić** je rođen 31. 1. 1975. godine u Zadru. Završio je Elektrotehnički fakultet u Beogradu (smer Elektroenergetski sistemi) 2000. godine. Godine 2004. upisao je postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 2001. godine stalno je zaposlen na Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”. Sarađivao je na izradi više studija razvoja elektrodistributivnih mreža.



**Maja Marković** je rođena 1980. godine. Diplomirala je 2006. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu, na smeru za Industrijsku energetiku. Po diplomiranju se zaposlila u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Beogradu.



# Rekonfiguracija simetričnih radijalnih distributivnih mreža u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage

Stručni rad  
UDK: 621.3.05; 621.016.24

---

## Rezime:

Rekonfiguracija distributivnih mreža se ostvaruje promenom statusa uključenosti rastavljača i obično se radi iz dva razloga – smanjenja gubitaka aktivne snage i radi simetriranja opterećenja. U ovom radu data je generalna formulacija i metode rešavanja za prvi problem. U postupku rekonfiguracije radi smanjenja gubitaka uključeno je pretraživanje odgovarajućih relevantnih radijalnih konfiguracija. Kao ispomoć pretraživanju razvijene su dve aproksimativne metode analize tokova snaga različitih stepena tačnosti. Razvijeni fortranski programi su vrlo efikasni i brzi ali mogu poslužiti samo indikativno za procenu gubitaka zbog nedovoljne tačnosti metoda. Potrebno je uvek na kraju jedne iteracije sprovesti tačan algoritam analize tokova snaga da bi se tačno videlo gde se nalazimo u pogledu gubitaka snage. Na kraju je naveden i primer koji je računarski obraden i na kome je prikazana primenljivost ove dve aproksimativne metode. Mada samo indikativne, razvijene metode iznalaze globalni optimum što je prikazano kroz numerički primer. Vremensko trajanje primenjenih metoda je u potpunosti zavisno od brzine priprema ulaznih datoteka sa podacima o konfiguraciji mreže koja se analizira i čini metode za sada atraktivnim jedino u fazi planiranja kada trajanje postupka nije od primarnog značaja.

**Ključne reči:** konfiguracija mreže, rastavljači, gubitak aktivne snage, algoritam tokova snage, faza planiranja

---

## Abstract:

### NETWORK RECONFIGURATION IN BALANCED DISTRIBUTION SYSTEMS FOR ACTIVE POWER LOSS REDUCTION

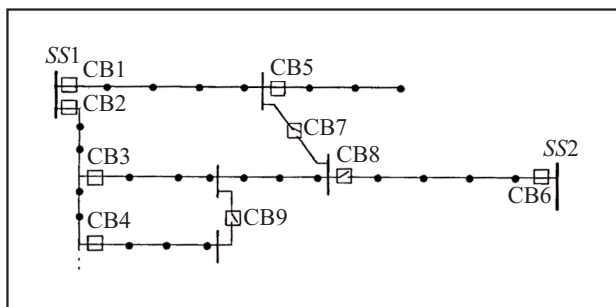
Network reconfiguration is done by changing status of switches, mainly for two reasons, active power loss reduction and load balancing. In this article general formulation and solving method for active power loss reduction are given. Searching of relevant radial configurations is used in this problem. To aid the search, two approximate power flow methods with varying degree of accuracy have been developed. Applied fortran programs are very efficient and fast but can be used only as indication for loss estimation because of insufficient method accuracy. At the end of each iteration it is necessary to run efficient power flow algorithm to determine the real situation concerning loss reduction. Numerical example is given at the end of the work which indicates the possibility of application of these two approximative methods. Though only indicative, developed methods converge to the global optimum which is given in numerical example. The time duration of used methods depends thoroughly on fast manipulation of incoming data files which give necessary information of network configuration in concern. This flow makes methods interesting for the time being only in planning stage when process duration is not of primary importance.

**Key words:** network configuration, switches, active power loss, power flow algorithm, planning stage

---

## 1. UVOD

U radijalnim distributivnim mrežama sekcioni rastavljači se koriste radi zaštite, da bi izolovali kvar, a i da bi se njihovom primenom rekonfigurirala mreža. Na slici 1 dat je šematski prikaz dela distributivne mreže sa ugrađenim sekcionim rastavljačima. Podebljanim tačkama označena su mesta gde su priključeni potrošači. Na slici razlikujemo dva tipa rastavljača: normalno zatvoreni rastavljači koji povezuju sekcije vodova (CB1-CB6), i normalno otvoreni rastavljači koji povezuju dva primarna voda (CB7), ili dve trafo-stanice (CB8) ili bočne grane vodova koje čine petlju (CB9).



Slika 1. Šematski prikaz distributivnog sistema

Distributivni sistemi su obično radijalni; međutim konfiguracija im se menja tokom rada promenom stanja uključenosti sekcionih rastavljača. Na primer, na slici 1, rastavljači CB7 i CB8 mogu biti zatvoreni a CB3 i CB6 mogu biti otvoreni da bi se prenelo opterećenje sa jednog voda na drugi.

Prve radove vezane za rekonfiguraciju radi smanjenja gubitaka napisali su Baran i Vu (Wu) [1], Širmohamadi (Shirmohammad) i Hong [4]. U [4] se polazi od mreže u kojoj su zatvoreni svi rastavljači a zatim se oni sukcesivno otvaraju da bi se eliminisale petlje. Izbor rastavljača koji će se otvoriti dolazi tek posle primene modela optimalnog toka (optimal flow pattern). Broj rastavljača koji se uključuju i isključuju je mnogo manji od broja grana mreže.

Metoda „simulacije kaljenja” prvi put je primenjena za rešavanje problema rekonfiguracije mreže radi smanjenja gubitaka u radovima H. D. Čianga (Chiang) i R. J. Džumea (Jumeau) [5,6]. Rekonfiguracija mreže je predstavljena kao problem kombinatorijske optimizacije sa ograničenjima, koji nije diferencijabilan i sa višestrukim funkcijom cilja.

D. Jiang i R. Baldik (Baldick) takođe primenjuju metodu „simulacije kaljenja” za rešavanje rekonfiguracije. „Simulacija kaljenja” da bi se optimizirali statusi rastavljača a diskretni optimizacioni algoritam da bi se optimizirale kondenzatorske baterije koje se koriste u mreži.

C. T. Su i C. S. Li (Lee) [8] koriste isključivo metodu „simulacije kaljenja” za rešavanje ova dva problema (rekonfiguraciju mreže i kompenzaciju).

U [9] je primenjena metoda „simulacije kaljenja” sa sofisticiranim pristupom (posebno definisanim mehanizmom hlađenja i mehanizmom poremećaja) za rešavanje problema rekonfiguracije mreže u distributivnim sistemima velikih razmera. Y. J. Džin (Jean) i J. C. Kim [9] u [10] koriste kombinovanu metodu „simulacije kaljenja” i „tabu” pretraživanja za minimalizaciju gubitaka u distributivnim sistemima. U [8,9,10] koristi se „dvostruko spregnuta struktura liste podataka” za predstavljanje ulaznih programskih podataka distributivnog sistema čime se trajanje programa drastično smanjuje.

„Tabu” pretraživanje se koristi i u [11]. U ovoj referenci C. A. Kastro (Castro) i M. A. N. Guimaraes koriste novu definiciju strukture „komšiluka” rešenja da bi izbegli pretraživanje prevelikog broja konfiguracija.

Restauracija razgranatih radijalnih distributivnih mreža u trenucima kada nastaju kvarovi kao poseban vid rekonfiguracije razmatra se u [12] i [13].

Autori u [14] koriste algoritam pretraživanja zasnovan na koncepciji mravlje kolonije u svrhu rekonfiguracije mreže radi smanjenja gubitaka.

Fazi mutirani genetski algoritam koristi se za rešavanje problema optimalne rekonfiguracije u vidu diskretne višestruke optimizacije [15]. Jedan od glavnih problema sa kojim se autori sreću je zadržavanje radijalne konfiguracije mreže a da pri tome svi potrošači budu napajani.

Određivanje konfiguracije mreže formulirano je kao fazi genetički algoritam sa višestrukim funkcijom cilja koji uzima u obzir kako normalno stanje tako i kvarove u [16].

Metoda razvijena u C++ kompjuterskom jeziku od strane grupe brazilskih autora koja polazi od stanja kada su svi rastavljači zatvoreni a onda se sukcesivno otvaraju prema određenom pravilu prikazana je u [17].

Sušтина predložene metode u [18] je najbolje-prvo pretraživanje radi ustanovljenja stanja svih rastavljača u kombinaciji sa standardnom Njutnovom (Newton) metodom drugog izvoda radi izračunavanja struja grana.

Fazi prilaz rekonfiguraciji mreže sa četvorostrukim funkcijom cilja (simetriranje opterećenja, minimizacija gubitaka, minimizacija odstupanja napona čvorova, ograničenje struja grana) dat je u [19].

U svim iznetim referencama koristi se komplikovani računarski softver koji nije priložen i koji je primenljiv na vrlo brzim računarima (Pentium-IV) naročito u skorijim referencama.

U ovome članku razmatra se problem rekonfiguracije mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne

snage. Koristi se pristup Barana i Vua (Wu) [1]. Prikazane su dve metode različite tačnosti za aproksimaciju tokova snaga nakon transfera opterećenja između dve trafo stanice, dva napojna voda ili dve bočne grane. Metode koriste i novi skup jednačina protoka snage koji je razvijen za radijalne distributivne mreže i koji je upotrebljen u problemu kompenzacije reaktivne snage rešavanom metodom „simulacije kaljenja” [3]. Korišćene aproksimativne metode tokova snaga služe da bi se odredilo smanjenje gubitaka aktivne snage. Kako su tokovi reaktivnih snaga eksplicitno uključeni u jednačine, algoritmi se mogu podjednako koristiti i u nedovoljno kompenzovanim mrežama.

Prikazani su primenjeni programi koji su vrlo jednostavni i ne zahtevaju veliku brzinu procesora, primenjivani su na Pentium-I računaru. Oni omogućavaju potpunu sledljivost dobijenih rezultata i njihovu proveru od svakog stručnog zainteresovanog čitaoca.

Spor, ali tačan, algoritam, to jest detaljno pretraživanje (exhaustive search) je krajnje nepodesno jer u našem primeru broj konfiguracija koje treba

pretražiti je reda  $\binom{37}{5}$  što iznosi 435 897 dok je broj mogućih stanja mreže za isti primer reda  $2^{37}$  koja, moramo reći, ipak sva ne treba pretražiti (samo ona koja rezultuju u konektivnoj i radijalnoj mreži).

Sam članak je osmišljen na sledeći način. U sledećem odeljku je prikazana uopštena formulacija problema a uopšteni algoritam pretraživanja je dat u odeljku 3. U odeljku 4 predložene su metode procene smanjenja gubitaka aktivne snage. Predložene metode su programirane i testirane, a rezultati su dati u odeljku 5. Zaključci su izneti u odeljku 6.

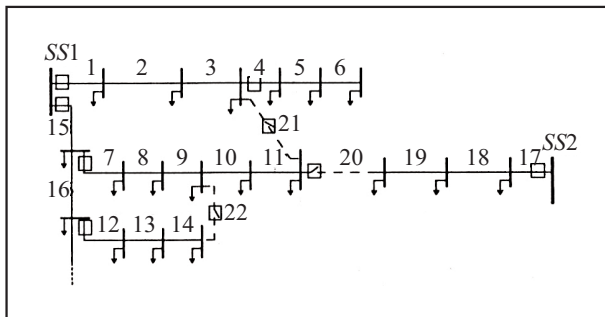
## 2. FORMULACIJA PROBLEMA

U ovom odeljku formulisan je problem rekonfiguracije mreže radi smanjenja gubitaka aktivne snage.

### 2. 1. Iskazivanje problema

Da bi se uprostila predstava, posmatraćemo mrežu kroz jednopolnu šemu a potrošnju kao konstantna opterećenja u sabirnicama mreže. Pretpostavka je da se svaka grana mreže može uključiti i isključiti pomoću njoj pridruženog rastavljača. Na primer pretpostavlja se da se mreža sa slike 1 može prikazati jednopolnom šemom sa slike 2. Na slici, neprekidne linije predstavljaju vodove koji su pod naponom i koji čine osnovnu radijalnu konfiguraci-

ju. Isprekidane linije (grane 20, 21, 22) predstavljaju vodove čiji su rastavljači otvoreni.



Slika 2. Jednopolna šema distributivnog sistema

Osnovna mreža može biti rekonfigurisana kada se prvo zatvori otvorena grana, recimo grana 21 na slici. S obzirom da se zatvaranjem pravi petlja u mreži, (sačinjena od grana 1, 2, 3, 21, 11, 10, 9, 8, 7 i 15) neku granu iz ove petlje treba otvoriti, recimo granu 7, da bi se ponovo uspostavila radijalna struktura mreže. Kao posledica ove komutacije, potrošači između grana 7-11 se prevezuju sa jednog voda na drugi. Koristićemo istu terminologiju kao u [1] i nazvati ovu osnovnu operaciju *zamenom grana* i to između grana 21 i 7. U principu, kako je predstavljeno u uvodu, kompleksnije komutacije su moguće; ovakvi slučajevi se ostvaruju sukcesivnim sprovođenjem zamena grana.

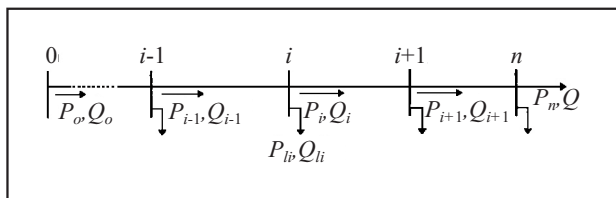
Transfer opterećenja između različitih trafo stanica se takođe može ostvariti komutacijama tipa zamene grana. U ovom slučaju, čvorovi gde se priključuju trafo stanice (čvorovi SS1 i SS2 sa slike) se mogu predstaviti kao opšti čvor mada se ne radi samo o jednom čvoru. Metode predložene u članku mogu da se upotrebe u oba slučaja što je njihova bitna karakteristika.

Da bi se problem rekonfiguracije mreže radi smanjenja gubitaka shvatio kao optimizacioni, treba uočiti da radijalna konfiguracija odgovara „razgranatom stablu” kao graf kojim se predstavlja topologija mreže. Tako se dolazi do takozvanog problema *minimalno razgranatog stabla* što se može interpretirati na sledeći način. Dat je graf, pronaći takvo razgranato stablo da se minimizira funkcija cilja, s tim da treba uz sve to ispoštovati sledeća ograničenja: (i) naponska ograničenja, (ii) ograničenja kapaciteta vodova/transformatora, (iii) ograničenja pouzdanosti.

Ovo je problem kombinatorijske optimizacije s obzirom da se pri rešavanju razmatraju sva moguća razgranata stabla.

## 2. 2. Jednačine tokova snaga

Da bismo sračunali vrednosti u optimizacionom problemu definisanom u prethodnom odeljku korišćićemo skup jednačina tokova snaga koji je strukturno bogat i pogodan za kompjuterski efikasne šeme rešavanja [2,3]. Da bismo ih ilustrovali, zamislićemo radijalnu mrežu sa slike 3.



Slika 3. Jednopolna šema radijalne mreže

Vodovi će biti predstavljeni impedansama  $z_l = r_l + jx_l$ , a potrošnja će biti modelovana modelom konstantne snage  $S_L = P_L + jQ_L$ .

Tok snage u radijalnoj distributivnoj mreži može se prikazati skupom rekurzivnih jednačina, nazvanim *DistFlow jednačine grana*, koje koriste aktivnu snagu, reaktivnu snagu i veličine napona na početku grane –  $P_i, Q_i, V_i$  respektivno, da bi se izrazile iste promenljive na kraju grane i to kao što sledi:

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \quad (1.i)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \quad (1.ii)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1.iii)$$

Tako, ako su veličine  $P_0, Q_0, V_0$  u prvome čvoru mreže poznate ili procenjene, onda iste veličine u drugim čvorovima mogu da se sračunaju sukcesivnom primenom gore navedenih jednačina. Ovaj postupak nazvaćemo *zamenom unapred*.

DistFlow jednačine grana mogu se pisati i pri zameni unazad, to jest korišćenjem aktivne snage, reaktivne snage i efektivne vrednosti napona na kraju grane,  $P_i, Q_i, V_i$  da bi se izrazile iste veličine na početku grane. Rezultat su sledeće rekurzivne formule, nazvane *jednačine grana zamene unazad*.

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} + P_{Li} \quad (2.i)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} + Q_{Li} \quad (2.ii)$$

$$V_{i-1}^2 = V_i^2 + 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.iii)$$

gde su  $P'_i = P_i + P_{Li}$ ,  $Q'_i = Q_i + Q_{Li}$ .

Slično kao zamena unapred, *zamena unazad* se može definisati na sledeći način: početi sa ažuriranjem od poslednjeg čvora mreže pretpostavivši veličine  $P_n, Q_n, V_n$  u toj tački za zadate veličine i nastaviti zamenom unazad, sračunavajući iste veličine u drugim čvorovima sukcesivnom primenom jednačina (2). Proces ažuriranja se završava sa prvim čvorom (nulti čvor) i njime se dobijaju nove ažurirane injektirane snage u mrežu,  $P_0, Q_0$ .

Primetićete da primenom zamene unazad i unapred, sukcesivno pri ažuriranju, moguće je dobiti rešenje tokova snaga kako je to objašnjeno u [3]. Kako se pri rekonfiguraciji javljaju i konfiguracije sa ograncima pored bočnih grana, to je za takve strukture potrebno primeniti drugi efikasni algoritam analize tokova snaga iz [2].

## 2. 3. Sračunavanje funkcije cilja

Kada se raspolože modelom mreže, moguće je sada izraziti gubitke snage u sistemu u funkciji varijabli sistema.

Za smanjenje gubitaka, cilj je minimizirati ukupne  $r^2$  gubitke u sistemu koji se mogu sračunati na sledeći način.

$$LP = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad r.j. \quad (3)$$

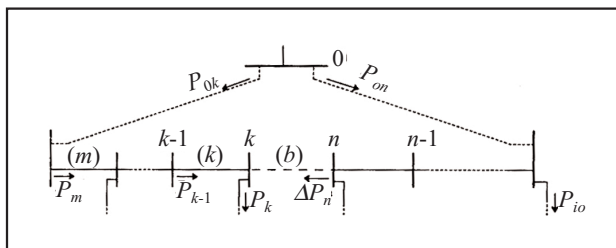
Ovo je funkcija cilja  $c_p$  za rekonfiguraciju mreže radi smanjenja gubitaka.

## 3. PRETRAŽIVANJE POMOĆU ZAMENE GRANA

Problemi rekonfiguracije distributivnih mreža su formulisani kao kombinatorijski, nelinearni optimizacioni problemi, što je urađeno u prethodnom odeljku. Pri rešavanju, potrebno je izabrati između svih mogućih stabala najpodobnije (jedno čija radna tačka zadovoljava ograničenja i minimizira funkciju cilja). Svakako da pretraživanje svih mogućih razgranatih stabala daje rešenje, ali je ono računarski praktično nemoguće s obzirom da, s jedne strane, broj mogućih razgranatih stabala generisanih zamenom grana jeste prevelik za praktične probleme, i

drugo, za svako posebno stablo potrebno je puštanje efikasnog algoritma protoka snaga sa njemu svojstvenim ulaznim podacima koji predstavljaju podatke o sistemu i koje prati i dodatni gubitak vremena na prenumeraciju čvorova. Zato treba razviti posebnu efikasnu šemu pretraživanja. U ovom odeljku predstavljen je jednostavan sistematični heuristični metod rešavanja radi pretraživanja podobnih razgranatih stabala korišćenjem zamena grana.

Kao što je predstavljeno u prethodnom odeljku, zamene grana se mogu upotrebiti da bi se generisala relevantna razgranata stabla od polaznog stabla. U globalu, za dato razgranato stablo  $T_0$  pridružuje se petlja svakoj otvorenoj grani mreže posmatranjem kao da je grana zatvorena. Slika 4 pokazuje takvu petlju kojoj je pridružena otvorena grana  $b$ . Zamena grana kreira novo stablo zatvaranjem otvorene grane (grane  $b$  na slici) i otvaranjem zatvorene grane u petlji (recimo grane  $m$  sa slike).



Slika 4. Petlja pridružena otvorenoj grani  $b$

Osnovna ideja šeme pretraživanja koja koristi zamenu grana je da se počne sa (podobnim) stablom, a zatim kreiraju nova, sukcesivno, sprovedenjem jedne zamene grana u određeno vreme. Na svakom nivou bira se najbolja zamena grana (ona koja popravlja najviše funkciju cilja bez narušavanja ograničenja) između svih mogućih stabala (dece) koja se mogu generisati od polaznog razgranatog stabla (roditelja) pomoću zamena grana. Metoda se može opisati kao algoritam sa sledećim koracima.

**Korak 1:** Dato je polazno stablo  $T_0$  (roditelj), primeni algoritam tokova snaga da bi odredio radnu tačku.

**Korak 2:** Ispitaj svu decu roditelja kao što sledi:

Za otvorenu granu  $b$

– nađi novo kandidat stablo,  $T$

– indentifikujući petlju

– odluči koju granu  $m$  otvoriti

– za kandidat stablo  $T$

– izračunati smanjenje funkcije cilja,  $\Delta c_{bm}$

**Korak 3:** Sortiraj decu (pregledana stabla)

korišćenjem  $\Delta c_{bm}$

**Korak 4:** Nađi drvo  $T^*$  za koje je najveće smanjenje gubitaka i koje zadovoljava nametnuta ograničenja.

**Korak 5:** Ako postoji takvo  $T^*$ ,

Tada izaberi  $T^*$  za  $T_0$  i vrati se na korak 1; inače terminiraj algoritam.

U vezi pretraživanja primećujemo sledeće.

- Pretraživanjem se ne pregledaju sva moguća stabla. Rešenje na putu do globalnog optimuma nekada izgeneriše i lokalne optimume, dešava se da za uštedu dobijemo pozitivnu vrednost, dok stvarni algoritam protoka snaga pokaže da je ona negativna.
- Računarska efikasnost ovog algoritma zavisi od dve stvari; izbora grane  $m$  koju treba otvoriti jer to utiče na broj pretraživanja koji treba izvršiti, kao što i pri svakom nivou pretraživanja (kada se izabere najbolje rešenje za taj nivo) treba sprovesti tačan algoritam tokova snaga koji zahteva detaljnu bazu ulaznih podataka čime se najviše troši vreme. Iako smo usvojili efikasni algoritam tokova snaga koji se koristi, najbolje je ne upotrebljavati ga kada za to nema nužne potrebe jer je očigledno da je on vremenski najzahtevniji.
- Pretraživanje predloženim algoritmom povlači za sobom greške jer je on samo približan, pa bi se pravo pretraživanje pomoću efikasnog algoritma protoka snaga razlikovalo od onoga koje smo sproveli.

U sledećem odeljku prikazana su dva različita približna algoritma različitog stepena tačnosti za računanje gubitaka u mreži.

#### 4. APROKSIMATIVNI ALGORITMI TOKOVA SNAGA ZA PROCENU GUBITAKA

##### 4. 1. Algoritam 1:

##### Uprošćeni DistFlow algoritam

*Procena tokova snaga*

DistFlow jednačine grana moguće je uprostiti zanemarivanjem člana koji predstavlja gubitke snage u samim granama koji su mnogo manji od snaga koje se injektiraju na početku i na kraju grane. Tako se dolazi do sledećeg skupa jednačina.

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} \quad (5.i)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} \quad (5.ii)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (5.iii)$$

S obzirom da je mreža radijalna, lako se dobija rešenje ovih jednačina. Za mrežu koja je prikazana na slici 3 rešenje ima sledeću formu:

$$P_{i+1} = \sum_{k=i+2}^n P_{Lk} \quad (6.i)$$

$$Q_{i+1} = \sum_{k=i+2}^n Q_{Lk} \quad (6.ii)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (6.iii)$$

Ove jednačine se zovu *uprošćene DistFlow jednačine* i njih ćemo koristiti u ovom odeljku za rešavanje tokova snaga za određenu konfiguraciju iz tekućeg nivoa pretraživanja.

Gubitak snage određene grane moguće je onda izračunati na osnovu sledećeg obrasca.

$$LP_i = r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \approx r_i (P_i^2 + Q_i^2) \text{ r.j.} \quad (7)$$

Ukupni gubitak snage za celu mrežu može se onda dobiti kao suma gubitaka po svim granama, t.j.,

$$LP = \sum_{i=0}^{n-1} r_i (P_i^2 + Q_i^2) \text{ r.j.} \quad (8)$$

#### Procena smanjenja gubitaka snage zbog zamene grana

Pretpostavimo zamenu grana između grane  $b$  (otvorenu na početku) i grane  $m$  (zatvorenu na početku) sa slike 4. Kao posledica gore navedenih uprošćenja, tokovi snage će se promeniti samo u granama koje sačinjavaju petlju pokazanu na slici. Predstavimo čvorove leve grane petlje (od 0-og do  $k$ -og) skupom  $L$ , a čvorove desne grane petlje (od 0-og do  $n$ -og) skupom  $R$ , 0 je početni čvor petlje. Tada je kao što je pokazano u [1] moguće izračunati smanjenje gubitaka zbog ove zamene grana iz sledećeg obrasca:

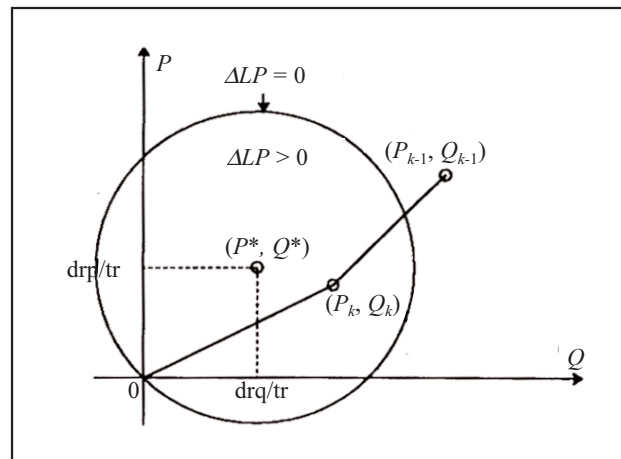
$$\begin{aligned} \Delta LP_{bm} = & 2P_m \cdot \\ & \cdot (\sum_{l \in L} r_l P_l - \sum_{l \in R} r_l P_l) + 2Q_m (\sum_{l \in L} r_l Q_l - \sum_{l \in R} r_l Q_l) \\ & - (P_m^2 + Q_m^2) [\sum_{l \in R \cup L} r_l] \end{aligned} \quad (9)$$

Ovu jednačinu je moguće preurediti i prikazati na sledeći način:

$$\Delta LP_{bm}(P_m, Q_m) = 2drp \cdot P_m + 2drq \cdot Q_m - tr \cdot (P_m^2 + Q_m^2) \quad (10)$$

u kojoj su koeficijenti  $drp$ ,  $drq$ ,  $tr$  nezavisni od posmatrane grane  $m$  i mogu se sračunati na osnovu po-

laznih veličina  $P_l$ ,  $Q_l$ . Zavisnost data jednačinom (10) predstavljena je na slici 5, pretpostavljajući da su  $P$  i  $Q$  kontinualne promenljive. Na slici, krug definisan jednačom  $\Delta LP_b = 0$  deli  $P$ - $Q$  ravan na dva dela, tako da je za svaku tačku unutar kruga  $\Delta LP_b(P, Q) > 0$  (smanjenje gubitaka pozitivno, t.j. gubici se smanjuju) a za svaku tačku izvan kruga  $\Delta LP_b(P, Q) < 0$  (smanjenje gubitaka negativno, t.j. gubici se povećavaju).



Slika 5. Smanjenje gubitaka kao funkcija transfera snage

Svojsvo jednačine (10) se može iskoristiti da se ne proverava svaka grana petlje pri primeni zamene grana. Pretpostavimo na početku zamenu grana između grana  $b$  i  $k$  sa slike 4 i nazovimo ga *nominalnom zamenom grana*. Odgovarajući transfer snage će biti  $P_k$ ,  $Q_k$  i neka ova tačka  $(P_k, Q_k)$  bude unutar kruga sa slike 5. Tada će tačke koje odgovaraju drugim zamenama grana (kao  $P_{k-1}$ ,  $Q_{k-1}$  na slici) biti udaljenije od polazne tačke  $(P_k, Q_k)$  s obzirom da je  $P_{k-1} > P_k$  i  $Q_{k-1} > Q_k$ . Na osnovu ovoga zaključuje se sledeće.

- Ako je  $\Delta LP_{bk} < 0$ , tada je i  $\Delta LP_{bl} < 0 \quad l \in L$  pa stoga ne postoji ni jedna grana u  $L$  koja može dati bolje rešenje u zameni grana.
- Ako je  $\Delta LP_{bk} > 0$ , tada postoji grana u  $L$  koja može biti kandidat za zamenu grana (može dati bolje rešenje) i grana koju treba otvoriti treba da bude ona za koju je najmanji gubitak snage. Ona se može dobiti polaskom od grane  $k$  proverom grana zamenom unazad iz  $L$  sve dok se ne dobije maksimalno smanjenje gubitaka snage.

Komentari u vezi primene metode su sledeći:

- Ova metoda je računarski efikasna. Potrebne su samo proste operacije da bi se sračunalo smanjenje gubitaka snage i indentifikovale odgovarajuće grane.

- Okvirne granice greške u kojima se kreću vrednosti dobijene ovim algoritmom izvedene su u referenci [1].
- U slučaju velikog smanjenja gubitaka u mreži analiza greške iz [1] pokazuje da će stvarno smanjenje gubitaka biti još veće od kalkulisanog. Takođe, kada je kalkulirano smanjenje gubitaka mnogo manje od nule, stvarno smanjenje će biti još negativnije. Ali, u slučaju malih vrednosti smanjenja gubitaka, analiza greške pokazuje da, kada je stvarno smanjenje gubitaka pozitivno (gubici se smanjili), iskalkulirano smanjenje može biti negativno, a važi i obrnuto da, kada je stvarno smanjenje negativno, iskalkulirano može biti pozitivno.

#### 4. 2. Metoda (algoritam) 2: Ažuriranje DistFlow tokova snaga zamenom unazad i unapred

Druga metoda koristi zamenu unazad i unapred kod Dist Flow algoritma datog u odeljku 2 da bi se ažurirali tokovi snaga duž petlje nastale zamenom grana. Za nominalnu zamenu grana  $b-k$  sa slike 4 metoda se sastoji od sledećih koraka.

*Korak 1: Zamena unazad*

Ažuriraj tokove snaga duž petlje zamenom unazad krećući od čvorova  $k$  i  $n$  petlje, primenjujući DistFlow jednačine zamene unazad. Kreće se sa polaznim snagama i naponom na kraju petlje dobijenim iz tačnog algoritma tokova snaga za posmatranu mrežu. Označimo ažurirane vrednosti snaga i napona kao što sledi:

$$P'_{i}, Q'_{i}, i=k, \dots, 0k; P''_{i}, Q''_{i}, i=n, \dots, 0n; V'_{on}, V'_{ok} \quad (12)$$

*Korak 2: Zamena unapred*

Izračunaj razliku napona u polaznom čvoru (razliku između stvarne vrednosti  $V_0$  i ažuriranih  $V'_{on}, V'_{ok}$ ). Ako je sračunata razlika suviše velika (veća od neke prethodno usvojene vrednosti  $\varepsilon^{max}$ ), izvrši zamenu unapred da bi smanjio grešku (ovaj put startujući od polaznog čvora, koristeći ažurirane vrednosti snaga i napona za primenu zamene unapred). Označimo nove ažurirane vrednosti sa:

$$P''_{i}, Q''_{i}, i=0k+1, \dots, k; P'''_{i}, Q'''_{i}, i=0n+1, \dots, n; V''_{on}, V''_{ok} \quad (13)$$

*Korak 3: Izvrši korekciju procene tokova snaga u polaznom čvoru*

Upotrebi razliku između ažuriranih vrednosti zamenom unazad i zamene unapred kao omaške i koriguj vrednosti snaga polaznog čvora dodavanjem ovih omaški t.j.

$$P''_{0k} = P'_{0k} + (P'_k - P''_k); P''_{0n} = P'_{0n} + (P'_n - P''_n) \quad (14)$$

Detalji primene ovog algoritma dati su u referenci [1].

Primitimo da zamena unazad i unapred predstavlja iteraciju primene Dist Flow jednačina tokova snaga. U ovom slučaju algoritam je primenjen na petlju dobijenu zamenom grana. Zaključujemo:

- metoda je računarski brža od primene stvarnog algoritma tokova snaga,
- tačnost metode zavisi od prenetog opterećenja  $P_k, Q_k$ .

*Sračunavanje smanjenja gubitaka*

Radi procene gubitaka snage uočite da je:

$$P_{0k} - P''_{0k} \approx \Delta P_k + \Delta LP_L; P_{0n} - P''_{0n} \approx -\Delta P_k + \Delta LP_R \quad (15)$$

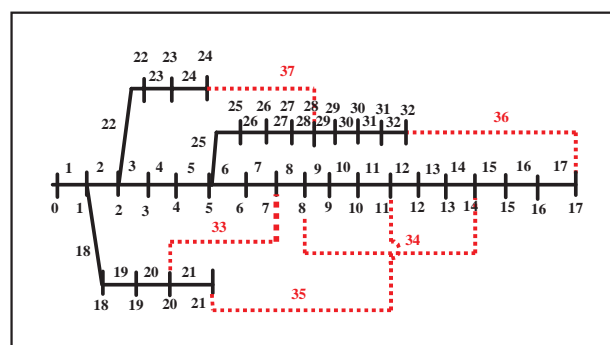
gde  $\Delta LP_R$  i  $\Delta LP_L$  predstavljaju smanjenje gubitaka snage u desnoj ( $R$ ) i levoj ( $L$ ) grani petlje repektivno. Onda se za ukupno smanjenje gubitaka dobija sledeća formula

$$\Delta LP = \Delta LP_L + \Delta LP_R = (P_{0k} - P''_{0k}) + (P_{0n} - P''_{0n}) \quad (16)$$

## 5. NUMERIČKI REZULTATI

Predložene metode rešavanja programirane su u Fortranu 77 (vidi listinge A i B iz priloga). Približne metode tokova snaga date u odeljku 4; (M1) – uprošćeni Dist Flou (Dist Flow) i (M2) – ažuriran Dist Flou metod zamenom unazad i unapred. Pored toga, tačni algoritmi tokova snaga (M3) [2,3] su korišćeni da bi se proverila tačnost metoda M1 i M2.

Ispitni sistem je hipotetični 12,66 kV sistem (dat na slici 6 i 6a) koji se sastoji od 32 sabirnice i pet spojnih rastavljača koji formiraju pet različitih petlji kada se zatvore. Podaci o sistemu dati su u ta-

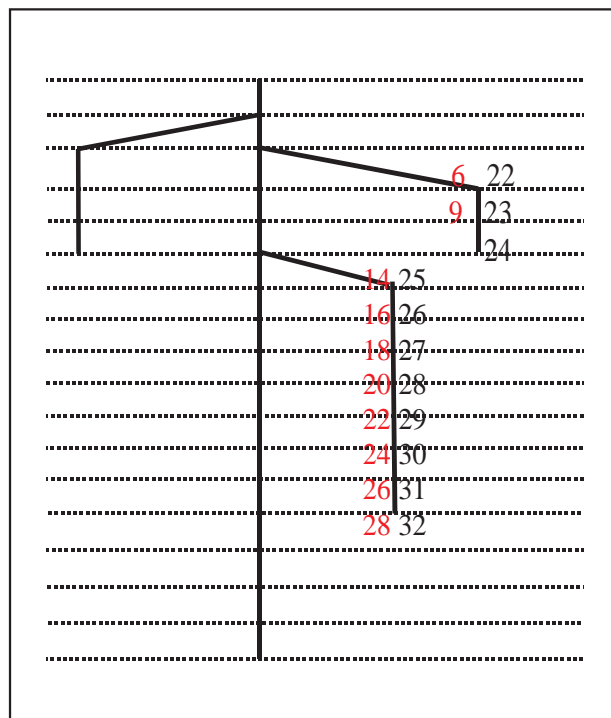


Slika 6. Hipotetični 12,66 kV sistem,

beli 1 zajedno sa naponskom slikom osnovne konfiguracije. Ukupno aktivno i reaktivno opterećenje mreže iz primera iznosi 3 715 kW i 2 300 kvar respektivno. Ukupni gubici aktivne snage u sistemu iznose 202,675 kW što čini 5,5 % od ukupne aktivne potrošnje.

Tabela 1

Grana	$R$ ( $\Omega$ )	$X$ ( $\Omega$ )	$PL$ (kW)	$QL$ (kvar)	$ V $ r.j.
0-1	0,092 2	0,047 0	100	60	0,997 0
1-2	0,493 0	0,251 1	90	40	0,982 9
2-3	0,366 0	0,186 4	120	80	0,975 5
3-4	0,381 1	0,194 1	60	30	0,968 1
4-5	0,819 0	0,707 0	60	20	0,949 7
5-6	0,187 2	0,618 8	200	100	0,946 2
6-7	0,711 4	0,235 1	200	100	0,941 3
7-8	1,030 0	0,740 0	60	20	0,935 1
8-9	1,044 0	0,740 0	60	20	0,929 2
9-10	0,196 6	0,065 0	45	30	0,928 4
10-11	0,374 4	0,123 8	60	35	0,926 9
11-12	1,468 0	1,155 0	60	35	0,920 8
12-13	0,541 6	0,712 9	120	80	0,918 5
13-14	0,591 0	0,526 0	60	10	0,917 1
14-15	0,746 3	0,545 0	60	20	0,915 7
15-16	1,289 0	1,721 0	60	20	0,913 7
16-17	0,732 0	0,574 0	90	40	0,913 1
1-18	0,164 0	0,156 5	90	40	0,996 5
18-19	1,504 2	1,355 4	90	40	0,992 9
19-20	0,409 5	0,478 4	90	40	0,992 2
20-21	0,708 9	0,937 3	90	40	0,991 6
2-22	0,451 2	0,308 3	90	50	0,979 4
22-23	0,898 0	0,709 1	420	200	0,972 7
23-24	0,896 0	0,701 1	420	200	0,969 4
5-25	0,203 0	0,103 4	60	25	0,947 7
25-26	0,284 2	0,144 7	60	25	0,945 2
26-27	1,059 0	0,933 7	60	20	0,933 7
27-28	0,804 2	0,700 6	120	70	0,925 5
28-29	0,507 5	0,258 5	200	600	0,922 0
29-30	0,974 4	0,963 0	150	70	0,917 8
30-31	0,310 5	0,361 9	210	100	0,916 9
31-32	0,341 0	0,530 2	60	40	0,916 6
7-20	2,000 0	2,000 0			
8-14	2,000 0	2,000 0			
11-21	2,000 0	2,000 0			
17-32	0,500 0	0,500 0			
24-28	0,500 0	0,500 0			



Slika 6a: Hipotetični 12,66 kV sistem, priprema za

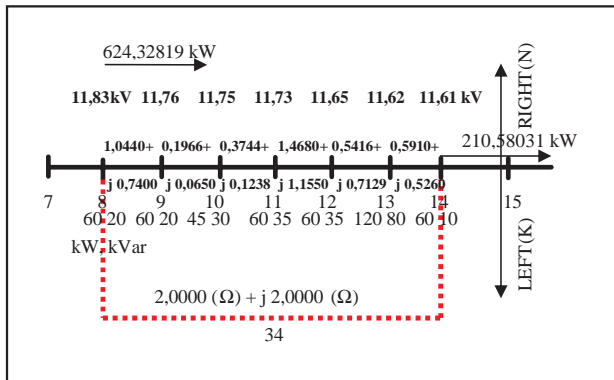
Najniži napon polazne konfiguracije je 0,913 1 r.j. Takođe, pretpostavljeno je da je svaka grana sa pridruženim sekcionim rastavljačem moguća za uključivanje, to jest isključenje.

Iz listinga programa kod koga se problem optimizacije rešava ažuriranjem Dist Flow tokova snaga zamenom unazad i unapred vidimo da su potrebni ulazni podaci:

- parametri mreže;
- opterećenja aktivna i reaktivna u čvorovima mreže;
- naponski profil petlje koja se analizira, a na početku algoritma ih ima onoliko koliko i spojnih rastavljača (u našem primeru 5);
- injektirane aktivne snage iz nultog čvora za levu i desnu granu petlje POK i PON respektivno (pogledaj listing i sliku 7);
- aktivno i reaktivno opterećenje za levu i desnu granu petlje na mestu njenog prekida  $PPRIMLEFT(K)$ ,  $QPRIMLEFT(K)$ ,  $PLLEFT(K)$ ,  $QLLEFT(K)$  i  $PPRIMRIGHT(N)$ ,  $QPRIMRIGHT(N)$ ,  $PLRIGHT(N)$ ,  $QLRIGHT(N)$  respektivno (pogledaj listing i sliku 7);
- kvadrati napona na prekidu petlje za levu i desnu granu petlje  $VPRIMLEFT(K)$  i  $VPRIMRIGHT(N)$  respektivno (pogledaj listing i sliku 7).

Na primer, za petlju ostvarenu zatvaranjem grane (spojnog rastavljača) broj 34 imamo sledeću sliku:





Slika 7. Petlja ostvarena zatvaranjem grane broj 34

Sa slike je očigledno da je:

$P_{OK} = 000,000 \text{ 0 kW}$ ;

$P_{ON} = 624,328 \text{ 19 kW} - 210,580 \text{ 31 kW} =$

$= 413,747 \text{ 88 kW}$ ;

$K = 2, N = 6$ ;

$PPRIMLEFT(K) = 0 \text{ kW}$ ;

$QPRIMLEFT(K) = 0 \text{ kvar}$ ;

$PLLEFT(K) = 60. \text{ kW}$ ;

$QLLEFT(K) = 10. \text{ kvar}$ ;

$VPRIMLEFT(K) = 11,610 \text{ 42} * 11,610 \text{ 42} \text{ kV}^2$ ;

$PPRIMRIGHT(N) = 0 \text{ kW}$ ;

$QPRIMRIGHT(N) = 0 \text{ kvar}$ ;

$PLRIGHT(N) = 120 \text{ kW}$ ;

$QLRIGHT(N) = 80 \text{ kvar}$ ;

$VPRIMRIGHT(N) = 11,628 \text{ 30} * 11,628 \text{ 30} \text{ kV}^2$ .

Napomena: Ulazni podaci navedeni pod c), d), e) i f) i predstavljeni jednim delom na slici dobijaju se primenom tačnog algoritma tokova snaga za polaznu radijalnu konfiguraciju u kojoj nema petlji (spojni rastavljači su otvoreni).

Iz listinga programa kod koga se problem optimizacije rešava uprošćenim Dist Flow algoritmom vidimo da su potrebni ulazni podaci:

a) parametri mreže;

b) opterećenja aktivna i reaktivna u čvorovima mreže;

c) napon na početku petlje.

Slika 7 važi i u ovom slučaju.

Sa slike je očigledno da je polazno  $K = 1$  i  $N = 7$ .

Napomena: Ulazni podatak naveden pod c) dobija se primenom tačnog algoritma tokova snaga za polaznu radijalnu konfiguraciju u kojoj nema petlji (spojni rastavljači su otvoreni).

Rezultati dobijeni rešavanjem problema optimizacije za oba slučaja a za petlju sa slike dati su u sledećoj tabeli (tabela 2).

Tabela 2.

### Rezultati ispitivanja za petlju sa slike [7]

Naziv fortranske datoteke	Otvara se grana pod rednim brojem (vidi sliku)	K i N		$\Delta P_{LOSS}$ (kW) za listing A (M2) (smanjenje gubitaka)	$P_{LOSS}$ (kW) za listing B (M1) (gubici leve i desne grane petlje)
		za listing A (M2)	za listing B (M1)		
za listing A (M2)	za listing B (M1)				
polazna konfiguracija	polazna konfiguracija				
	SDIFLMET.1		1 i 7		3,016
BEA 34	SDFM 34	14	2 i 6	6,547	2,169
BEA 34.1	SDFM 34.1	13	3 i 5	7,433	1,305
BEA 34.2	SDFM 34.2	12	4 i 4	7,183	1,547
BEA 34.3	SDFM 34.3	11	5 i 3	6,493	2,218
BEA 34.4	SDFM 34.4	10	6 i 2	5,649	3,034
BEA 34.5	SDFM 34.5	9	7 i 1	4,340	4,295

Tabela 3.

### Rezultati ispitivanja, listing A, metoda M2

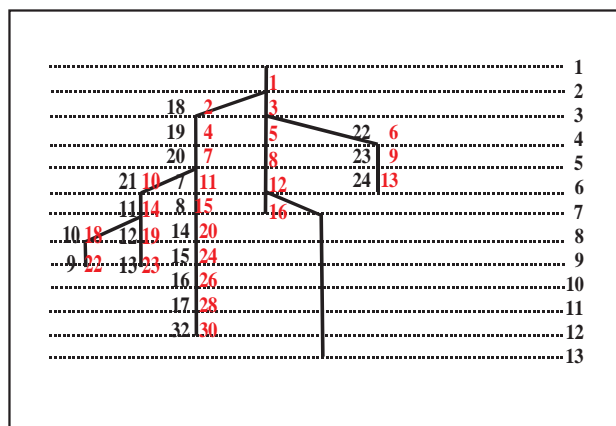
Nivo pretraživanja	Grana zatvorena-otvorena	Smanjenje gubitaka u kW u odnosu na polaznu konfiguraciju	
		Listing A (metoda M2)	Stvarno smanjenje gubitaka (metoda M3)
1	33-7	131,110	-
	34-13	7,433	-
	35-9	134,522	48,684
	36- svaka	< 0	-
	37-28	97,072	-
	35-9		48,684
2	9- svaka	< 0	-
	33-7	80,514	56,514
	34-14	84,106	40,954
	36-32	48,020	51,528
	37-28	60,579	56,308
	33-7		56,514-48,684=7,830
3	7-svaka	< 0	-
	34-14	11,121	60,511
	36-32	40,467	57,915
	37-28	49,675	56,763
	9-8	9,222	55,026
	34-14		60,511-56,514=3,997
4	14- svaka	< 0	-
	36-32	40,407	63,124
	37-28	49,675	60,760
	7-33	75,958	40,954
	9-8	7,462	55,383
	36-32		63,124-60,511=2,613
5	32- svaka	< 0	-
	37-28	44,066	62,698
	7-33	75,827	42,830
	9-8	12,205	56,487
	14-34	9,474	57,908
			62,698-63,124=-0,426
Zaključak: – Konfiguracija ostaje kakva je, to jest otvorene su grane 9, 7, 14, 32 i 37 a sve ostale su zatvorene. – Ukupni gubici snage za ovu konfiguraciju (vidi sliku 8) iznose 139,551 kW.			

Tabela 4.

## Rezultati ispitivanja, listing B, metoda M1

Nivo pretraživanja	Grana zatvorena-otvorena	Smanjenje gubitaka u kW u odnosu na polaznu konfiguraciju	
		Listing B (metoda M1)	Stvarno smanjenje gubitaka (metoda M3)
1	33-7	1,057	–
	34-13	1,711	–
	35-9	2,697	48,684
	36-17	0,004	–
	37-svaka	< 0	–
	35-9	2,697	48,684
2	9-svaka	< 0	–
	33-7	1,055	–
	34-14	0,429	–
	36-32	1,226	51,528
	37-svaka	< 0	–
	36-32	1,226	51,528–48,684=2,844
3	9-svaka	< 0	–
	33-7	1,055	57,908
	34-14	0,429	–
	32-svaka	< 0	–
	37-svaka	< 0	–
	33-7	1,055	57,908–51,528=6,380
4	7-svaka	< 0	–
	9-svaka	< 0	–
	34-14	0,422	63,124
	32-svaka	< 0	–
	37-svaka	< 0	–
	34-14	0,422	63,124–57,908=5,216
5	7-svaka	< 0	–
	9-svaka	< 0	–
	14-svaka	< 0	–
	32-svaka	< 0	–
	37-svaka	< 0	–

Zaključak: – Konfiguracija ostaje kakva je, to jest otvorene su grane 7, 9, 14, 32 i 37 a sve ostale su zatvorene.  
– Ukupni gubici aktivne snage za ovu konfiguraciju (vidi sliku 8) iznose 139,551 kW što je za 63,124 kW manje od polazne konfiguracije, čime je postignuta ušteda od 31,1 % u odnosu na gubitke (202,675 kW) polazne konfiguracije.



Slika 8. Dobijena krajnja konfiguracija metodama M1 i

Iz gornje tabele vidi se da metoda M2 daje najveće uštede u gubicima kada se otvori grana 13 (šrafirano polje). Ušteda u gubicima iznosi 7,433 kW. Ovo nije stvarna ušteda.

Iz gornje tabele vidi se da metoda M1 daje najveće uštede u gubicima kada se otvori grana 13 (šrafirano polje). Ušteda u gubicima iznosi onda 3,016 kW – 1,305 kW = 1,711 kW. Stvarna ušteda dobija se primenom tačnog algoritma tokova snaga za mrežu pre i posle komutacije. Vidi se takođe da su posle prve negativne uštede (3,034 > 3,016) i sve ostale uštede negativne (4,295 > 3,016) za komutacije u određenoj grani petlje, pa ih ne treba proveravati.

Rezultat sprovedenih računica dat je u tabelama 3 i 4.

U tabelama svaki red odgovara zameni grana. Zamene grana su definisane parom brojki u drugoj koloni. Red posle broja nivoa pretraživanja, red šest tabele 3 na primer, pokazuje koja zamena grana je izabrana u tom nivou pretraživanja, s obzirom na maksimalno smanjenje gubitaka.

## 6. ZAKLJUČCI

*U ovom članku je dat opšti prikaz problema rekonfiguracije mreže radi smanjenja gubitaka. Samo rešavanje predstavlja pretraživanje različitih radialnih konfiguracija mreže dobijenih postupkom zamene grana.*

*Korišćena su dva različita aproksimativna metoda sa gledišta tokova snaga. Oni se koriste za procenu smanjenja gubitaka snage nakon što je izvršena zamena grana i zasnovani su na jednačinama tokova snaga razvijenim za radialni distributivni sistem.*

*Numerički rezultati pokazuju da:*

- su obe računarske metode čije fortranske liste damo u prilogima A i B, vrlo brze, mada različitog stepena tačnosti. One uzimaju u obzir kako aktivne tako i reaktivne tokove snaga, pa se stoga mogu koristiti i za rekonfiguraciju loše kompenzovanih sistema kao i za sisteme sa više trafo stanica.
- Oba algoritma su, što se tiče procene aktivnih gubitaka, samo indikativna, ukazuju u kome se smeru treba kretati jer ne daju tačne gubitke, za njihovu procenu potrebno je sprovesti potpunu analizu tokova snaga. Jedan algoritam (M2) je optimističan, daje za uštede veće vrednosti od stvarnih i konvergira ka istoj konfiguraciji kao i algoritam M1. Tačne injektirane aktivne snage P0K i P0N u petlju iz nultog čvora ne mogu se dobiti samo prostim odbijanjem aktivnih snaga odliva radi dobijanja očišćenih petlji kako je to u ovom radu učinjeno. Zavisnost između aktivnih snaga petlji je

složenija, zato se za smanjenje gubitaka ovom metodom dobijaju mnogo bolji rezultati od stvarnih. Drugi algoritam (M1) indicira dalju rekonfiguraciju uz približno minimalno smanjenje gubitaka za koje se ispostavlja da je u stvari mnogo veće (on ih u startu zanemaruje) tako da je njegova indikativna karakteristika od suštinskog značaja za dobijanje prihvatljivog optimuma koji je u našem slučaju i globalni [17], u čemu je i prednost ove metode nad ranijim [1, 22, 24].

- Tačno izračunavanje napona nekog čvora petlje pri primeni metode M2 gotovo da nema smisla. Kod približnog računanja napona (recimo aproksimiranjem svih napona čvorova petlje jednom vrednošću) dobijaju se rezultati koji se razlikuju u desetinama vata i kao takvi ne utiču na tačnost metode. Ova aproksimacija napona smanjuje izvršenje algoritma.
- Najniži napon krajne konfiguracije je 0,938 r.j. što je bolje od ranije vrednosti 0,913 r.j. tako da se rekonfiguracijom naponska slika samo popravlja.
- Vremenski aspekti primene programa su takvi da za svaku iteraciju, konkretnu konfiguraciju mreže treba za približnu metodu oko 10 min, a za tačni algoritam protoka snaga oko 35 min, pod pretpostavkom da se pre puštanja programa raspolože potrebnom šemom.
- Glavni problem sa kojim se autor suočavao je prema ulaznih podataka za sprovođenje fortran-skih programa. Za svaku iteraciju, konkretnu konfiguraciju mreže, ponovo je učitavana ulazna datoteka, tako da je samo sprovođenje algoritama dosta vremenski zahtevno, dok se ova problematika daljim razvojem automatizacije uspešnije ne reši, što u postupku planiranja nije odlučujući faktor.

Oba prikazana algoritma, iako indikativna, konvergiraju i iznalaze globalni optimum (izbegavajući vremenski znatno zahtevniji tačni algoritam tokova snaga koji bi se primenjivao na svakoj izgenerisanoj konfiguraciji tokom proračuna) što nije slučaj sa dosadašnjim algoritmima iz domaće prakse [22, 24].

Potpunijim programiranjem prikazanih algoritama [24] postigla bi se znatna ušteta u utrošenom vremenu za proračun i približili bi se prikazani algoritmi problemu planiranja rada realnih simetričnih distributivnih mreža. U tome autor vidi smernice za buduće istraživanje u ovoj oblasti.

## 8. PRILOZI A I B

### Listing A

C Last change: 30 March 07 10:20 am

```

c
+++++ File: BEA 34.FOR +++++
c
=====
PROGRAM BRANCH
c za glavni primer BARAN I WU
c
=====
c NISU (JESU) PROVERENE POTROSNJE KOD
ULAZNOG CVORA
c NISU PROVERENI INDEKSI DO PETLJI(JESU)
c NIJE (NE MOZE) PROVERENO DA LI MOZE
V(I)**2 U DO PETLJI
c OVO JE SAMO POCETNA PROBA JEDNOG DELA
ALGORITMA
c
=====
c
c deklarisanje promenljivih - unutrašnjom konvencijom
c -----
PARAMETER (KM=2, NM=6)
DIMENSION RLEFT(KM), XLEFT(KM),
PLLEFT(KM), QLLEFT(KM),
& RRIGHT(NM), XRIGHT(NM), PLRIGHT(NM),
QLRIGHT(NM)
DIMENSION PPRIMLEFT(KM), QPRIMLEFT(KM),
VPRIMLEFT(KM),
& PSECLEFT(KM), QSECLEFT(KM),
VSECLEFT(KM),
& PPRIMRIGHT(NM), QPRIMRIGHT(NM),
VPRIMRIGHT(NM),
& PSECRIGHT(NM), QSECRIGHT(NM),
VSECRIGHT(NM)
DIMENSION PPRLEFT(KM), QPRLEFT(KM),
& PPRRIGHT(NM), QPRRIGHT(NM)
REAL DELPLOSS, P0K, P0N, V0
C INTEGER KINDEX(KM), NINDEX(NM)

C COMMON /KNP0KP0NV0/ K, N, P0K, P0N, V0
c
DATA EPSMAX /1.E-2/
c
c otvaranje datoteka (ulazne i izlazne)
c -----
OPEN (UNIT=11, FILE= 'glprimer.DAT',
STATUS='OLD')
OPEN (UNIT=21, FILE= 'RESULTS.DAT',
STATUS='NEW')
c
c učitavanje ulazne datoteke
c -----
10 FORMAT(2I5,3F12.4)

```

```

20 FORMAT(4F12.4)
READ (11,10) K, N, P0K, P0N, V0
DO 5009 I=1,K
5009 READ (11,20) RLEFT(I), XLEFT(I), PLLEFT(I),
QLLEFT(I)
DO 5010 I=1,N
5010 READ (11,20) RRIGHT(I), XRIGHT(I),
PLRIGHT(I), QLRIGHT(I)
7010 CONTINUE

```

c  
c

```

=====
=====
c
c odavde poceli ucitavanje programa
BRANCHEXCHANGE 29.03.07.

```

c

```

=====
=====
c P0K=je 60.00000 posle odbijanja odliva,prikljucena
potrosnja
c na mestu prekida petlje
c P0N=je 353.74788 posle odbijanja odliva i potrosnje u
poslednjem cvoru

```

```

c grane
c podaci za P0K i P0N uzeti su iz datoteke
RESULTS.DAT za pocetnu
c konfiguraciju i nakon dodavanja to jest odbitaka
respektivnih potrosnji

```

c K=2

c N=6

c podaci za K i N uzeti su sa slike petlje 34

c LEFT oznaka za I=k,...,1k petlju

c RIGHT oznaka za I=n,...,1n petlju

PPRIMLEFT(K)=0.

c PPRIMLEFT(K) je 0.

QPRIMLEFT(K)=0.

c QPRIMLEFT(K) je 0.

PLLEFT(K)=60.

QLLEFT(K)=10.

VPRIMLEFT(K)=11.61042\*11.61042

c gornji podaci uzeti iz RESULTS.DAT za pocetnu
konfiguraciju

PPRIMRIGHT(N)=0.

QPRIMRIGHT(N)=0.

PLRIGHT(N)=120.

QLRIGHT(N)=80.

VPRIMRIGHT(N)=11.62830\*11.62830

c VPRIMLEFT(K)=11.61042\*\*2

c gornji podaci uzeti iz RESULTS.DAT za pocetnu
konfiguraciju

c BACKWARD UPDATE LEVA GRANA

DO 1 I=K,2,-1

PPRLEFT(I)=PPRIMLEFT(I)+PLLEFT(I)

QPRLEFT(I)=QPRIMLEFT(I)+QLLEFT(I)

PPRIMLEFT(I-1)=PPRIMLEFT(I)+0.001\*RLEFT(I-1)\*PPRLEFT(I)\*

& PPRLEFT(I)+

&  
QPRLEFT(I)\*QPRLEFT(I))/VPRIMLEFT(I)+PLLEFT(I)

QPRIMLEFT(I-1)=QPRIMLEFT(I)+0.001\*XLEFT(I-1)\*(PPRLEFT(I)\*

& PPRLEFT(I)+

&

QPRLEFT(I)\*QPRLEFT(I))/VPRIMLEFT(I)+QLLEFT(I)

I) 1 VPRIMLEFT(I-

1)=VPRIMLEFT(I)+2\*0.001\*(RLEFT(I-

1)\*PPRLEFT(I)+

& XLEFT(I-1)\*

& QPRLEFT(I)+0.000001\*(RLEFT(I-1)\*RLEFT(I-

1)+

& XLEFT(I-1)\*

& XLEFT(I-

1))\*(PPRLEFT(I)\*PPRLEFT(I)+QPRLEFT(I)\*

& QPRLEFT(I))/VPRIMLEFT(I)

c VPRIMLEFT(I)=stvarno VPRIMLEFT(I)\*\*2

c BACKWARD UPDATE DESNA GRANA

DO 2 I=N,2,-1

PPRRIGHT(I)=PPRIMRIGHT(I)+PLRIGHT(I)

QPRRIGHT(I)=QPRIMRIGHT(I)+QLRIGHT(I)

PPRIMRIGHT(I-

1)=PPRIMRIGHT(I)+0.001\*RRIGHT(I-

1)\*(PPRRIGHT(I)\*

&

PPRRIGHT(I)+QPRRIGHT(I)\*QPRRIGHT(I))/VPRIM

RIGHT(I)+

& PLRIGHT(I)

QPRIMRIGHT(I-

1)=QPRIMRIGHT(I)+0.001\*XRIGHT(I-

1)\*(PPRRIGHT(I)\*

&

PPRRIGHT(I)+QPRRIGHT(I)\*QPRRIGHT(I))/VPRIM

RIGHT(I)+

& QLRIGHT(I)

2 VPRIMRIGHT(I-

1)=VPRIMRIGHT(I)+2\*0.001\*(RRIGHT(I-

1)\*PPRRIGHT(I)+

& XRIGHT(I-1)\*QPRRIGHT(I)+0.000001\*

& (RRIGHT(I-1)\*RRIGHT(I-1)+

& XRIGHT(I-1)\*XRIGHT(I-1))\*

& (PPRRIGHT(I)\*PPRRIGHT(I)+QPRRIGHT(I)\*

& QPRRIGHT(I))/VPRIMRIGHT(I)

c VPRIMRIGHT(I)=stvarno VPRIMRIGHT(I)\*\*2

c pocetak FORWARD UPDATE

c V0=11.83787

c videti sta cemo sa SQRT

c uzeto iz RESULTS.DAT za pocetnu konfiguraciju

IF ( ABS(SQRT(VPRIMLEFT(1))-

V0).LT.EPSMAX.AND.

&ABS(SQRT(VPRIMRIGHT(1))-V0).LT.EPSMAX )

GOTO 5

c sada ide FORWARD UPDATE LEVA GRANA

PSECLEFT(1)=PPRIMLEFT(1)

QSECLEFT(1)=QPRIMLEFT(1)

```

VSECLEFT(1)=V0*V0
PSECRIGHT(1)=PPRIMRIGHT(1)
QSECRIGHT(1)=QPRIMRIGHT(1)
VSECRIGHT(1)=VSECLEFT(1)
DO 3 I=1,K-1,1
PSECLEFT(I+1)=PSECLEFT(I)-
0.001*RLEFT(I)*(PSECLEFT(I)*PSECLEFT(I)+
& QSECLEFT(I)*QSECLEFT(I))/VSECLEFT(I)-
PLLEFT(I+1)
QSECLEFT(I+1)=QSECLEFT(I)-
0.001*XLEFT(I)*(PSECLEFT(I)*PSECLEFT(I)+
& QSECLEFT(I)*QSECLEFT(I))/VSECLEFT(I)-
QLLEFT(I+1)
3 VSECLEFT(I+1)=VSECLEFT(I)-
2*0.001*(RLEFT(I)*PSECLEFT(I)+XLEFT(I)*
&
QSECLEFT(I))+0.000001*(RLEFT(I)*RLEFT(I)+XLE
FT(I)*
&
XLEFT(I))*(PSECLEFT(I)*PSECLEFT(I)+QSECLEFT
(I)*
& QSECLEFT(I))/VSECLEFT(I)
c VSECLEFT(I)=stvarno VSECLEFT**2
c sada ide FORWARD UPDATE DESNA GRANA
DO 4 I=1,N-1,1
PSECRIGHT(I+1)=PSECRIGHT(I)-
0.001*RRIGHT(I)*(PSECRIGHT(I)*
& PSECRIGHT(I)+QSECRIGHT(I)*QSECRIGHT(I))/
& VSECRIGHT(I)-PLRIGHT(I+1)
QSECRIGHT(I+1)=QSECRIGHT(I)-
0.001*XRIGHT(I)*(PSECRIGHT(I)*
& PSECRIGHT(I)+QSECRIGHT(I)*QSECRIGHT(I))/
& VSECRIGHT(I)-QLRIGHT(I+1)
4 VSECRIGHT(I+1)=VSECRIGHT(I)-
2*0.001*(RRIGHT(I)*PSECRIGHT(I)+
&
XRIGHT(I)*QSECRIGHT(I))+0.000001*(RRIGHT(I)*
&
RRIGHT(I)+XRIGHT(I)*XRIGHT(I))*(PSECRIGHT(I)
*
&
PSECRIGHT(I)+QSECRIGHT(I)*QSECRIGHT(I))/VS
ECRIGHT(I)
GO TO 6
c VSECRIGHT(I)=stvarno VSECRIGHT**2
c sada ide korekcija snage kod polaznog cvora
5 PSECLEFT(K)=PPRIMLEFT(K)
PSECRIGHT(N)=PPRIMRIGHT(N)
6 PSECLEFT(1)=PPRIMLEFT(1)+(PPRIMLEFT(K)-
PSECLEFT(K))

PSECRIGHT(1)=PPRIMRIGHT(1)+(PPRIMRIGHT(N)
-PSECRIGHT(N))
c sada ide sracunavanje POWER LOSS REDUCTION-a
DELPLOSS=(P0K-PSECLEFT(1))+(P0N-
PSECRIGHT(1))
c=====
c sada ide ispisivanje izlazne datoteke

```

```

WRITE (21,1666)
1666 FORMAT (2X,'POWER LOSS REDUCTION')
WRITE (21,176) DELPLOSS
176 FORMAT (2X, F10.3)
CLOSE(11)
CLOSE(21)
c
STOP
END
c =====
c DAS IST END za sada (30.03.07.)
c
c ===== Branko
Stojanovic' 30.03.2007. =====
c ++++++
End of file: METROGLO.FOR+++++

```

### Listing B

```

C Last change: 06 August 06 8:45 pm
c
+++++
+++++ File: SDIFLMET.1.FOR ++
c
=====
c PROGRAM SIMP DIST FLOW METHOD
c za glavni primer BARAN I WU
c
=====
c
c deklarisanje promenljivih - untrasnjom konvencijom
c -----
PARAMETER (KM=1, NM=7)
DIMENSION RLEFT(KM), PLLEFT(KM),
QLLEFT(KM),
& RRIGHT(NM), PLRIGHT(NM), QLRIGHT(NM)
DIMENSION PLEFT(KM), QLEFT(KM),
& PRIGHT(NM), QRIGHT(NM)
REAL PLOSSLEFT, PLOSSRIGHT, PLOSS, V0
c
c
c otvaranje datoteka (ulazne i izlazne)
c -----
OPEN (UNIT=11, FILE= 'glprimer.DAT',
STATUS='OLD')
OPEN (UNIT=21, FILE= 'RESULTS.DAT',
STATUS='NEW')
c
c ucitavanje ulazne datoteke
c -----
10 FORMAT(2I5,F12.4)
20 FORMAT(3F12.4)
READ (11,10) K, N, V0
DO 5009 I=1,K

```

```

5009 READ (11,20) RLEFT(I), PLLEFT(I),
QLLEFT(I)
DO 5010 I=1,N
5010 READ (11,20) RRIGHT(I), PLRIGHT(I),
QLRIGHT(I)
7010 CONTINUE
c
c
=====
=====
c
c odavde poceli ucitavanje programa SIMP DIST
FLOW 25.07.06.
c
=====
=====
c sracunavanje prtoka snaga po levoj i desnoj grani
petlje
DO 1 I=1,K-1
PLEFT(I)=0.
DO 1 L=I+1,K
PLEFT(I)=PLEFT(I)+PLLEFT(L)
1 CONTINUE
DO 2 I=1,K-1
QLEFT(I)=0.
DO 2 L=I+1,K
QLEFT(I)=QLEFT(I)+QLLEFT(L)
2 CONTINUE
DO 3 I=1,N-1
PRIGHT(I)=0.
DO 3 L=I+1,N
PRIGHT(I)=PRIGHT(I)+PLRIGHT(L)
3 CONTINUE
DO 4 I=1,N-1
QRIGHT(I)=0.
DO 4 L=I+1,N
QRIGHT(I)=QRIGHT(I)+QLRIGHT(L)
4 CONTINUE
c sracunavanje gubitaka po levoj i desnoj grani petlje
PLOSSLEFT=0.
DO 46 L=1,K-1
PLOSSLEFT=PLOSSLEFT+(PLEFT(L)*PLEFT(L)+
& QLEFT(L)*QLEFT(L))*
& RLEFT(L)/(V0*V0)*0.001
46 CONTINUE
PLOSSRIGHT=0.
DO 47 L=1,N-1
PLOSSRIGHT=PLOSSRIGHT+(PRIGHT(L)*PRIGHT(
L)+
& QRIGHT(L)*QRIGHT(L))*
& RRIGHT(L)/(V0*V0)*0.001
47 CONTINUE
c sracunavanje ukupnih gubitaka petlje
PLOSS=PLOSSLEFT+PLOSSRIGHT
c sada ide ispisivanje izlazne datoteke
WRITE (21,1666)
1666 FORMAT (2X,'LOOP POWER LOSS')

```

```

WRITE (21,176) PLOSS
176 FORMAT (2X, F10.3)
CLOSE(11)
CLOSE(21)
c
STOP
END
c =====
c DAS IST END za sada (06.08.06.)
c
c ===== Branko
Stojanovic' 06.08.2006. =====
c ++++++
End of file: METROGLO.FOR+++++

```

## 7. LITERATURA

- [1] M. E. Baran and F. F. Wu, NETWORK RECONFIGURATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS FOR LOSS REDUCTION AND LOAD BALANCING, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1401-1407.
- [2] A. Sarić, PRIMENA METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE ZA REŠAVANJE PROBLEMA KOMPENZACIJE REAKTIVNE SNAGE I REGULACIJE NAPONA U DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA, Doktorska disertacija, Beograd, 1997.
- [3] B. Stojanović, Metoda SIMULACIJE KALJENJA I NJENA PRIMENA NA KOMPENZACIJU U RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Magistarski rad, Beograd, 1997.
- [4] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, RECONFIGURATION OF ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS FOR RESISTIVE LINE LOSSES REDUCTION, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1492-1498.
- [5] H. D. Chiang and R. J. Jumeau, OPTIMAL NETWORK RECONFIGURATIONS IN DISTRIBUTION SYSTEMS: PART 2: SOLUTION ALGORITHMS AND NUMERICAL RESULTS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1568-1574.
- [6] H. D. Chiang and R. J. Jumeau, OPTIMAL NETWORK RECONFIGURATIONS IN DISTRIBUTION SYSTEMS: PART 1: A NEW FORMULATION AND A SOLUTION METHODOLOGY, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1902-1909.
- [7] D. Jiang and R. Baldick, OPTIMAL ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEM SWITCH RECONFIGURATION AND CAPACITOR CONTROL, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp. 890-897.
- [8] C. T. Su and C. S. Lee, FEEDER RECONFIGURATION AND CAPACITOR SETTING FOR LOSS

- REDUCTION OF DISTRIBUTION SYSTEMS, Electric Power Systems Research, 58 (2001), pp. 97-102.
- [9] Y. J. Jeon, J. C. Kim, J. O. Kim, J. R. Shin and K. Y. Lee, AN EFFICIENT SIMULATED ANNEALING ALGORITHM FOR NETWORK RECONFIGURATION IN LARGE-SCALE DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002, pp. 1070-11078.
- [10] Y. J. Jeon and J. C. Kim, APPLICATION OF SIMULATED ANNEALING AND TABU SEARCH FOR LOSS MINIMIZATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS, Electric Power and Energy Systems, 26 (2004), pp. 9-18.
- [11] M. A. N. Guimaraes and C. A. Castro, RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS FOR LOSS REDUCTION USING TABU SEARCH, 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 10, Paper 2, pp. 1-6.
- [12] K. N. Miu, H. D. Chiang, B. Yuan and G. Darling, FAST SERVICE RESTORATION FOR LARGE-SCALE DISTRIBUTION SYSTEMS WITH PRIORITY CUSTOMERS AND CONSTRAINTS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 789-795.
- [13] K. N. Miu, H. D. Chiang and R. J. McNulty, MULTI-TIER SERVICE RESTORATION THROUGH NETWORK RECONFIGURATION AND CAPACITOR CONTROL FOR LARGE-SCALE RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, August 2000, pp. 1001-1007.
- [14] C. T. Su, C. F. Chang and J. P. Chiou, DISTRIBUTION NETWORK RECONFIGURATION FOR LOSS REDUCTION BY ANT COLONY SEARCH ALGORITHM, Electric Power Systems Research, 75 (2005), pp. 190-199.
- [15] K. Prasad, R. Ranjan, N. C. Sahoo and A. Chaturvedi, OPTIMAL RECONFIGURATION OF RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS USING A FUZZY MUTATED GENETIC ALGORITHM, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005, pp. 1211-1213.
- [16] Y. Y. Hong and S. Y. Ho, DETERMINATION OF NETWORK CONFIGURATION CONSIDERING MULTIOBJECTIVE IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHMS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 1062-1069.
- [17] F. V. Gomes, S. Carneiro, Jr., J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, P. A. N. Garcia and L. R. Araujo, A NEW HEURISTIC RECONFIGURATION ALGORITHM FOR LARGE DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005, pp. 1373-1378.
- [18] H. P. Schmidt, N. Ida, N. Kagan and J. C. Guaraldo, FAST RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS CONSIDERING LOSS MINIMIZATION, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005, pp. 1311-1319.
- [19] D. Das, A FUZZY MULTIOBJECTIVE APPROACH FOR NETWORK RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 202-209.
- [20] R. D. Zimmerman, NETWORK RECONFIGURATION FOR LOSS REDUCTION IN THREE PHASE POWER DISTRIBUTION SYSTEMS, M. S. dissertation, Cornell University, 1992.
- [21] T. P. Wagner, A. Y. Chikhani and R. Hackam, FEEDER RECONFIGURATION FOR LOSS REDUCTION: AN APPLICATION OF DISTRIBUTION AUTOMATION, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991, pp. 1922-1933.
- [22] V. Borozan, D. Rajičić and R. Ačkovski, IMPROVED METHOD FOR LOSS MINIMIZATION IN DISTRIBUTION NETWORKS, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995, pp. 1420-1425.
- [23] V. Borozan and N. Rajaković, APPLICATION ASSESSMENTS OF DISTRIBUTION NETWORK MINIMUM LOSS RECONFIGURATION, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1786-1792.
- [24] V. Strezoski i saradnici, OSNOVNI ENERGETSKI PRORAČUNI ZA ANALIZU I UPRAVLJANJE DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, (studija), Institut za energetiku i elektroniku, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 1998.

Rad je primljen u uredništvo 4. 01. 2007. godine



**Branko D. Stojanović** je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, odsek energetske, smer elektroprivreda, 1981. godine. Magistrirao je na istom fakultetu, smer električna oprema i postrojenja, 1997. godine. Oblast njegovog naučnog istraživanja je primena metode „simulacije kaljenja” u radijalnim distributivnim mrežama. Zaposlen je u Tehničkom opitnom centru pri KoV u Beogradu.

ELEKTROPRIVREDA, br. 3, 2007.

# Procena zaštite OPGW na dalekovodima 110 kV sa električno pojačanom izolacijom

Stručni rad  
UDK: 621.315

---

## Rezime:

Uže tipa OPGW može biti izloženo prekomernim termičkim naprezanjima za vreme zemljospoja na nadzemnim vodovima koji rade u mreži sa uzemljenom neutralom. Pored ostalih zaštitnih mera ova neželjena pojava može se sprečiti pojačavanjem električne izolacije na kritičnim stubovima na trasi voda. Pošto se na ovaj način samo smanjuje verovatnoća nastanka zemljospoja, postoji mogućnost da takva mera u praksi ne bude dovoljno efikasna. U radu je data metodologija za procenu rizika od otkaza zaštite sa ovako izvedenom izolacijom. Numerička procena rizika sprovedena je na jednom realnom dalekovodu 110 kV koji radi u mreži Elektroprivrede Srbije (EPS).

**Ključne reči:** OPGW, struje zemljospoja; verovatnoća, prenaponi ; udarne impedanse; raspoloživost

---

## Abstract:

### EVALUATION OF OPGW PROTECTION ON 110 kV TRANSMISSION LINES WITH ELECTRICALLY REINFORCED INSULATION

The OPGW can be protected against harmful temperature rise during ground fault by electrically reinforced insulator strings on power line towers where ground fault currents are large. As this protective measure only reduces the ground fault probability, there is a possibility the OPGW might be damaged under certain circumstances. An evaluation method of this possibility is discussed in the paper. The numerical analysis of the OPGW damage risk on the 110 kV power line working in the EPS power network is presented as well.

**Key words:** OPGW, ground fault, probability, overvoltages, surge impedances, availability

---

## 1. UVOD

Električno pojačana izolacija primenjuje se u skladu sa članom 53. važećeg Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV [1]. Ovom merom sprečavaju se eventualne štetne posledice zbog preskoka na izolaciji na onim

stubovima na kojima bi preskok mogao da dovede do težih posledica po ljude i imovinu. Zaštita deluje tako što smanjuje verovatnoću preskoka na pomenutim stubovima.

Zaštita nije efikasno primenjena ako preskok umesto na osnovnoj, najpre nastane na pojačanoj izolaciji, pa zbog toga na šticećenom stubu dođe do neželjenog zemljospoja i štete koju on može prou-



zrokovati. Međutim, kao i kod ostalih zaštita koje se primenjuju u elektroenergetici, čak i kod dobro projektovane električno pojačane izolacije postoji rizik od neuspešnog delovanja. Ovaj rizik zavisi od više faktora, pa je korisno napraviti analizu kojom bi se procenila njegova verovatnoća i posledice koje on nosi. Na osnovu jedne takve analize mogu se doneti zaključci o eventualnoj primeni i drugih zaštitnih mera, naravno, ako se to isplati.

Kod nastanka prenapona teoretski su mogući sledeći uzroci neuspešnog delovanja električno pojačane izolacije:

(i) pojava prenapona na stubu sa pojačanom izolacijom pre pojave ovog napona na stubovima sa osnovnom izolacijom;

(ii) povećanje verovatnoće preskoka na pojačanoj izolaciji zbog veće visine stubne konstrukcije i veće otpornosti uzemljenja stuba nego kod stubova sa osnovnom izolacijom;

(iii) rasipanje (disperzija) podnosivih i preskočnih napona pojačane i osnovne izolacije oko njihovih srednjih vrednosti;

(iv) smanjenje preskočnih napona industrijske učestanosti na pojačanoj izolaciji bilo zbog velike razlike u količini padavina u istom vremenskom intervalu, bilo zbog velike zaprljanosti pojačane izolacije.

Podsticaji za izradu analize koja se stavlja na uvid čitaocu u narednom tekstu dobijeni su tokom razrešavanja problema tokom izrade izvođačke dokumentacije za postavljanje OPGW na dalekovodu 110 kV br. 1005 od TS 400/220/110 kV/kV/kV Novi Sad 3 do TE-TO Novi Sad. Prema podacima o perspektivnim strujama zemljospoja koje je obezbedio investitor, odabrano uže OPGW nije moglo da izdrži termička naprezanja za vreme zemljospojeva na prvih šest i na poslednjih pet stubnih mesta na oba kraja ovog voda.

Da bi se uže OPGW zaštitilo od ovih naprezanja prvobitnim projektom bilo je predviđeno da se u prva dva raspona kod TS Novi Sad 3 i u prvom rasponu kod TE-TO Novi Sad položi zemljovod, a da se na preostalim osam stubova primeni električno pojačana izolacija. Iako je električno pojačana izolacija zaštitna mera koju predviđa naš tehnički propis, investitor nije prihvatio ovo rešenje, pa je nakon toga urađena druga dokumentacija sa drugim užetom OPGW. U međuvremenu prikupljeni su statistički podaci o događajima na DV 1005, što je omogućilo kvantitativnu procenu pouzdanosti prvobitno predložene zaštite.

## 2. RIZIK OD OTKAZA KAO VEROVATNOĆA NEUSPEŠNOG DELOVANJA ELEKTRIČNO POJAČANE IZOLACIJE – NUMERIČKA PROCENA

### 2.1. Rizik od otkaza kao verovatnoća slučajnih pojava

Radi bolje preglednosti u tekstu koji sledi, simbol „\*” označavaće preskok na izolaciji, „ $U_a$ ” pojavu atmosferskog prenapona, „ $\tilde{U}$ ” pojavu prenapona industrijske učestanosti, a „ $\sigma$ ” otkaz zaštite zbog preskoka koji je kao posledica disperzije preskočnih napona nastao samo na električno pojačanoj izolaciji. Simbolom „x” biće označen događaj u kome preskok na izolaciji nije nastupio iako je došlo do pojave prenapona. Donji indeksi „S”, „G” i „F” odnoseće se respektivno na pojave i veličine vezane za jedan određeni stub S i njemu pripadajući raspon G zaštitnog užeta, odnosno raspon F faznog provodnika, a donji indeks „T” na teren u okolini trase dalekovoda. Gornji indeks „(6)” odnoseće se na pojave i veličine vezane za osnovnu, a indeksi „(7)” i „(8)” na pojave i veličine vezane za električno pojačanu izolaciju izvedenu sa 7, odnosno 8 članaka tipa K3. Najzad, indeks „DV” odnoseće se na pojave i veličine vezane za celu trasu dalekovoda.

Ukupan broj kritičnih stubova, tj. onih dalekovodnih stubova na kojima je kao mera zaštite OPGW od neželjenih preskoka primenjena električno pojačana izolacija, biće označen sa  $n^{(p)}$ ,  $p=7,8$ . Skup rednih brojeva  $v$  tih stubova biće označen sa  $N^{(p)}$ , tj. biće

$$N^{(p)} = \{v_1, v_2, \dots, v_{n^{(p)}}\} \quad p=7,8. \quad (1)$$

Parovi jednovremenih slučajnih događaja relevantnih za procenu rizika od otkaza zaštite na stubu čiji je redni broj  $v=j \in N^{(p)}$ ,  $p=7,8$  sačinjavaju skup  $D_j$ .

$$D_j = \{(*, U_a)_{A_j}^{(p)}, (*, \tilde{U})_{S_j}^{(p)}, (*\sigma, U_a)_{A_j}^{(p)}, (*\sigma, \tilde{U})_{S_j}^{(p)}\} \quad p=7,8, A \in \{S, G, F, T\} \quad (2)$$

Svakom elementu, tj. svakom paru slučajnih događaja iz skupa  $D_j$  pridružena je odgovarajuća verovatnoća nastanka tog događaja u određenom vremenskom intervalu. Verovatnoće svih tih događaja čine skup  $K_j$ , tj.

$$K_j = \{P_{A_j}^{(p)}(*, U_a), P_{S_j}^{(p)}(*, \tilde{U}), P_{A_j}^{(p)}(*\sigma, U_a), P_{S_j}^{(p)}(*\sigma, \tilde{U})\} \quad p=7,8, A \in \{S, G, F, T\} \quad (3)$$

Sa ovako usvojenim označavanjima rizik od otkaza zaštite definisan je izrazom

$$P_R = 1 - \prod_{j \in N^{(p)}} \prod_{P_{k_j} \in K_j} (1 - P_{k_j}), \quad p = 7, 8. \quad (4)$$

**Rizik od neuspešnog delovanja zaštite izvedene sa električno pojačanom izolacijom je, prema tome, brojno jednak verovatnoći da će se u jedinici vremena (na pr. jednoj godini) bar na jednom od  $n^{(p)}$ ,  $p = 7, 8$  stubova na kojima je u cilju zaštite primenjena ova zaštitna mera, dogoditi preskok na izolaciji.**

Kao što će se videti iz narednog izlaganja, za potrebe ovakvih i sličnih analiza mogu biti od koristi i još dve paralelne formule. Prva služi za procenu verovatnoće  $P_{DV}(*, U_a)$  nastanka preskoka na izolaciji kod pojave atmosferskog prenapona na trasi dalekovoda

$$P_{DV}(*, U_a) = 1 - \prod_{j=1}^{n_{DV}} \prod_{P_{k_j} \in K_{aj}} (1 - P_{k_j}), \quad (5)$$

a druga služi za procenu verovatnoće  $P_{DV}(*, U)$  nastanka preskoka na izolaciji kod pojave prenapona industrijske učestanosti na trasi dalekovoda

$$P_{DV}(*, \tilde{U}) = 1 - \prod_{j=1}^{n_{DV}} \prod_{P_{k_j} \in \tilde{K}_j} (1 - P_{k_j}). \quad (6)$$

U gornjim izrazima  $n_{DV}$  je ukupan broj stubnih mesta na dalekovodu, a sa  $K_{aj}$  i  $K_j$  su u skladu sa napred usvojenim simbolima označeni skupovi

$$K_{aj} = \{P_{Aj}(*, U_a), P_{Aj}(*\sigma, U_a)\} \\ A \in \{S, G, F, T\} \quad (7)$$

$$\tilde{K}_j = \{P_{Sj}(*, \tilde{U}), P_{Sj}(*\sigma, \tilde{U})\} \quad (8)$$

Pomoću (5) i (6) dobija se verovatnoća nastanka svih preskoka na dalekovodu koji su nastali kao posledica bilo atmosferskih prenapona, bilo prenapona industrijske učestanosti

$$P_{DV}(*, U_a \vee \tilde{U}) = P_{DV}(*, U_a) + P_{DV}(*, \tilde{U}) - \\ - P_{DV}(*, U_a) \cdot P_{DV}(*, \tilde{U}). \quad (9)$$

#### 4.2. Verovatnoće preskoka zbog direktnih atmosferskih pražnjenja u stub, zaštitno uže i fazni provodnik

Prve tri verovatnoće iz skupa  $K_j$ , kao verovatnoće dve jednovremene pojave „\*” i „ $U_a$ ”, na stubu sa rednim brojem  $j$  i na njemu pripadajućim rasponima

izračunavaju se za osnovnu i pojačanu izolaciju prema izrazima

$$P_{Aj}^{(m)}(*, U_a) = P_{Aj}^{(m)}(* | U_a) \cdot P_A(U_a), \\ m \in \{6, 7, 8\}, A \in \{S, G, F\} \quad (10)$$

Ovde su  $P_S(U_a)$ ,  $P_G(U_a)$  i  $P_F(U_a)$  apsolutne verovatnoće nastanka atmosferskog prenapona na jednom stubu od ukupno  $n_{DV}$  dalekovodnih stubova, odnosno apsolutne verovatnoće nastanka atmosferskog prenapona na rasponima koji pripadaju tom stubu. Sve tri verovatnoće se procenjuju pomoću očekivanog broja  $N_{aS}$  atmosferskih pražnjenja na svim stubovima, očekivanog broja  $N_{aG}$  atmosferskih pražnjenja na svim rasponima zaštitnog užeta i očekivanog broja  $N_{aF}$  atmosferskih pražnjenja na svim rasponima faznih provodnika na celoj trasi voda u toku godine dana. Uz pretpostavku da se u toku jedne proizvoljne sekunde na dalekovodu ne mogu istovremeno pojaviti dva atmosferska prenapona i uz uvažavanje činjenice da se u toku godine na jednom istom elementu voda atmosferski prenapon može pojaviti više nego jedanput, pomenute verovatnoće sračunavaju se preko formule

$$P_i(U_a) = 1 - (1 - n_i/n_t)^{n_i/n_{DV}} \quad i \in \{S, G, F\} \quad (11)$$

sukcesivnom zamenom  $n_i$  sa  $N_{aS}$ ,  $N_{aG}$  i  $N_{aF}$ . U gornjem izrazu  $n_t$  je broj sekundi u godini dana, tj.  $n_t = 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 = 31\,557\,600$ , a  $n_{DV}$  je ukupan broj stubova na celoj trasi dalekovoda.

Verovatnoća  $P_{Sj}^{(m)}(* | U_a)$ ,  $m \in \{6, 7, 8\}$ , je uslovna verovatnoća nastanka preskoka na izolaciji zbog pojave atmosferskog prenapona na stubu sa rednim brojem  $j$ . To je složena verovatnoća koja je jednaka verovatnoći dva jednovremena, međusobno nezavisna događaja: Prvi događaj je nastanak struje atmosferskog pražnjenja  $I_a$  određenog intenziteta  $I$  na stubu  $j$ . Taj događaj ima pojavnu verovatnoću  $P_{Sj}^{(m)}(I_a = I | U_a)$ ,  $m \in \{6, 7, 8\}$ . Drugi događaj je pojava preskoka na izolaciji usled povišenog potencijala na ekvivalentnoj udarnoj impedansi stuba  $Z_{ES}$  nastalog zbog struje  $I_a$ . Verovatnoća ovog događaja je

$$P_{Sj}^{(m)}(* | U = Z_{ES} I_a) = P_{Sj}^{(m)}(* | I_a = I). \quad (12)$$

Sa ovakvim označavanjima uslovna verovatnoća  $P_{Sj}^{(m)}(* | U_a)$  može se predstaviti kao proizvod

$$P_{Sj}^{(m)}(* | U_a) = P_{Sj}^{(m)}(* | I_a = I) \cdot P_{Sj}^{(m)}(I_a = I | U_a) \\ m \in \{6, 7, 8\} \quad (13)$$

Prva od dve verovatnoće na desnoj strani poslednjeg izraza posmatrana kao matematički objekat predstavlja diferencijal po nezavisnoj promenljivoj  $I$  i može se izraziti kao

$$P_{Sj}^{(m)}(*|I_a = I) = f^{(m)}(u) du = \\ = f^{(m)}(Z_{ES}I) d(Z_{ES}I) = Z_{ES} \varphi_S^{(m)}(I) dI, \quad (14)$$

gde je  $f^{(m)}$  Gausova (normalna) funkcija raspodele gustine verovatnoća preskočnih napona izolatorskog lanca sa  $m$  članaka [2,9,10]

$$f^{(m)}(u) = \frac{1}{\sigma^{(m)} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{u - U_{50\%}^{(m)}}{\sigma^{(m)}}\right)^2\right\} \\ m \in \{6,7,8\} \quad (15)$$

i gde je funkcija  $\varphi_S^{(m)}(I)$  definisana kao

$$\varphi_S^{(m)}(I) = f^{(m)}(Z_{ES}I), \quad m \in \{6,7,8\} \quad (16)$$

U izrazu (15)  $\sigma^{(m)}$  je standardna devijacija preskočnih napona sračunata u odnosu na udarni pedesetpostotni preskočni napon  $U_{50\%}^{(m)}$  izolacije izvedene sa  $m$  članaka.

Kada struja  $I_a$  uzima sve moguće vrednosti struje groma  $I$  iz opsega  $I_{amin} \leq I \leq I_{amax}$  u kome se  $I$  kontinualno menja, tada s obzirom na izraz (14) uslovna verovatnoća  $P_{Sj}^{(m)}(*|I_a = I)$  sračunata za ceo taj opseg dobija integralnu formu:

$$P_{Sj}^{(m)}(*|I_a = I) = Z_{ES} \int_{I_{amin}}^{I_{amax}} \varphi_S^{(m)}(I) dI \quad (17)$$

Pošto se struja atmosferskog pražnjenja  $I$  kontinualno menja od svoje najmanje do svoje najveće moguće vrednosti, tada u skladu sa definicijom verovatnoće mora biti  $P_{Sj}^{(m)}(I_a = I | U_a) = 0$  za svako  $I$  iz opsega  $I_{amin} \leq I \leq I_{amax}$  [9]. Da bi se prevazišle formalne teškoće koje zbog te činjenice mogu iskrsnuti pri kvantitativnoj proceni ove verovatnoće, bazu za razmatranja koja slede predstavljaće sledeći identitet

$$P_{Sj}^{(m)}(I_a = I | U_a) \equiv \\ \equiv P_{Sj}^{(m)}((I - 0,5 \text{ kA} \leq I_a \leq I + 0,5 \text{ kA}) | U_a) \quad (18)$$

Drugim rečima, pod verovatnoćom događaja  $I_a = I$  podrazumevaće se verovatnoća događaja u kome struja  $I_a$  može biti jednaka bilo kojoj vrednosti iz opsega  $I - 0,5 \text{ kA} \leq I_a \leq I + 0,5 \text{ kA}$ . Uz ovakvu ogradu koja predstavlja aproksimaciju kojom se obezbeđuje izvesna rezerva u proceni verovatnoće dobija se

$$P_{Sj}^{(m)}(I_a = I | U_a) = \int_{I-0,5}^{I+0,5} p(y) dy, \quad m \in \{6,7,8\} \quad (19)$$

pri čemu je  $p(I)$  gustina verovatnoće struje groma  $I$  koja se dobija diferenciranjem po  $I$  kumulativne verovatnoće  $P(I_a \leq I)$  koja je tabelarno data u članu 83. Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV [1], tj.

$$p(I) = \frac{\partial}{\partial I} P(I_a \leq I) \quad (20)$$

Vrednosti funkcije  $p(I)$  dobijene diferenciranjem funkcije  $P(I_a \leq I)$  date su u tabeli 1.

Tabela 1.

Gustina verovatnoće struje groma prema Pravilniku [1]

(kA)	2	3	4	5
$p(I)$	0,013 81	0,032 39	0,058 64	0,063 06
(kA)	6	7	8	10
$p(I)$	0,057 19	0,052 56	0,049 17	0,046 10
(kA)	12	15	20	25
$p(I)$	0,044 85	0,040 55	0,025 70	0,010 41
(kA)	30	50	60	80
$p(I)$	0,004 68	0,001 98	0,000 48	0,000 30

Sada opšti izraz za uslovnu verovatnoću  $P_{Sj}^{(m)}(*|U_a)$  za stub  $j$  dobija oblik

$$P_{Sj}^{(m)}(*|U_a) = Z_{ES} \int_{I_{amin}}^{I_{amax}} dI \int_{I-0,5}^{I+0,5} \varphi_S^{(m)}(I) \cdot p(y) dy \\ m \in \{6,7,8\} \quad (21)$$

Istovetnom procedurom dolazi se do sasvim analognih izraza za uslovne verovatnoće preskoka zbog atmosferskog pražnjenja na zaštitnom užetu u rasponu  $j$  (indeks  $G$ ) i faznom provodniku u rasponu  $j$  (indeks  $F$ ), tako da se sve tri uslovne verovatnoće iz (10) mogu prikazati na jedinstven način u obliku

$$P_{Aj}^{(m)}(*|U_a) = Z_{EA} \int_{I_{amin}}^{I_{amax}} dI \int_{I-0,5}^{I+0,5} \varphi_A^{(m)}(I) \cdot p(y) dy \\ m \in \{6,7,8\}, A \in \{S, G, F\} \quad (22)$$

gde je

$$\varphi_A^{(m)}(I) = f^{(m)}(Z_{EA}I) \quad m \in \{6,7,8\} \\ A \in \{S, G, F\} \quad (23)$$

U navedenim izrazima  $Z_{EA}$ ,  $A \in \{S, G, F\}$ , su ekvivalentne udarne impedanse stuba  $j$  i njemu pripadajućeg zaštitnog užeta, odnosno faznog provodnika.

Kod dalekovoda br. 1005 za verovatnoću  $P_{S_j}^{(m)} (*|U_a)$  dobijene su prosečne vrednosti oko 0,007 44, za verovatnoću  $P_G^{(m)} (*|U_a)$  prosečne vrednosti oko 0,004 70, a za verovatnoću  $P_F^{(m)} (*|U_a)$  prosečna vrednost 0,041 69.

### 4.3. Verovatnoće preskoka zbog indirektnih atmosferskih pražnjenja u okolni teren

Maksimalne vrednosti napona  $U_{max}$  (u kV) koje na dalekovodu indukuju struje indirektnog atmosferskog pražnjenja  $I_a$  (u kA) procenjuju se ([8], strana 1/20) prema izrazu

$$U_{max} \leq 30 \frac{I_a h}{x} \quad (24)$$

u kome je  $h$  (u m) srednja visina zaštitnog užeta, a  $x$  (u m) udaljenost mesta indirektnog pražnjenja od ose dalekovoda.

Verovatnoća preskoka na izolaciji stuba sa rednim brojem  $j$  zbog prenapona koji je na vodu indukovala struja indirektnog atmosferskog pražnjenja u okolni teren, data je izrazom

$$P_{T_j}^{(m)} (*, U_a) = P_T^{(m)} (*|U_a) \cdot P_{T_j}(U_a) \quad m \in \{6, 7, 8\} \quad (25)$$

Apsolutna verovatnoća  $P_T j(U_a)$  nastanka atmosferskog prenapona na stubu  $j$  zbog indirektnih pražnjenja procenjuje se pomoću očekivanog broja  $N_{aT}$  atmosferskih pražnjenja u okolni teren na celoj trasi voda u toku jedne godine prema formuli (11) zamenom  $n_i = N_{aT}$ .

Uslovna verovatnoća može se s obzirom na (24) napisati u obliku

$$P_T^{(m)} (*|U_a) = P_T^{(m)} \left( *|U_a = 30 \frac{I_a h}{x} \right) \quad m \in \{6, 7, 8\} \quad (26)$$

odakle se vidi da je ta verovatnoća složena verovatnoća koja pre svega zavisi od verovatnoće da će prenapon  $U_a$  indukovati od struje groma  $I_a$  koja je pogodila tlo na rastojanju  $x^*$  metara od ose dalekovoda izazvati preskok na pojačanoj izolaciji, zatim od verovatnoće da će grom pogoditi tlo tačno na rastojanju  $x^*$  metara od ose dalekovoda i najzad od verovatnoće da će struja groma upravo imati vrednost  $I_a$ . Za  $m \in \{6, 7, 8\}$  ove zavisnosti impliciraju sledeće relacije

$$P_T^{(m)} (*|U_a) = P_T^{(m)} (*|I_a = I, x^* = x) \cdot P_T^{(m)} (I_a = I, x^* = x|U_a) \quad (27)$$

$$P_T^{(m)} (I_a = I, x^* = x|U_a) = P_T^{(m)} (I_a = I|U_a) \cdot P_T^{(m)} (x^* = x|U_a) \quad (28)$$

Analogno sa (19) prva verovatnoća na desnoj strani (28) je

$$P_T^{(m)} (I_a = I|U_a) = \int_{I-0,5}^{I+0,5} p(y) dy \quad m \in \{6, 7, 8\} \quad (29)$$

Ako se širina pojasa indirektnih pražnjenja podeli na dovoljno male i međusobno jednake segmente  $\Delta x$ , tada će druga verovatnoća na desnoj strani (28) biti količnik

$$P_T^{(m)} (x^* = x|U_a) \approx \frac{\Delta x}{x_{max} - x_{min}} \quad m \in \{6, 7, 8\} \quad (30)$$

gde je  $x_{max}$  udaljenost spoljašnje ivice atraktivnog pojasa indirektnih pražnjenja od ose dalekovoda, a  $x_{min}$  udaljenost unutrašnje ivice tog pojasa od ose dalekovoda. U praktičnim proračunima zadovoljavajuća tačnost dobija se kada se usvoji  $\Delta x = 1$  m.

Pošto se struja kontinualno menja u opsegu  $I_{amin} \leq I \leq I_{amax}$ , a rastojanje  $x$  u opsegu  $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ , tada se prema izrazu (27) uslovna verovatnoća  $P_T^{(m)} (*|U_a)$  s obzirom na (29) i (30) može prikazati u obliku

$$P_T^{(m)} (*|U_a) = \frac{30 h}{x_{max} - x_{min}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} dx \int_{I_{amin}}^{I_{amax}} dI \int_{I-0,5}^{I+0,5} \frac{1}{x} \phi_T^{(m)}(x, I) p(y) dy \quad m \in \{6, 7, 8\} \quad (31)$$

gde je sada

$$\phi_T^{(m)}(x, I) = f^{(m)} \left( 30 \frac{I h}{x} \right) \quad (32)$$

a funkcija  $f^{(m)}(u)$  je Gausova (normalna) funkcija definisana sa (15).

Uzimajući da je  $h$  jednako srednjoj visini zaštitnog užeta na celoj trasi voda, kod dalekovoda br. 1005 za verovatnoću  $P_T^{(m)} (*|U_a)$  dobijena je prosečna vrednost od 0,002 47.

### 4.4. Verovatnoće preskoka zbog prenapona industrijske učestanosti

Verovatnoća preskoka na osnovnoj, odnosno električno pojačanoj izolaciji stuba sa rednim brojem  $j$  koji su nastali zbog pojave prenapona industrijske učestanosti na vodu, jednaka je proizvodu:

$$P_{S_j}^{(m)} (*, \tilde{U}) = P_{DV}^{(m)} (*|\tilde{U}) \cdot P_{S_j}(\tilde{U}) \quad m \in \{6, 7, 8\} \quad (33)$$

gde je  $P_{DV}^{(m)}(*|\tilde{U})$  uslovna verovatnoća preskoka na izolaciji zbog prenapona industrijske učestanosti  $\tilde{U}$  na vodu.

Da bi se izbegli eventualni nesporazumi u vezi sa procenom apsolutne verovatnoće  $P_{Sj}(\tilde{U})$ , potrebno je učiniti određene napomene. Naime, prenapon industrijske učestanosti koji nastaje kao posledica zemljospoja u mreži, napreže izolaciju na svim dalekovodnim stubovima. Za razliku od atmosferskih prenapona kod kojih je sasvim realno očekivati da jedan određeni stub bude ili ne bude pogođen prenaponom, kod prenapona industrijske učestanosti događaj „pojava prenapona industrijske učestanosti na jednom određenom dalekovodnom stubu” predstavlja fiktivan događaj, jer je prenapon istovremeno prisutan na celoj trasi voda.

Ipak, preskok po pravilu nastaje samo na izolaciji jednog stuba i to onoga na kome je, zbog delovanja više faktora u njegovom okruženju, izolaciona čvrstoća najviše smanjena. Zbog toga pomenuti fiktivni događaj treba shvatiti kao složeni događaj koji ima dve jednovremene faze – jednu dugotrajnu, koja se ogleda u smanjenju izolacione čvrstoće na stubu i drugu kratkotrajnu, koju karakteriše pojava prenapona učestanosti 50 Hz. U periodu eksploatacije dalekovoda na čijoj trasi nema zagađivača svaki njegov stub u opštem slučaju ima približno istu verovatnoću  $p_S$  da mu izolacija bude kontaminirana u trenutku pojave prenapona industrijske učestanosti, pa nema prepreka da se verovatnoća pojave prenapona na celoj trasi dalekovoda  $P_{DV}$  posmatra kao složena verovatnoća koja je sa verovatnoćom  $p_S$  vezana relacijom

$$P_{DV} = 1 - (1 - p_S)^{n_{DV}} \quad (34)$$

gde je  $n_{DV}$  ukupan broj stubova na dalekovodu. U skladu sa ovim nema ni formalnih teškoća da se iz gornje relacije izračuna  $p_S$  kada se zna  $P_{DV}$  i  $n_{DV}$ :

$$p_S = 1 - (1 - P_{DV})^{1/n_{DV}}, \quad (35)$$

koja verovatnoća se uz napred iznesene ograde formalno može i prihvatiti kao apsolutna verovatnoća  $P_{Sj}(U)$  pojave prenapona industrijske učestanosti na stubu sa rednim brojem  $j$ . Sada se prema (11) može pisati

$$P_{Sj}(\tilde{U}) = 1 - \left(1 - \tilde{N}_{DV}/n_t\right)^{1/n_{DV}}. \quad (36)$$

Uslovna verovatnoća  $P_{DV}^{(m)}(*|\tilde{U})$ ,  $m \in \{6, 7, 8\}$  zavisi od efektivne vrednosti prenapona  $\tilde{U}$ . Pošto sklopni prenaponi počinju da igraju приметnu ulogu na vodovima 220 kV i više, u našim 110 kV mrežama prenaponi industrijske učestanosti mahom su po-

sledica zemljospoja. Kako ove mreže rade sa efikasno uzemljenom neutralnom tačkom prenaponi industrijske učestanosti u njima ne prelaze 80 % vrednosti složenog napona [2,7]. Prema tome ove prenapone treba očekivati u opsegu

$$\tilde{U}_{\min} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max U_n < \tilde{U} \leq 0,8 \cdot \max U_n = \tilde{U}_{\max}, \quad (37)$$

gde je sa  $\max U_n$  označen najviši međufazni pogonski napon mreže. Uslovna verovatnoća  $P_{DV}^{(m)}(*|U)$  je sada:

$$\begin{aligned} P_{DV}^{(m)}(*|\tilde{U}) &= \int_{\tilde{U}_{\min}}^{\tilde{U}_{\max}} \tilde{f}^{(m)}(u) du = \\ &= \frac{1}{\tilde{\sigma}^{(m)} \sqrt{2\pi}} \int_{\tilde{U}_{\min}}^{\tilde{U}_{\max}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u - \tilde{U}_{50\%}^{(m)}}{\tilde{\sigma}^{(m)}}\right)^2\right) du \end{aligned} \quad (38)$$

U gornjem izrazu  $\tilde{\sigma}^{(m)}$  je standardna devijacija preskočnih napona industrijske učestanosti sračunata u odnosu na naizmenični pedesetpostotni preskočni napon  $\tilde{U}_{50\%}^{(m)}$  izolacije izvedene sa  $m$  članaka.

Kod realnih vodova 110 kV podnosivi napon osnovne izolacije po pravilu ubedljivo premašuje očekivane prenapone industrijske učestanosti navedene u izrazu (37), što upućuje na zaključak da se preskoci događaju u uslovima smanjene izolacione čvrstoće lanaca.

Prema podacima iz literature [2] aerokontaminacija u kombinaciji sa vlagom može da smanji čvrstinu izolacije i do četiri puta, pa stoga korektna primena formule (38) podrazumeva poznavanje stvarnih, tj. umanjjenih vrednosti pedesetpostotnih preskočnih napona  $\tilde{U}_{50\%}^{(m)}$  i umanjjenih vrednosti standardnih devijacija  $\tilde{\sigma}^{(m)}$ . Objektivna procena ovog umanjjenja dobija se iz podataka o kvarovima i ispadima tokom višegodišnje eksploatacije voda.

Ako je poznat prosečan godišnji broj preskoka zbog prenapona industrijske učestanosti  $\tilde{N}_{DV}^*$  koji su se dogodili na celoj trasi voda, umanjene vrednosti pedesetpostotnog preskočnog napona  $\tilde{U}_{50\%}^{(m)}$  i standardne devijacije  $\tilde{\sigma}^{(m)}$  procenjuju se pomoću jednačine

$$\prod_{m \in \{6,7,8\}} \left(1 - P_{DV}^{(m)}(*|\tilde{U}) \cdot P_{Sj}(\tilde{U})\right)^{n_t} = \left(1 - \frac{\tilde{N}_{DV}^*}{n_t}\right)^{n_t} \quad (39)$$

u kojoj veličine  $\tilde{U}_{50\%}^{(m)}$  i  $\tilde{\sigma}^{(m)}$  iz (38) treba izabrati tako da uslovne verovatnoće  $P_{DV}^{(m)}(*|\tilde{U})$ ,  $m \in \{6, 7, 8\}$ , zadovoljavaju (39).

Simbol  $n_{DV}^{(m)}$  označava broj stubova na trasi voda na kojima je primenjena izolacija sa  $m$  članaka, a  $n_t$  je definisano u (11). Jednačina (39) neposredna je posledica (6).

Navedena procena bazira se na pretpostavci da su kod aerokontaminacije dalekovoda izolacione čvrstoće i osnovne i pojačane izolacije smanjene u istom odnosu, kao i da su standardne devijacije smanjene u istom odnosu kao i njihovi pedesetpostotni preskočni naponi.

Na DV 1005 za verovatnoću  $P_{DV}^{(m)}(*|\tilde{U})$  dobijena je vrednost 0,150 5 za osnovnu i 0,009 95 za pojačanu izolaciju sa 7 članaka.

#### 4.5. Verovatnoća otkaza zaštite zbog nastanka preskoka samo na pojačanoj izolaciji

##### 4.5.1. Verovatnoća otkaza pri udarnim prenaponima

Teoretski ova pojava je posledica disperzije preskočnih napona oko udarnog pedesetpostotnog preskočnog napona izolacije. Ako je to rasipanje dovoljno veliko, postoji verovatnoća da osnovna izolacija izdrži udarni prenaponski talas bez preskoka, a da pojačana izolacija koja se nalazi na istom ili na susednom stubu reaguje sa preskokom. Ta verovatnoća je utoliko veća ukoliko je razlika pedesetpostotnih preskočnih napona osnovne i pojačane izolacije manja i ukoliko su standardne devijacije ovih napona veće.

Generalno gledano, pojava je moguća kod sve četiri vrste atmosferskih pražnjenja: kod udara u stub ( $S$ ), u zaštitno uže ( $G$ ), u fazni provodnik ( $F$ ) i u okolni teren ( $T$ ). Verovatnoća pojave svedene na jedan stub sa rednim brojem  $j$ , odnosno na njemu pripadajući raspon je

$$P_{Aj}^{(p)}(*\sigma, U_a) = P_{Aj}^{(p)}(*\sigma | U_a) \cdot P_A(U_a) \quad (40)$$

$$p = 7,8, A \in \{S, G, F, T\}$$

Apsolutne verovatnoće  $P_S(U_a)$ ,  $P_G(U_a)$ ,  $P_F(U_a)$  i  $P_T(U_a)$  dobijaju se kao i ranije pomoću izraza (11). Uslovna verovatnoća  $P_{Sj}^{(p)}(*\sigma | U_a)$  jednaka je složenoj verovatnoći dva nezavisna jednovremena događaja. Ona se dobija kao proizvod: (a) verovatnoće preskoka na pojačanoj izolaciji na stubu  $j$  i (b) verovatnoće izostanka preskoka na osnovnoj izolaciji na istom, ili susednom stubu. Oba događaja dešavaju se pri pojavi udarnog prenapona  $U_a$  nastalog usled struje groma  $I_a$ . Skup svih ovih događanja ima pojavnu verovatnoću

$$P_{Sj}^{(p)}(*\sigma | U_a) = P_{Sj}^{(p)}(*|U_a = U) \cdot P_{Sj}^{(6)}(\times | U_a \geq U) \cdot P_{Sj}^{(p)}(I_a = I | U_a = U), p = 7,8. \quad (41)$$

Prva od tri verovatnoće na desnoj strani (41) po svojoj matematičkoj prirodi je diferencijal:

$$P_{Sj}^{(p)}(*|U_a = U) = f^{(p)}(U_a) du = f^{(p)}(Z_{ES}^{(p)} I_a) d(Z_{ES}^{(p)} I_a) = Z_{ES}^{(p)} \phi_S^{(p)}(I_a) dI_a \quad (42)$$

a druga je integral

$$P_{Sj}^{(6)}(\times | U_a \geq U) = \int_U^{U_{a \max}} f^{(6)}(u) du = Z_{ES}^{(6)} \int_I^{I_{a \max}} \phi_S^{(6)}(\xi) d\xi \quad (43)$$

Treća verovatnoća je takođe integral i računa se prema (19). Funkcije  $f^{(6)}(u)$  i  $f^{(p)}(u)$ ,  $p = 7,8$  definisane su sa (15), a funkcije  $\phi_S^{(6)}(\xi)$  i  $\phi_S^{(p)}(\xi)$ ,  $p = 7,8$  sa (16). Impedanse  $Z_{ES}^{(6)}$  i  $Z_{ES}^{(p)}$ ,  $p = 7,8$  su udarne impedanse stubova sa osnovnom i pojačanom izolacijom, respektivno.

U opsegu svih mogućih vrednosti struja atmosferskog pražnjenja uslovna verovatnoća  $P_{Sj}^{(p)}(*\sigma | U_a)$  se prema izrazu (41) može napisati u obliku

$$P_{Sj}^{(p)}(*\sigma | U_a) = Z_{ES}^{(p)} Z_{ES}^{(6)} \int_{I_{a \min}}^{I_{a \max}} \left( \phi_S^{(p)}(I) \int_{\xi=I}^{I_{a \max}} \phi_S^{(6)}(\xi) d\xi \int_{y=I-0,5}^{I+0,5} p(y) dy \right) dI \quad (44)$$

U skladu sa ovim rezultatom uslovne verovatnoće  $P_{Sj}^{(p)}(*\sigma | U_a)$ ,  $P_{Gj}^{(p)}(*\sigma | U_a)$  i  $P_{Fj}^{(p)}(*\sigma | U_a)$  mogu se na jedinstven način izraziti pomoću formule

$$P_{Aj}^{(p)}(*\sigma | U_a) = Z_{EA}^{(p)} Z_{EA}^{(6)} \int_{I_{a \min}}^{I_{a \max}} dI \int_I^{I_{a \max}} d\xi \int_{I-0,5}^{I+0,5} \phi_A^{(p)}(I) \phi_A^{(6)}(\xi) p(y) dy \quad (45)$$

u kojoj je kao i ranije

$$\phi_A^{(m)}(I) = f^{(m)}(Z_{EA} I) \quad m \in \{6,7,8\}$$

$$A \in \{S, G, F\} \quad (46)$$

a  $f^{(m)}(u)$  definisano sa (15).

Na DV 1005 verovatnoća  $P_{Sj}^{(7)}(*\sigma | U_a)$  na 6 kritičnih stubova je reda  $10^{-6}$  i  $10^{-4}$ , dok je na preostalim kritičnim stubovima reda  $10^{-2}$ . Na istim stubovima verovatnoća  $P_{Sj}^{(8)}(*\sigma | U_a)$  je u opsegu od  $10^{-14}$  do  $10^{-5}$ . Verovatnoća  $P_{Gj}^{(7)}(*\sigma | U_a)$  je na 5 od  $n^{(p)}$  stubova reda  $10^{-6}$  i  $10^{-5}$ , dok je na preostalim stubovima reda  $10^{-3}$ . Verovatnoća  $P_{Gj}^{(8)}(*\sigma | U_a)$  je u opsegu od  $10^{-10}$  do  $10^{-5}$ . Verovatnoća  $P_{Fj}^{(7)}(*\sigma | U_a)$  na svih kritičnim stubovima ne prelazi  $10^{-4}$ , a verovatnoća  $P_{Fj}^{(8)}(*\sigma | U_a)$  ne prelazi  $10^{-13}$ .

Analitički izraz uslovne verovatnoće  $P_{Tj}^{(p)}(*\sigma | U_a)$  je nešto složeniji, jer se integracija sprovodi i po širini atraktivnog pojasa indirektnih atmosferskih pražnjenja, pa je u ovom slučaju

$$P_{Tj}^{(p)}(*\sigma | U_a) = \frac{30^2 h^{(6)} h^{(p)}}{x_{\max} - x_{\min}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} dx \int_{I_{a \min}}^{I_{a \max}} \frac{1}{x^2} \phi_T^{(p)}(x, I) \Psi_T^{(6)}(x, I) dI \quad (47)$$

$$p = 7,8$$

pri čemu je

$$T^{(6)}(x, I) = \int_I^{I_{a \max}} d\xi \int_{I-0,5}^{I+0,5} \varphi_T^{(6)}(x, \xi) p(y) dy \quad (48)$$

U poslednjim izrazima  $h^{(6)}$  i  $h^{(p)}$  su visine (u m) zaštitnog užeta u okolini stuba sa osnovnom i pojačanom izolacijom, respektivno, a funkcije  $\varphi$  definirane su preko normalne funkcije  $f^{(m)}(u)$  kako sledi:

$$\varphi_T^{(6)}(I, h^{(6)}, x) = f^{(6)}\left(30I \frac{h^{(6)}}{x}\right) \quad (49)$$

$$\varphi_T^{(p)}(I, h^{(p)}, x) = f^{(p)}\left(30I \frac{h^{(p)}}{x}\right), \quad p = 7, 8. \quad (50)$$

Na DV 1005 verovatnoća  $P_{T_j}^{(7)}(*\sigma | U_a)$  na 6 kritičnih stubova ne prelazi  $10^{-4}$ , dok je na preostalim kritičnim stubovima reda  $10^{-3}$ . Verovatnoća  $P_S^{(8)}(*\sigma | U_a)$  je na svim kritičnim stubovima u opsegu od  $10^{-15}$  do  $10^{-4}$ , osim na jednom na kome dostiže vrednost 0,001 297 (što može da bude i posledica numeričkih problema u izračunavanju!). Ove verovatnoće, prema tome, samo izuzetno nisu zanemarive.

#### 4.5.2. Verovatnoća otkaza pri prenaponima industrijske učestanosti

Verovatnoća nastanka otkaza zaštite zbog preskoka samo na pojačanoj izolaciji računa se prema izrazu

$$P_{S_j}^{(p)}(*\sigma, \tilde{U}) = P_{DV}^{(p)}(*\sigma | \tilde{U}) P_{S_j}(\tilde{U}), \quad p = 7, 8. \quad (51)$$

Apsolutna verovatnoća  $P_{S_j}(\tilde{U})$  da će se u toku godine na jednom od ukupno  $n_{DV}$  stubova pojaviti prenapon industrijske učestanosti, dobija se pomoću izraza (8) iz ukupnog godišnjeg broja prenapona industrijske učestanosti na dalekovodu  $\tilde{N}_{DV}$ . Do uslovne verovatnoće  $P_{DV}^{(p)}(*\sigma | \tilde{U})$  dolazi se sličnom analizom kao kod udarnih prenapona. Analiza dovodi do istovetnog zaključka o složenoj prirodi ove verovatnoće, ali za razliku od prethodnog slučaja ovde se integracija sprovodi po prenaponima koji se kreću u opsegu datom sa (37).

$$P_{DV}^{(p)}(*\sigma | \tilde{U}) = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} du \int_u^{U_{\max}} f^{(p)}(u) f^{(6)}(v) dv \quad (52)$$

$p = 7, 8.$

Podintegralne funkcije gustine verovatnoća  $f^{(6)}(v)$  i  $f^{(p)}(v)$  imaju isti oblik kao u (38) s tim što se u njima uzimaju preskočni naponi i standardne devijacije koje odgovaraju kontaminiranoj izolaciji.

Na DV 1005 dobijeno je da verovatnoća  $P_{DV}^{(7)}(*\sigma | \tilde{U})$  iznosi 0,000 691, a da je verovatnoća  $P_{DV}^{(8)}(*\sigma | \tilde{U})$

$(*\sigma | \tilde{U})$  reda  $10^{-8}$ , što znači da ni ove verovatnoće bitno ne utiču na krajnji rezultat.

## 5. IZOLACIONA SVOJSTVA IZOLATORSKIH LANACA NA DV 1005

### 5.1. Udarne izolaciona svojstva lanaca

Prema [2,3,4,5] u analizi su korišćeni sledeći podaci za izolatorske lance osnovne izolacije sa 6 članaka K3, izolatorske lance električno pojačane izolacije sa 7 članaka (gornji indeks „(7)”) i izolatorske lance električno pojačane izolacije sa 8 članaka (gornji indeks „(8)”):

pedesetpostotni preskočni udarni naponi

$$U_{50\%}^{(6)} = 494 \text{ kV}, U_{50\%}^{(7)} = 560 \text{ kV}, U_{50\%}^{(8)} = 657 \text{ kV}$$

podnosivi (10 % preskočni) udarni naponi

$$U_{10\%}^{(6)} = 475 \text{ kV}, U_{10\%}^{(7)} = 538 \text{ kV}, U_{10\%}^{(8)} = 632 \text{ kV}$$

„stopostotni” (90 %) preskočni udarni naponi

$$U_{90\%}^{(6)} = 513 \text{ kV}, U_{90\%}^{(7)} = 582 \text{ kV}, U_{90\%}^{(8)} = 682 \text{ kV}$$

standardne devijacije

$$\sigma^{(6)} = 14,82 \text{ kV}, \sigma^{(7)} = 16,80 \text{ kV}, \sigma^{(8)} = 19,71 \text{ kV}.$$

### 5.2. Izolaciona svojstva lanaca pri industrijskoj učestanosti

Na osnovu podataka iz istih, napred pomenutih izvora dobijeni su za sve tri vrste izolacije sledeći podnosivi i preskočni naponi industrijske učestanosti i odgovarajuće standardne devijacije:

pedesetpostotni preskočni naponi 50Hz

$$\tilde{U}_{50\%}^{(6)} = 288 \text{ kV}, \tilde{U}_{50\%}^{(7)} = 314 \text{ kV}, \tilde{U}_{50\%}^{(8)} = 377 \text{ kV}$$

podnosivi (10% preskočni) naponi 50 Hz

$$\tilde{U}_{10\%}^{(6)} = 266 \text{ kV}, \tilde{U}_{10\%}^{(7)} = 290 \text{ kV}, \tilde{U}_{10\%}^{(8)} = 348 \text{ kV}$$

„stopostotni” (90 %) preskočni naponi 50 Hz

$$\tilde{U}_{90\%}^{(6)} = 310 \text{ kV}, \tilde{U}_{90\%}^{(7)} = 338 \text{ kV}, \tilde{U}_{90\%}^{(8)} = 393 \text{ kV}$$

standardne devijacije 50 Hz

$$\tilde{\sigma}^{(6)} = 17,29 \text{ kV}, \tilde{\sigma}^{(7)} = 18,85 \text{ kV}, \tilde{\sigma}^{(8)} = 22,62 \text{ kV}.$$

U proteklom desetogodišnjem periodu eksploatacije dalekovoda br. 1005 na trasi je bio ukupno  $n_{DV}^{(6)} = 21$  stub sa osnovnom izolacijom i  $n_{DV}^{(7)} = 17$  stubova sa električno pojačanom izolacijom. U istom vremenskom periodu (rezultat (74) u tači 8.2.) evidentiran je prosečan godišnji broj preskoka zbog prenapona industrijske učestanosti  $\tilde{N}_{DV}^* = 0,587 38$ , a prosečan godišnji broj prenapona industrijske učestanosti procenjen je na  $\tilde{N}_{DV} = 7,275 19$ . Iz prve od ove dve vrednosti dobija se da je desna strana jednačine (39) jednaka 0,555 80, a iz druge vrednosti pomoću (36) dobija se 0,174 24. Sa ovim rezultatima preko jednačine (39) procenjuje se da su podnosivi i preskočni naponi izolacije smanjeni 2,745 puta što se slaže sa podacima iz reference [2] prema kojima aerokontaminacija u kombinaciji sa vlagom može da smanji čvrstinu izolacije i do četiri puta.

Uzimajući u obzir tako dobijeno smanjenje izolacione čvrstoće pri proceni rizika neuspešnog delovanja električno pojačane izolacije računalo se sa sledećim smanjenim vrednostima podnosivih i preskočnih napona industrijske učestanosti i standardne devijacije:

pedesetpostotni preskočni naponi 50 Hz

$$\tilde{U}_{50\%}^{(6)} = 105 \text{ kV}, \tilde{U}_{50\%}^{(7)} = 114 \text{ kV}, \tilde{U}_{50\%}^{(8)} = 137 \text{ kV}$$

podnosivi (10% preskočni) naponi 50 Hz

$$\tilde{U}_{10\%}^{(6)} = 97 \text{ kV}, \tilde{U}_{10\%}^{(7)} = 106 \text{ kV}, \tilde{U}_{10\%}^{(8)} = 127 \text{ kV}$$

„stopostotni” (90 %) preskočni naponi 50 Hz

$$\tilde{U}_{90\%}^{(6)} = 113 \text{ kV}, \tilde{U}_{90\%}^{(7)} = 123 \text{ kV}, \tilde{U}_{90\%}^{(8)} = 143 \text{ kV}$$

standardne devijacije 50 Hz

$$\sigma^{(6)} = 6,30 \text{ kV}, \sigma^{(7)} = 6,87 \text{ kV}, \sigma^{(8)} = 8,24 \text{ kV}.$$

## 6. UDARNE IMPEDANSE I FAKTORI SPREGE

Prema [8] udarna impedansa stuba  $Z_{CS}$  u  $\Omega$  procenjuje se prema izrazu

$$Z_{CS} = R_S + 0,9167 h_v, \quad (53)$$

gde je  $R_S$  otpornost uzemljenja stuba u  $\Omega$ , a  $h_v$  visina stuba u m. Vrednost impedanse  $Z_{CS}$  menja se od stuba do stuba i računa se za svako stubno mesto. Ova impedansa na dalekovodu 1005 kreće se u opsegu  $25,42 \Omega \leq Z_{CS} \leq 39,95 \Omega$ , a njena srednja vrednost iznosi  $32,01 \Omega$ .

Udarna impedansa zaštitnog užeta  $Z_{CG}$  u  $\Omega$  procenjuje se prema [2] po formuli

$$Z_{CG} = 138 \log_{10} \frac{2h_G}{r_G}, \quad (54)$$

u kojoj je  $h_G$  prosečna visina zaštitnog užeta koja se dobija iz prosečne visine stubova na trasi dalekovoda  $\bar{h}_v$  i prosečnog ugiba OPGW  $f_G$  u srednjem rasponu od 274,74 m kao razlika  $h_G = \bar{h}_v - \frac{2}{3} f_G$ . Sa  $r_G$  označen je poluprečnik zaštitnog užeta u m. U slučaju DV 1005 je  $h_v = 28$  m,  $f_G = 5,1$  m i  $r_G = 0,005$  m, pa je udarna impedansa zaštitnog užeta

$$Z_{CG} = 138 \log_{10} \frac{2 \cdot 24,6}{0,005} = 551,0 \Omega. \quad (55)$$

Uzima se da je ovako sračunata vrednost impedanse  $Z_{CG}$  konstantna na celoj trasi voda.

Udarna impedansa faznog provodnika  $Z_{CF}$  u  $\Omega$  prema istoj referenci [2] procenjuje se prema analognoj formuli

$$Z_{CF} = 138 \log_{10} \frac{2h_F}{r_F}, \quad (56)$$

gde je  $h_F$  prosečna visina najvišeg faznog provodnika (AlČe 240/40 mm<sup>2</sup>), a  $r_F$  njegov poluprečnik.

Uzima se da je dobijena vrednost od  $487,3 \Omega$  konstantna na celoj trasi voda.

Za udarnu međusobnu impedansu između faznog provodnika i zaštitnog užeta  $Z_{CFG}$  u  $\Omega$  na dalekovodu 1005 prema [2] dobijena je vrednost u opsegu  $131,65 \Omega \leq Z_{CFG} \leq 165,11 \Omega$

Faktor sprege zaštitnog užeta i faznog provodnika  $K_{FG}$  u slučaju kada se atmosfersko pražnjenje događa na stubu ili na zaštitnom užetu definisan je kao odnos

$$K_{FG} = \frac{Z_{CFG}}{Z_{CG}}. \quad (57)$$

Faktor sprege  $K_{FG}$  na dalekovodu 1005 kreće se u opsegu  $0,2389 \leq K_{FG} \leq 0,2997$ , a njegova srednja vrednost iznosi  $0,2719$ .

Faktor sprege zaštitnog užeta i faznog provodnika  $K_{GF}$  u slučaju kada se atmosfersko pražnjenje događa na faznom provodniku definisan je kao odnos

$$K_{GF} = \frac{Z_{CFG}}{Z_{CF}} \quad (58)$$

Na DV 1005 dobijen je opseg  $0,2702 \leq K_{GF} \leq 0,3388$  i srednja vrednost od  $0,3074$ .

## 7. EKVIVALENTNE UDARNE IMPEDANSE

### 7.1. Atmosfersko pražnjenje na stubu

Ekvivalentna udarna impedansa koja se suprotstavlja struji groma [2] jednaka je impedansi paralelne veze koju čine impedansa kanala groma  $Z_K$ , udarna impedansa zaštitnog užeta  $Z_{CG}$  desno od stuba, udarna impedansa zaštitnog užeta  $Z_{CG}$  levo od stuba i udarna impedansa stuba  $Z_{CS}$ .

$$Z_{ES} = (1 - K_{FG}) \frac{Z_K Z_{CG} Z_{CS}}{2 Z_K Z_{CS} + Z_K Z_{CG} + Z_{CS} Z_{CG}}. \quad (59)$$

Pomoću faktora  $(1 - K_{FG})$  uzima se u obzir smanjenje napona na izolaciji zbog napona koji se zbog struje groma indukuje u faznom provodniku.

Prema rezultatima istraživanja [2] vrednost impedanse kanala groma  $Z_K$  nalazi se u opsegu od  $1000 \Omega$  do  $3000 \Omega$ , pa se za naredne procene usvaja  $Z_K = 1500 \Omega$ . Ekvivalentna impedansa  $Z_{ES}$  računa se za svako stubno mesto.

Na dalekovodu 1005 ova impedansa kreće se u opsegu  $16,9 \Omega \leq Z_{ES} \leq 23,88 \Omega$ , a srednja vrednost joj iznosi  $20,41 \Omega$ .



## 7.2. Atmosfersko pražnjenje na zaštitnom užetu u okolini sredine raspona

Ekvivalentna udarna impedansa koja se uz uvažavanje redukcionog dejstva faznog provodnika suprotstavlja struji groma [2] jednaka je impedansi paralelne veze koju čine impedansa kanala groma  $Z_K$ , udarna impedansa zaštitnog užeta  $Z_{CG}$  desno od mesta udara i udarna impedansa zaštitnog užeta  $Z_{CG}$  levo od mesta udara.

$$Z_{EG} = (1 - K_{FG}) \frac{Z_K Z_{CG}/2}{Z_K + Z_{CG}/2} \cdot \frac{Z_{CS}}{Z_{CS} + Z_{CG}/2}. \quad (60)$$

$Z_{EG}$  računa se za svaki raspon, odnosno stub. Na dalekovodu 1005 njena vrednost kreće se u opsegu  $14,50 \Omega \leq Z_{ES} \leq 20,64 \Omega$ , a aritmetička sredina joj je  $17,57 \Omega$ .

## 7.3. Atmosfersko pražnjenje na faznom provodniku u rasponu

Analogno prethodnom slučaju, ekvivalentna udarna impedansa  $Z_{EF}$  prema kojoj se, uz uvažavanje redukcionog dejstva zaštitnog užeta, procenjuje potencijalna razlika na izolaciji za vreme struje groma, sračunava se prema izrazu

$$Z_{EF} = (1 - K_{GF}) \frac{Z_K Z_{CF}/2}{Z_K + Z_{CF}/2} \quad (61)$$

$Z_{EF}$  računa se za svaki raspon, odnosno stub. Na dalekovodu 1005 njena vrednost kreće se u opsegu  $138,58 \Omega \leq Z_{ES} \leq 152,98 \Omega$ , a aritmetička sredina joj je  $145,17 \Omega$ .

## 8. PROCENA BROJA PRENAPONA NA DV1005 U TOKU JEDNE GODINE

### 8.1. Procena broja atmosferskih prenapona

#### 8.1.1. Teoretska procena

Prosečan broj atmosferskih pražnjenja direktno u stubove i u zaštitno uže dalekovoda u godini dana za prosečan keraunički nivo u Vojvodini [6] od 31,57, procenjen je prema postupku navedenom u [5]. Dobijeno je da očekivani godišnji broj udarnih prenapona zbog atmosferskih pražnjenja direktno u stubove  $N'_{aS}$  i direktno u zaštitno uže  $N'_{aG}$  iznosi

$$N'_{aS} = 3,2 \quad \text{i} \quad N'_{aG} = 2,0 \quad (62)$$

Verovatnoća nastanka atmosferskih pražnjenja direktno na faznim provodnicima  $P_F(U_a)$  može se u procentima sračunati prema empirijskoj formuli Burgsdorfa i Kostenka [2]

$$\log_{10} P_F(U_a) = \theta_G \sqrt{h_v} / 90 - 2 \quad (63)$$

gde je  $\theta_G$  srednji zaštitni ugao zaštitnog užeta, a  $h_v$  srednja visina dalekovodnog stuba. Kod DV 1005 je  $\theta_G = 30^\circ$ , a  $h_v = 28$  m, pa se posle zamene ovih vrednosti u (63) dobija  $P_F(U_a) = 0,58 \%$ . Ukupan broj atmosferskih pražnjenja u fazne provodnike dobija se iz ukupnog broja atmosferskih pražnjenja na dalekovodu  $N'_{dV}$  množenjem sa  $P_F(U_a)$ . S obzirom da je ukupan broj atmosferskih pražnjenja direktno na dalekovod zbir procenjenog broja ovih pražnjenja na stubovima, zaštitnim užadima i faznim provodnicima, tj.  $N'_{dVd} = N'_{aS} + N'_{aG} + N'_{aF}$ , i da je  $N'_{aF} = N'_{dVd} P_F(U_a)$  biće

$$N'_{dVd} = \frac{N'_{aS} + N'_{aG}}{1 - P_F(U_a)/100} = \frac{5,2}{1 - 0,58/100} = 5,23$$

što znači da je godišnji broj atmosferskih pražnjenja direktno na faznim provodnicima DV 1005 jednak razlici

$$N'_{aF} = 5,23 - 5,2 = 0,03 \quad (64)$$

Maksimalne vrednosti napona  $U_{max}$  (u kV) koje na dalekovodu indukuju struje indirektnog atmosferskog pražnjenja  $I_m$  (u kA) procenjuju se prema izrazu (24). Prema tabeli 8 u članu 83 Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV [1] u 99 % slučajeva struje atmosferskih pražnjenja ne prelaze 60 kA, pa se u našim uslovima u (12) može usvojiti  $I_m = 60$  kA. Sa ovom strujom i sa maksimalnom vrednošću napona  $U_{max}$  jednakom podnosivom udarnom naponu osnovne izolacije  $U_{10\%}^{(6)} = 475$  kV preko  $x$  procenjuje se širina atraktivnog pojasa  $B_T$  sa obe strane ose dalekovoda u kome se događaju **indirektna** atmosferska pražnjenja koja mogu izazvati preskok na izolaciji:

$$B_T = 2 \cdot 30 \frac{I_m h}{U_{10\%}^{(6)}} = 2 \cdot 30 \frac{60 \cdot 24,6}{475} = 186,4 \text{ m.} \quad (65)$$

Ako je  $L_{DV}$  dužina trase voda u km, a  $P_S$  i  $P_G$  atraktivne površine stubova i zaštitnog užeta u  $\text{km}^2$  ukupna površina atraktivnog pojasa indirektnih pražnjenja je

$$P_{aT} = 0,001 B_T \cdot L_{DV} - P_S - P_G = 0,633 \text{ km}^2, \quad (66)$$

a očekivani godišnji broj udarnih prenapona zbog ove vrste atmosferskih pražnjenja je

$$N'_{aT} = 3,79 \cdot 0,633 = 2,4. \quad (67)$$

gde je  $3,79 = 0,12 \cdot 31,57$  prosečan broj atmosferskih pražnjenja po  $\text{km}^2$  tla u godini dana [5].

Ukupan broj udarnih prenapona zbog sve četiri vrste atmosferskih pražnjenja u toku jedne godine prema ovim rezultatima procenjuje se na

$$N'_{aDV} = N'_{aS} + N'_{aG} + N'_{aF} + N'_{aT} = 3,2 + 2,0 + 0,03 + 2,4 = 7,63. \quad (68)$$

Rastojanja od ose voda spoljašnje ivice  $x_{max}$  i unutrašnje ivice  $x_{min}$  atraktivnog pojasa indirektnih atmosferskih pražnjenja, koja su potrebna za procenu uslovnih verovatnoća  $P_T^{(6)}(*|U_a)$  i  $P_T^{(7)}(*|U_a)$  su

$$x_{max} = 0,5 B_T \text{ i } x_{min} = 0,5 B_G \quad (69)$$

gde je  $B_G$  širina atraktivnog pojasa zaštitnog užeta.

U konkretnom slučaju dalekovoda 1005 ova dva rastojanja su  $x_{max} = 93,2$  m i  $x_{min} = 60,7$  m.

Sa ovako procenjenim godišnjim brojem sve četiri vrste atmosferskih prenapona i sa procenama ostalih veličina i verovatnoća datih izrazima u prethodnom tekstu preliminarno je sračunata verovatnoća preskoka na dalekovodu nastalih zbog atmosferskih prenapona. Račun je sproveden tabelarno, a rezultat je

$$P_{DV}(*, U_a) = 0,021 \ 93 \quad (70)$$

### 8.1.2. Korekcija prema evidenciji stvarnih ispada i kvarova na DV 1005

U zvaničnom izveštaju nadležne službe EMS u Novom Sadu od 10. marta 2006. godine navodi se da je od 1. januara 1996. godine do 9. marta 2006. godine na DV 1005 registrovano ukupno 15 isključenja, od kojih je njih 9 bilo prouzrokovano kvarovima u postrojenjima 110 kV u TS Novi Sad 3 i TETO Novi Sad, a 6 su bili direktna posledica događanja na samoj trasi voda. Naravno, za analizu rizika merodavno je upravo ovih 6 poslednjih ispada.

Važno je napomenuti da je svih 6 isključenja bilo posledica prolaznih zemljospojeva, posle kojih je usledio po jedan ciklus uspešnog APU. Osim isključenja zbog preskoka registrovanog 8. maja 2001. godine koji se dogodio zbog jake kiše i isključenja zbog preskoka registrovanog 17. februara 2002. godine koji se dogodio u popodnevnom časovima zbog zagađenja izolacije gustim dimom i produktima sagorevanja nastalim od zapaljenog rastinja na trasi voda, uzroci ostala 4 isključenja zvanično se vode kao nepoznati. Za jedno od njih može se pretpostaviti da je posledica preskoka zbog prenapona industrijske učestanosti, jer se dogodilo u noći 31. decembra kada nije bilo grmljavine. Za preostala 3 isključenja koja su se sva događala u periodu između aprila i avgusta meseca, sa jednakom verovatnoćom

može se reći da su ili nastala zbog atmosferskih prenapona, ili zbog prenapona industrijske učestanosti.

Prema tome, može se zaključiti da u periodu između 1. januara 1996. godine i 9. marta 2006. godine koji ima 3 731 dan, na DV 1005 nije bilo više od ukupno 3 ispada dalekovoda, odnosno preskoka zbog atmosferskih prenapona. Tom broju odgovara ukupan godišnji broj preskoka zbog atmosferskih prenapona od

$$N_{aDV}^* = \frac{3}{3731} 365,25 = 0,293 \ 69 \quad (71)$$

Iz ovog podatka pomoću (11) nakon smene  $n_i = N_{aDV}^*$  i  $n_{DV} = 1$  dobija se verovatnoća  $P_{DV}(*, U_a)$  nastanka preskoka zbog atmosferskih prenapona na celoj trasi dalekovoda u toku godine dana

$$P_{DV}(*, U_a) = 0,254 \ 48 \quad (72)$$

Ovaj rezultat znatno je iznad teoretski dobijenog rezultata (70) za istu verovatnoću, što upućuje na zaključak da su tri evidentirana ispada dalekovoda čiji je uzrok nepoznat, pre nastala zbog prenapona industrijske učestanosti, nego zbog atmosferskih pražnjenja.

Na osnovu ovoga se kao merodavni za dalje proračune dobijaju sledeći brojevi pojavljivanja atmosferskih prenapona zbog direktnih i indirektnih atmosferskih pražnjenja u toku godine dana:

$$\begin{aligned} N_{aS} &= 3,2 / 7,63 = 41,9 \% N_{aDV} \\ N_{aG} &= 2,0 / 7,63 = 26,2 \% N_{aDV} \\ N_{aF} &= 0,03 / 7,63 = 0,4 \% N_{aDV} \\ N_{aT} &= 2,4 / 7,63 = 31,5 \% N_{aDV} \\ N_{aDV} &= 100 \% N_{aDV}. \end{aligned} \quad (73)$$

NAPOMENA: Da je rezultat (72) bio manji od teoretskog rezultata (70) i da je bilo sasvim izvesno da su 3 problematična ispada atmosferskog porekla, to bi značilo da je teoretski procenjeni broj atmosferskih prenapona veći od stvarnog i da u dalje proračune treba ići sa smanjenim vrednostima procenjenih brojeva ovih prenapona. U tom slučaju red veličine smanjenja dobija se iterativnim putem, tako što se ukupan teoretski procenjeni broj atmosferskih prenapona, kao i brojevi sve četiri vrste ovih prenapona proporcionalno smanjuju sve dok se verovatnoća  $P_{DV}(*, U_a)$  sračunata pomoću (5) dovoljno ne približi rezultatu (72).

### 8.2 Procena broja prenapona industrijske učestanosti

Iz napred navedenih podataka o stvarnim ispadima i kvarovima na DV 1005 može se zaključiti da

su se od puštanja u pogon na DV 1005 dogodila bar 3 prenapona industrijske učestanosti. S obzirom da u efikasno uzemljenim mrežama 110 kV prenaponi koji prate zemljospojeve ne prelaze 80 % međufaznog napona [2, 7], malo je verovatno da bi u manjeviše normalnim vremenskim uslovima moglo doći do preskoka na osnovnoj izolaciji. Podnosivi napon industrijske učestanosti osnovne izolacije na kiši na DV 1005 iznosi 266 kV, što je znatno iznad  $0,8 \times 123 = 98,4$  kV pa, sudeći po svemu, 3 evidentirana preskoka mogla su nastati ili u uslovima jakih padavina ili zbog aerzagadenja ili magle. Iako za ostala 3 evidentirana preskoka ne postoje dovoljno jaki razlozi koji bi ih svrstali u preskoke nastale zbog prenapona industrijske učestanosti, njih treba uzeti u obzir pri proceni mogućeg broja prenapona na dalekovodu imajući u vidu rezultate (70) i (72). To znači da je godišnji broj preskoka  $\tilde{N}_{DV}^*$  zbog prenapona industrijske učestanosti na DV 1005

$$\tilde{N}_{DV}^* = \frac{6}{3731} 365,25 = 0,587 \text{ 38}, \quad (74)$$

zato što u periodu od 1. januara 1996. godine do 9. marta 2006. godine u kome je na DV 1005 evidentirano 6 zemljospojeva, ima ukupno 3 731 dan.

Imajući u vidu da je pojava sklopnih prenapona na DV 1005 praktično isključena, uzroci nastanka prenapona industrijske učestanosti na ovom dalekovodu su zemljospojevi u mreži 110 kV sa koje se dalekovod napaja. Sa sabirnica postrojenja 110 kV u TS Novi Sad 3 pored DV 1005 napaja se još 9 dalekovoda 110 kV čija ukupna dužina iznosi 122 km. Zemljospoj na bilo kom od ovih vodova podiže naponne zdravih faza na svim ostalim dalekovodima, pa i na DV 1005. Ako se pode od pretpostavke da je godišnji broj zemljospojeva po dužnom kilometru trase na svakom od ovih 9 dalekovoda približno jednak godišnjem broju zemljospojeva evidentiranih po dužnom kilometru trase DV 1005, tada će ukupan broj prenapona industrijske učestanosti na DV 1005 u godini dana biti

$$\tilde{N}_{DV} = \frac{6}{3731} 365,25 \cdot \left(1 + \frac{122}{10,715}\right) = 7,275 \text{ 19} \quad (75)$$

pri čemu je 10,715 dužina trase DV 1005 u km.

## 9. POUZDANOST RADA OPGW I RENTABILNOST ZAŠTITE KAO FUNKCIJE RIZIKA OD OTKAZA

Svaka zaštita, pa i zaštita o kojoj je reč u ovom izlaganju, mora da ispuni bar jedan od sledeća dva kriterijuma:

A) zaštita treba da obezbedi da objekat koji ona štiti radi pouzdano

B) zaštita treba da bude rentabilna.

U idealnom slučaju svaka zaštita bi trebalo da zadovolji oba navedena kriterijuma. Međutim, kod objekata kod kojih je pouzdanost rada primarna, a rentabilnost ima sekundarni značaj, zaštita je dobro projektovana i izvedena i kada je ispunjen samo kriterijum A, kao što će tamo gde se prevashodno traže materijalne uštede u eksploataciji biti dobra i ona zaštita koja ispunjava samo kriterijum B. Od zaštite koja ne ispunjava nijedan od dva kriterijuma ne može se očekivati da će dati zadovoljavajuće rezultate u eksploataciji.

### 9.1. Pouzdanost

U slučaju zaštite segmenta užeta OPGW pomoću električno pojačane izolacije na  $n^{(p)}$  kritičnih dalekovodnih stubova, kriterijum A svodi se na ispunjenje trenutne raspoloživosti dotičnog segmenta OPGW. Pod pretpostavkom da će segment užeta OPGW biti izbačen iz pogona pri svakom otkazu zaštite sa električno pojačanom izolacijom, njegova trenutna raspoloživost  $A$  biće jednaka trenutnoj raspoloživosti ove zaštite koja je data izrazom:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (76)$$

Ovde je  $\mu$  (1/godina) intenzitet popravke užeta i zaštite, a  $\lambda$  (1/godina) intenzitet otkaza zaštite. Pošto je prema (4) rizik otkaza zaštite  $P_R$  definisan i sračunat kao verovatnoća otkaza svedena na jednu godinu eksploatacije dalekovoda, važi brojna jednakost  $\lambda = P_R = 1/MBTF$  [11]. Sanacija kvara segmenta OPGW nastalog zbog otkaza zaštite sa pojačanom izolacijom na jednom od 8 stubova zahteva zamenu OPGW u zateznom polju u kome je nastao kvar i istovremenu popravku pojačanog izolatorskog lanca na kome se dogodio preskok. Imajući u vidu dosadašnja iskustva sa izvođačima radova koji su postavljali užad OPGW na našim dalekovodima, procenjuje se da se ovaj posao može obaviti za cca 8 h efektivnog rada. Kada se tome doda još 24 h potrebnih za lokalizaciju kvara i pripremne radnje, dobija se da je  $\mu = 365,25 \cdot 24/32 = 273,94$  1/godina i da je

$$A = \frac{273,94}{P_R + 273,94} \quad (77)$$

Bliža predstava o pouzdanosti sa kojom radi zaštita OPGW može se dobiti pomoću **kritičnog perioda eksploatacije**  $T_C$ , koji se definiše kao period eksploatacije u kome su šanse da će doći do prekida pogona zbog kvara jednake šansama da se to neće dogoditi. Kritičan period eksploatacije izražen u godinama dobija se iz izraza

$$T_C = \frac{\ln 0,5}{\ln(1-P_R)} \quad (78)$$

Ako je stvarni period eksploatacije segmenta OPGW šticenog električnom pojačanom izolacijom reda veličine  $T_C$ , njegova raspoloživost kretace se u opsegu  $0,99 \leq A \leq 0,999$ , što za ovu vrstu provodnika obično nije dovoljno visoka vrednost. Ta raspoloživost je zadovoljavajuća kada je kritičan period eksploatacije nekoliko puta duži od stvarnog perioda eksploatacije.

Između verovatnoće  $P_T$  da će u periodu eksploatacije od  $T$  godina doći do otkaza zaštite i kritičnog perioda eksploatacije postoji veza

$$P_T = 1 - 0,5^{T/T_C} \quad (79)$$

## 9.2. Rentabilnost

Rentabilnost zaštite biće postignuta ako uštede ostvarene tokom eksploatacije dalekovoda nakon njenog uvođenja nisu manje od sredstava potrebnih za njenu ugradnju i eksploataciono održavanje. Uštede ostvarene nakon uvođenja zaštite posledica su razlike u sredstvima potrebnim za sanaciju kvarova pre i nakon uvođenja zaštite. Pri proceni ovih sredstava treba imati u vidu da se otkaz zaštite i kvar na OPGW može dogoditi u bilo kom danu eksploatacije, uključujući njen prvi i poslednji dan. Isto tako ne treba izgubiti iz vida da se tokom eksploatacije mogu desiti dva, tri ili više otkaza zaštite, odnosno, kvarova OPGW, ali i da može da se desi da se tokom cele eksploatacije ne dogodi nijedan jedini kvar.

U takvim uslovima neizvesnosti nepristrasna procena sredstava za sanaciju kvarova može se dobiti pomoću **očekivane vrednosti** cene sanacije  $Q_{EZ}$ . U statističkom smislu pod očekivanom cenom sanacije  $Q_{EZ}$  podrazumeva se matematičko očekivanje te cene, ili običnim rečima iskazano, prosečna vrednost sredstava koja bi u periodu eksploatacije od  $T$  godina bila utrošena za sanaciju ovakvih otkaza na više (bar tridesetak) dalekovoda koji su u konstruktivnom i eksploatacionom pogledu potpuno identični sa DV 1005.

U skladu sa definicijom matematičkog očekivanja [9, 10] biće

$$Q_{EZ} = \sum_{i=1}^T P_R (1-P_R)^{i-1} \cdot Q_{SK} = \left(1 - (1-P_R)^T\right) Q_{SK} \quad (80)$$

ili s obzirom na (78)

$$Q_{EZ} = \left(1 - 0,5^{T/T_C}\right) Q_{SK} \quad (81)$$

U (80) je  $P_R (1-P_R)^{i-1}$  verovatnoća nastanka otkaza električno pojačane izolacije u  $i$ -toj godini eksploatacije,  $P_R$  je godišnji rizik otkaza zaštite definisan sa (4), a sa  $Q_{SK}$  je označena cena sanacije ukupne štete nastale zbog kvara OPGW.

Kada se radi o poređenju troškova koji su nastali u vremenskim razdobljima od deset i više godina, tada se zbog inflatornih kretanja i različitih mogućnosti plasmana kapitala realni rezultati dobijaju upoređivanjem njihovih „sadašnjih” vrednosti. Pod sadašnjom vrednošću  $Q$  troška napravljenog u  $n$ -toj godini eksploatacije kada je njegova aktuelna cena bila  $Q'$ , podrazumeva se vrednost  $Q = Q'/K$  gde je sa  $K$  označen diskontni faktor  $K = 1 + p\%/100$  u kome je  $p\%$  godišnja stopa povrata uložених sredstava u  $\%$ .

Sa ovim oznakama, kao i sa oznakama usvojenim u 4.1, sadašnja vrednost očekivanih troškova sanacije posledica otkaza zaštite koji su se dogodili tokom  $T$  godina eksploatacije na segmentu OPGW zaštićenom električno pojačanom izolacijom, sračunava se prema

$$Q_{EZ}^{(6)} = \frac{0,5^{T/T_C^{(6)}} - K^{-T}}{0,5^{1/T_C^{(6)}} - K} \cdot \frac{P_R^{(6)}}{K^T} \cdot Q_{SK}, \quad (82)$$

a sadašnja vrednost očekivanih troškova sanacije posledica otkaza koji su se dogodili u istom periodu nakon uvođenja električno pojačane izolacije na odabranim stubovima, sračunava se prema

$$Q_{EZ}^{(p)} = \frac{0,5^{T/T_C^{(p)}} - K^{-T}}{0,5^{1/T_C^{(p)}} - K} \cdot \frac{P_R^{(p)}}{K^T} \cdot Q_{SK}, \quad p = 7, 8. \quad (83)$$

Sadašnja vrednost  $Q_G$  godišnjih troškova  $Q_M$  redovnog održavanja, amortizacije i eventualne otplate anuiteta u vezi sa primenjenom zaštitom je

$$Q_G = \frac{1 - K^{-T}}{K - 1} \cdot Q_M \quad (84)$$

U (82) i (83)  $T_C^{(6)}$ ,  $T_C^{(7)}$  i  $T_C^{(8)}$  su kritični periodi eksploatacije bez pojačane izolacije (gornji indeks (6)), odnosno, sa pojačanom izolacijom (gornji indeksi (7) i (8)) primenjenom za zaštitu segmenta OPGW.

Ako su  $Q_{INV}$  troškovi projektovanja, ugradnje i puštanja u pogon zaštite sa pojačanom izolacijom, tada troškovi  $Q_{ET}^{(p)}$

$$Q_{ET}^{(p)} = Q_{EZ}^{(p)} + Q_G + Q_{INV}, \quad p = 7, 8. \quad (85)$$

predstavljaju sadašnju vrednost ukupnih troškova potrebnih za implementaciju, održavanje zaštite nakon njene ugradnje i za sanaciju očekivanih kvarova tokom  $T$  godina eksploatacije. Cene  $Q_M$  i  $Q_{INV}$  sračunavaju se prema aktuelnim cenama koje vrede u godini puštanja u pogon OPGW. Sadašnja vrednost

očekivane uštede ostvarene zbog primene pojačane izolacije tokom  $T$  godina eksploatacije je

$$\Delta Q_{EZ}^{(p)} = Q_{EZ}^{(6)} - Q_{ET}^{(p)}, p = 7,8. \quad (86)$$

Zaštita je rentabilna ako je u datim uslovima eksploatacije od  $T$  godina ispunjen uslov

$$\Delta Q_{EZ}^{(p)} > 0, p = 7,8. \quad (87)$$

Ako uslov (87) nije ispunjen, tada prema (86) mora biti  $Q_{ET}^{(p)} \leq Q_{EZ}^{(6)}$ . Sa čisto ekonomske tačke gledanja to znači da zaštitu nije ni trebalo uvoditi, jer njena ugradnja i održavanje više koštaju nego sanacija posledica očekivanih kvarova koji se mogu dogoditi u periodu eksploatacije OPGW.

## 10. REZULTATI PRORAČUNA

Za proračune u kojima se koriste formule i postupci slični onima navedenim u prethodnom izlaganju, veoma je pogodno primeniti tabelarnu tehniku i to po mogućstvu onu koja koristi tzv. „inteligentne” tabele. Upravo na taj način su izvedeni proračuni svih relevantnih verovatnoća, kao i proračun godišnjeg rizika  $P_R$  od otkaza zaštite na DV 1005.

Na osnovu rezultata ovih proračuna dobijeni su pokazatelji pouzdanosti rada segmenta OPGW zaštićenog električno pojačanom izolacijom koji su prikazani u tabeli 2. Trenutna raspoloživost  $A$  i niske vrednosti kritičnog perioda eksploatacije  $T_C = 5,8$  godina kao i srednjeg vremena između kvarova  $MTBF = 8,88$  godina odmah ukazuju da bez električno pojačane izolacije na kritičnim stubovima uže OPGW ne može da radi sa zadovoljavajućom pouzdanošću. Ovolike vrednosti za  $T_C$  i  $MTBF$  nagoveštavaju da u periodima eksploatacije reda 30 do 50 godina treba računati bar sa nekoliko ispada iz pogona OPGW zbog preskoka na kritičnim stubovima.

Tabela 2.

Pokazatelji pouzdanosti

	Bez električno pojačane izolacije	Sa električno pojačanom izolacijom (7 članaka)	Sa električno pojačanom izolacijom (8 članaka)
$P_R$ (1/godina)	0,112 650 8	0,019 413 7	0,002 303 4
$A$	0,999 588 9	0,999 929 1	0,999 991 6
$T_C$ (godina)	5,80	35,36	300,58
$MTBF$ (godina)	8,88	51,51	434,14

Električno pojačana izolacija sa 7 članaka obezbeđuje trenutnu raspoloživost od „četiri devetke”, ali  $T_C = 35,36$  godina i  $MTBF = 51,51$  godina ukazuju da bi se u veku eksploatacije realno mogao očekivati ispad iz pogona OPGW sa svim posledicama koje taj događaj povlači. Električno pojačana izolacija sa 8 članaka obezbeđuje visoku trenutnu raspoloživost od preko „pet devetki”, a visoke vrednosti pokazatelja  $T_C$  i  $MTBF$  istovremeno ukazuju da se u životnoj dobi OPGW (30 - 50 godina) teško može očekivati da će do kvara uopšte i doći.

Pri ocenjivanju rentabilnosti uvođenja zaštite sa električno pojačanom izolacijom usvojene su realne cene troškova prema dokumentaciji za DV br. 1005. Troškovi sanacije kvara takođe su usvojeni na bazi iste dokumentacije, s tim što je usvojeno da se ovi poslednji troškovi sastoje samo od troškova potrebnih za dovođenje objekta u stanje pre kvara, dakle, bez dodatnih troškova kao što su troškovi za naknadu štete zbog prekida korišćenja TK veza, zbog neisporučene električne energije i sl.

Sa tako usvojenim vrednostima dobijeno je da su kod pojačane izolacije sa 7 članaka očekivane uštede prema formuli (86) negativne za svako  $T$  iz opsega  $0 < T \leq 50$  godina eksploatacije, tj. da je uvek  $\Delta Q_{EZ}^{(7)} < 0$ . Sa istim vrednostima zaštita sa pojačanom izolacijom sa 8 članaka rentabilna je kada je  $T \geq 10$  godina eksploatacije. Prema ovome, stiče se utisak da je sa uobičajenim periodima eksploatacije ugradnja ove vrste zaštite, za koju se ne može reći da je preterano skupa, slabo profitabilna investicija.

Međutim, računске provere pokazale su da ista zaštita postaje ubedljivo rentabilna kada su troškovi sanacije kvara veći nego što je realno procenjeno za potrebe ove analize. Ovo navodi na zaključak da se očigledno ne radi o zaštiti koja nije rentabilna zbog toga što je u apsolutnom iznosu isuviše skupa, već da se radi o zaštiti koja je upotrebljena za sprečavanje relativno jeftinih šteta malog obima koje, povrh svega, imaju i malu verovatnoću nastanka.

## 11. ZAKLJUČAK

(i) U pogledu pouzdanosti rada OPGW, zaštita sa električno pojačanom izolacijom sa 7 članaka, kao i zaštita sa 8 članaka primenjena na kritičnim stubovima obezbeđuju potrebnu trenutnu raspoloživost zaštićenog segmenta OPGW (0,999 929 1 i 0,999 991 6) koja se zahteva kod ovakvih objekata.

(ii) Ako su okolnosti takve da kvar OPGW povlači i znatne indirektno troškove bilo zbog prekida prenosa informacija, bilo zbog štete na faznim provodnicima, na dalekovodima 110 kV prednost treba dati zaštiti sa električno pojačanom izolacijom sa 8 članaka.

(iii) Kada su troškovi sanacije kvara OPGW relativno malog obima, a kada istovremeno i verovatnoća nastanka kvara ima dovoljno nisku vrednost, tada treba preispitati opravdanost primene zaštite OPGW baš na svim mestima na kojima su struje kvara veće od onih koje OPGW izdržava. Ovo je potrebno zbog toga što u ovakvim slučajevima ugradnja i održavanje bilo kakve zaštite mogu da budu skuplji od šteta zbog kvarova.

(iv) Rezultati ove analize potvrđuju opravdanost predloga, koji je na bazi naših propisa, a u vezi sa primenom električno pojačane izolacije, dat u [12] (str. 44).

(v) Rezultati ove analize takođe idu u prilog činjenice da se posledice pojava koje u elektroenergetskoj mreži nastaju pod uticajem više slučajnih faktora, ne mogu vrednovati tradicionalnim determinističkim postupcima. Kada se to ipak čini, tada se neminovno dolazi do rešenja koja po pravilu zahtevaju angažovanje većih sredstava nego što je realno potrebno.

## 12. LITERATURA

- [1] PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATIVIMA ZA IZGRADNJU NADZEMNIH ELEKTROENERGETSKIH VODOVA NAZIVNOG NAPONA OD 1 kV DO 400 kV, Sl. list SFRJ br.65, novembar 1988.
- [2] Diesendorf, W: INSULATION CO-ORDINATION IN HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER SYSTEMS, Butterworth & Co, London, 1974.
- [3] TEHNIČKI PRIRUČNIK, četvrto izdanje, SOUR Rade Končar, Zagreb, 1980.
- [4] Energoinvest, IRCE, Izveštaj br. 88-066, Sarajevo, april - maj 1988.
- [5] TRANSMISSION LINE REFERENCE BOOK 345 kV AND ABOVE, Second Edition, EPRI, Palo Alto, Ca, 1982
- [6] JUS N.B4.803/1996, GROMOBRANSKE INSTALACIJE. ODREĐIVANJE NIVOVA ZAŠTITE. UTVRĐIVANJE PROSEČNOG BROJA DANA SA GRMLJAVINOM. Izokeraunička karta SR Jugoslavije.
- [7] Westinghouse Electric Corporation, PRENOS I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE, (prevod s engleskog), Građevinska knjiga, Beograd, 1964.
- [8] Savić, M. i Vukelja, P: PRENAPONSKA ZAŠTITA ELEKTRODISTRIBUTIVNIH MREŽA, Institut „Nikola Tesla”, studija br. 310007, Beograd, jun 2000.
- [9] Vukadinović, S: ELEMENTI TEORIJE VEROVATNOĆE I MATEMATIČKE STATISTIKE, treće izmenjeno izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1981.
- [10] Lipschutz, S: PROBABILITY, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- [11] Hoefle-Isphording, U: ZUVERLAESSIGKEIT-SRECHNUNG, Springer-Verlag, Berlin, 1978.
- [12] Balkovoj, V. i Dutina, M: TERMIČKA NAPREZANJA OPGW PRI ZEMLJOSPOJU U PRENOSNIM MREŽAMA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE, Elektroprivreda, br. 3, 2003.

Rad je primljen u uredništvo 5. 04. 2007. godine



**Vladimir I. Balkovoj** je rođen 1934. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1960. godine. Od 1962. godine pa do kraja aktivne službe bio je zaposlen u Projektnom birou Elektrovojvodine u Novom Sadu, gde je radio na projektovanju srednjenaaponskih vodova i transformatorskih stanica. Uporedo sa operativnim projektantskim poslovima bavio se širom problematikom uzemljenja u distributivnim mrežama. Posebnu oblast njegovog stručnog interesovanja predstavljaju pojave vezane za tokove i raspodelu nultih struja pri zemljospoju u visokonaponskim mrežama i analitičke metode za procenu opasnosti i štetnih uticaja koji zbog ovih struja mogu nastati na elementima mreže i objektima u okruženju.

# Poboljšani postupak inverznog obrtanja za direktno merenje visokofrekventnih gubitaka opterećenja u asinhronim motorima

Prethodno saopštenje  
UDK: 621.113.333; 621.3.018; 615.846

---

## Rezime:

Poboljšani postupak se zasniva na postupku inverznog obrtanja za direktno merenje visokofrekventnih gubitaka opterećenja, koji je dat u standardu IEEE 112- Metod E, ali uključuje jednu izmenu i jedan dodatni test.

Vrednosti izmerenih visokofrekventnih gubitaka opterećenja u standardnom testu ( $LL_{r,t}$ ), se smanjuju za  $(K_{hS,n})^2$  puta, tj. odgovarajuća vrednost visokofrekventnih gubitaka je:  $LL_r = LL_{r,t} \cdot (1/K_{hS,n})^2$ . Vrednost koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ) se određuje na osnovu izmerenih vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik ( $K_{1S}$ ) po predloženom postupku, ili samo postupkom interpolacije vrednosti iz univerzalne zavisnosti  $K_{hS} = f(K_{1S})$  date u tabeli 1.

Vrednost koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik ( $K_{1S}$ ) određuje se iz oglada praznog hoda sa promenljivim vrednostima napona, kojim je dopunjen standardni postupak inverznog obrtanja, a na način koji je predložen u ovom pronalasku.

**Ključne reči:** postupak inverznog obrtanja, test sa odstranjenim rotorom, visokofrekventni dodatni gubici opterećenja, dodatni gubici osnovne frekvencije u statoru, faktor zasićenja za osnovni harmonik, koeficijent zasićenja za više harmonike

---

## Abstract:

### REVERSE ROTATION TEST IMPROVEMENT PROCEDURE FOR DIRECT MEASUREMENT OF HIGHER FREQUENCIES STRAY-LOAD LOSS IN INDUCTION MOTORS

The improvement procedure is founded on the reverse rotation test procedure for determining the stray-load loss in induction motors occurring at high frequencies (St. IEE 112-Method E), but one modification and an additional test are included.

The high frequencies stray-load loss values measured by the standard test ( $LL_{r,t}$ ) are reduced by  $(K_{hS,n})^2$  times, i.e. corresponding frequencies stray-load loss value is  $LL_r = LL_{r,t} \cdot (1/K_{hS,n})^2$ . The saturation factor value ( $K_{hS}$ ), for the higher harmonics is determined on the basis of saturation factor measured values ( $K_{1S}$ ) for fundamental harmonic as per proposed procedure, or only by interpolation procedure of values from universal dependence  $K_{hS} = f(K_{1S})$  given in the table 1.

The saturation factor values ( $K_{1S}$ ), for fundamental harmonic are determined from the no load test at variable voltages, that is added to standard reverse rotation test procedure, in the manner proposed in this invention.

## 1. UVOD

Četiri osnovne komponente gubitaka snage u asinhronim motorima: gubici u gvožđu ( $P_{Fe}$ ), gubici na trenje i ventilaciju ( $P_{fw}$ ), gubici u namotaju statora ( $P_{Cu1}$ ) i gubici u provodnicima rotora ( $P_{Cu2}$ ), mogu se relativno lako i tačno odrediti po postupcima koji su na slične načine definisani u različitim standardima za određivanje gubitaka snage i stepena iskorišćenja ovih motora [1, 2, 3]. Dodatni gubici opterećenja ( $W_{LL}$ ), kao 5-ta komponenta, definišu se kao razlika ukupnih gubitaka snage ( $\Sigma P_\gamma$ ) i zbira navedene četiri komponente gubitaka snage, tj. oni su:

$$W_{LL} = \Sigma P_\gamma - (P_{Fe} + P_{fw} + P_{Cu1} + P_{Cu2}) \quad (1)$$

Po postupku IEEE 112-B [1], ukupni gubici snage u motoru se određuju kao razlika izmerenih vrednosti utrošene-električne ( $P_1$ ) i korisne-mehaničke ( $P_2$ ) snage:

$$\Sigma P_\gamma = P_1 - P_2 \quad (2)$$

pa se ovaj, ulaz-izlaz (input-output) postupak sa razdvajanjem gubitaka, koji uključuje i postupke za određivanje navedene četiri komponente gubitaka, koristi da se po izrazu (1) odrede dodatni gubici opterećenja.

Kada su u pitanju savremeni motori srednjih i većih snaga, tj. vrednosti stepena iskorišćenja iznad 90 %, onda i ukupna greška od samo 1 % u izmerenim iznosima snaga  $P_1$  i  $P_2$  prouzrokuje grešku veću od 10 % u izračunatoj vrednosti ukupnih gubitaka  $\Sigma P_\gamma$ , što je više od 50 % iznosa dodatnih gubitaka koji se upravo određuju polazeći od te vrednosti. Zbog navedenih teškoća, odgovarajući standard IEC 34-2 i standardi većine zemalja, koji se odnose na određivanje stepena iskorišćenja i gubitaka snage u asinhronim motorima, propisuju da se vrednost dodatnih gubitaka opterećenja u nominalnom režimu procenjuje (različito) po pojedinim standardima, od kojih se najvažniji navode:

$$W_{LL} = 0,5 \% P_{1N}, \text{ za motore svih snaga} \\ \text{(IEC 60034-2)} \quad (3)$$

$$W_{LL} = (1,8 \% \div 1,2 \%) P_{2N}, \text{ za motore od 1-1 850 kW} \\ \text{(IEEE 112)} \quad (4)$$

$$W_{LL} = (3 \% \div 1,5 \%) P_{1N}, \text{ za motore od 1-200 kW} \\ \text{(IEC 61972)} \quad (5)$$

gde su  $P_{1N}$  i  $P_{2N}$ , redom, nominalne vrednosti utrošene-električne i korisne-mehaničke snage.

Dodatni problem predstavlja činjenica, da za motore istih snaga i skoro istih vrednosti gubitaka  $P_{Fe}$ ,  $P_{fw}$ ,  $P_{Cu1}$  i  $P_{Cu2}$ , vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja mogu varirati u širokim granicama-npr. od 0,4 do 3 % za ispitivane motore od 11 kW [4], pa je očigledno da procena dodatnih gubitaka po (3), (4) ili (5) daje pogrešnu sliku o vrednosti stepena iskorišćenja pojedinih motora. U cilju da se koliko-toliko objektivizira merenje dodatnih gubitaka opterećenja, standard IEEE 112-1996 [1], pored dva navedena postupka (ulaz-izlaz i fiksne procenjene vrednosti (4)), propisuje i direktno merenje dodatnih gubitaka po postupku koji se zasniva na testu inverznog obrtanja motora sinhronom brzinom (klizanje  $s = 2$ ).

Postupak inverznog obrtanja, za određivanje dodatnih gubitaka opterećenja asinhronog motora [1], uključuje ogled kratkog spoja sa izvađenim rotorom i ogled inverznog sinhronog obrtanja pri podešenoj vrednosti napona da struja u testu ( $I_t$ ) bude jednaka komponenti struje opterećenja motora, npr. u nominalnom režimu ( $I_t = I_{2N}$ ), tj:

$$I_t = \sqrt{I_{1N}^2 - I_0^2} \quad (6)$$

gde su:  $I_{1N}$  – struja motora u nominalnom režimu i  
 $I_0$  – struja motora u praznom hodu pri  $U_0 = U_N$ .

Test inverznog sinhronog obrtanja se koristi za određivanje komponente visokofrekventnih gubitaka [1], koji učestvuju sa više od 80 % u ukupnim dodatnim gubicima opterećenja, pa je poboljšanje tačnosti navedenog postupka odlučujući faktor za povećanje tačnosti merenja dodatnih gubitaka opterećenja. Naime, složenim laboratorijskim merenjima je pokazano [4–8], da rezultati merenja po ovom postupku mogu biti praćeni sa greškom koja iznosi  $(10 \div 40) \%$ , i koja je sistemske prirode. Postupak koji se predlaže, u ovom radu, omogućava da se navedena greška, skoro u potpunosti, izbegne.

## 2. POBOLJŠANI POSTUPAK INVERZNOG OBRTRANJA ZA MERENJE VISOKOFREKVENTNIH GUBITAKA OPTEREĆENJA

### 2.1. Suština predložene dopune postupka inverznog obrtanja

Postupak koji se predlaže sadrži jednu dopunu, u odnosu na postupak opisan u [1], kako bi se uzelo



u obzir povećanje viših harmonika magnetnog fluksa zbog manjeg (ili praktično zanemarljivog) magnetnog zasićenja u ogledu u odnosu na nominalni režim motora. S obzirom da se ogled inverznog obrtanja provodi pri vrednostima napona  $U < 0,3U_n$ , to su vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik ( $K_{1S}$ ) i sve više harmonike ( $K_{hS}$ ), u testu, praktično ravne jedinici, tj.

$$K_{1S} = 1 \quad (7)$$

$$K_{hS} = 1 \quad (8)$$

U nominalnom režimu, ukupni fluks u magnetnom kolu je približno jednak onom u režimu praznog hoda pri naponu  $U = U_n - R_1 I_{2n}$ , pa se koeficijent magnetnog zasićenja za osnovni harmonik ( $K_{1S}$ ) polja određuje iz ogleda praznog hoda za navedenu vrednost napona ( $U$ ), koji predstavlja dopunu odgovarajućem standardnom postupku inverznog obrtanja [1]. Iz testa praznog hoda, po postupku koji se ovde predlaže, moguće je odrediti vrednost koeficijenta zasićenja ( $K_{hS} > 1$ ) za više ( $h$ -te) harmonike. Da bi se kompenzovao uticaj magnetnog zasićenja u nominalnom režimu, treba vrednosti izmerenih visokofrekventnih gubitaka opterećenja u testu ( $LL_{r,t}$ ), pri vrednostima struje  $I_p$ , smanjiti za ( $K_{hS,n}$ )<sup>2</sup>, tj. odgovarajuća vrednost visokofrekventnih gubitaka ( $LL_r$ ) je:

$$LL_r = LL_{r,t} (1/K_{hS,n})^2 \quad (9)$$

Tako za područje vrednosti koeficijenta zasićenja osnovnog (1-og) harmonika

$$K_{1S,n} = 1,10 \div 1,55 \quad (10)$$

vrednosti koeficijenta zasićenja za polja viših harmonika, kako će biti pokazano, iznose

$$K_{hS,n} = 1,02 \div 1,25 \quad (11)$$

pa će vrednosti visokofrekventnih dodatnih gubitaka ( $LL_r$ ), koje su određene po poboljšanom postupku, biti manje od onih koje su određene u standardnom testu ( $LL_{r,t}$ ) definisanom u [1], tj.:

$$LL_r = (0,64 \div 0,96) \cdot LL_{r,t} \quad (12)$$

Navedeni zaključak (12) pokazuje da su vrednosti visokofrekventnih dodatnih gubitaka opterećenja, koje se određuju po važećem postupku inverznog obrtanja [1], znatnije precenjene. Činjenica da se relativne vrednosti smanjenja dodatnih gubitaka opterećenja, datih izrazom (12), približno poklapaju sa rezultatima tačnih merenja saopštenih u [5,6,7,8], je eksperimentalna potvrda da je uvedena pretpostavka tačna ne samo u kvalitativnom, već i u kvantitativnom smislu.

U tabeli 1 je dat tabelarni prikaz (praktično univerzalne) zavisnosti  $K_{hS,n} = f(K_{1S,n})$ , u području vrednosti  $K_{1S,n} = 1 \div 2$ , na osnovu koje je moguće utvrditi dovoljno tačne vrednosti koeficijenta zasićenja za polja viših harmonika ( $K_{hS,n}$ ) za standardne asinhronne motore.

Vrednosti koeficijenta zasićenja za polja viših harmonika ( $K_{hS,n}$ ) su određene po postupku koji je opisan u narednom poglavlju – „Postupak određivanja koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS,n}$ )”. Za vrednosti koeficijenta zasićenja osnovnog harmonika  $K_{1S}$ , koje leže između dve naznačene vrednosti u tabeli 1,  $K_{1S,n}$  (1) i  $K_{1S,n}$  (2), vrednost koeficijenta zasićenja za polja viših harmonika ( $K_{hS,n}$ ) se određuje interpolacijom odgovarajućih vrednosti  $K_{hS,n}$  (1) i  $K_{hS,n}$  (2).

## 2.2. Postupak za određivanja vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS,n}$ )

S obzirom da se visokofrekventni gubici opterećenja određuju iz testa inverznog obrtanja po izrazu (9), pri vrednosti struje sračunate po izrazu (6), to je, u cilju određivanja nominalne vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS,n}$ ), standardni postupak [1] dopunjen sa:

- sprovođenjem ogleda praznog hoda za promenljive vrednosti napona i
- odgovarajućim postupkom, koji se predlaže, za određivanje vrednosti koeficijenta  $K_{hS,n}$ .

Na osnovu podataka iz ogleda praznog hoda, za tipičan asinhronni motor, u oblasti napona  $U_0/U_R = 0,25 \div 1,15$  (slika 1), nacrtana je kriva praznog hoda datog motora

$$I_0/I_R = f(U_0/U_R) \quad (13)$$

gde su:

Tabela 1.

Tabelarni prikaz zavisnosti  $K_{hS,n} = f(K_{1S,n})$ , za uobičajeno područje krivih praznog hoda  $I_0 = f(U_0)$

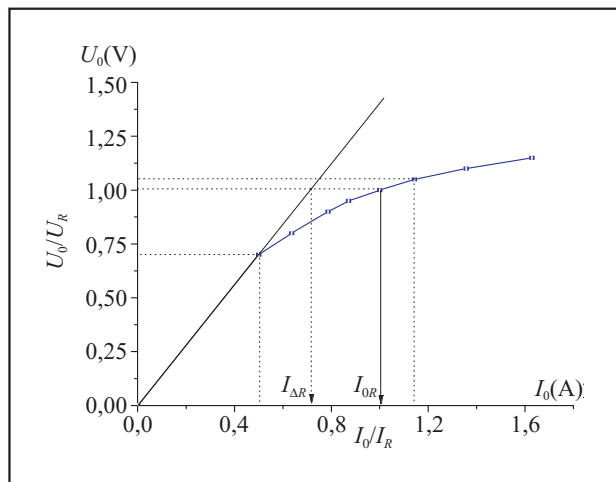
$K_{1S,n}$	1,000	1,113	1,222	1,284	1,400	1,524	1,727	1,982
$K_{hS,n}$	1,000	1,024	1,076	1,112	1,165	1,232	1,337	1,480

$U_R$  i  $U_0$  – referentna i ispitivane vrednosti napona motora;

$I_R=I_0$  – vrednost struje praznog hoda pri referentnoj vrednosti napona  $U_0=U_R$ ;

$I_{0i}$  – izmerene vrednosti struja praznog hoda pri vrednostima napona  $U_{0i}$  i

$I_{\delta i}$  – apscise presečnih tačaka pravih  $U_0=K I_{\delta}$  i  $U=U_{0i}$  (slika 1).



Slika 1. Kriva praznog hoda asinhronog motora  
 $I_{0i}/I_R = f(U_{0i}/U_R)$

Navedena zavisnost praznog hoda je data i u tabelarnom prikazu (gornji deo tabele 2). Odgovarajuće vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni (1-vi) harmonik su određene po formuli

$$K_{1S,i} = I_{0i}/I_{\delta i} \quad (14)$$

$$K_{1S,i} = (I_{0i}/I_{0R}) / (I_{\delta i}/I_{0R}) \quad (14a)$$

gde su  $I_{0i}$  i  $I_{\delta i}$  – vrednosti navedenih struja, za datu vrednost napona praznog hoda  $U_{0i}$  (ili  $U_{0i}/U_R$ ) (slika 1). Pošto je nivo magnetnog zasićenja praktično određen dominantnim poljem osnovnog harmonika, to se može smatrati da zona zasićenja (slika 2) počinje u tački gde je

$$F_{0n,i} \cdot \cos \Theta_{Si} = F_{Smin,i} \quad (15)$$

$$I_{0n,i} \cdot \cos \Theta_{Si} = I_{Smin,i} \quad (15a)$$

odnosno taj položaj je, od ose gde je polje maksimalno ( $\Theta=0$ ), na odstojanju  $\Theta_{s,i}$ :

$$\Theta_{s,i} = \arccos (F_{Smin,i} / F_{0n,i}) \quad (16)$$

$$\Theta_{s,i} = \arccos (I_{Smin,i} / I_{0n,i}) \quad (16a)$$

gde je  $\Theta_{s,i}$  – odgovarajući (ugaoni) položaj duž međugvožđa mašine, a

$F(\Theta_i)$  – magnetopobudna sila odgovarajućeg harmonika duž međugvožđa mašine (u tački  $\Theta=\Theta_i$ ).

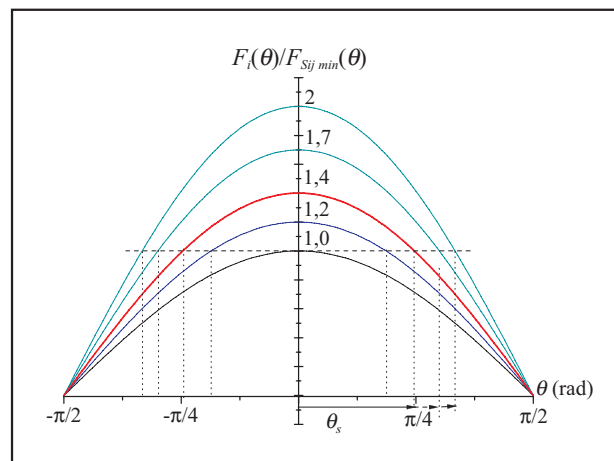
Relativna širina zone, koja ne trpi zasićenje (slika 2), je

$$\Delta\Theta_1 = \pi/2 - \Theta_s, \quad (17)$$

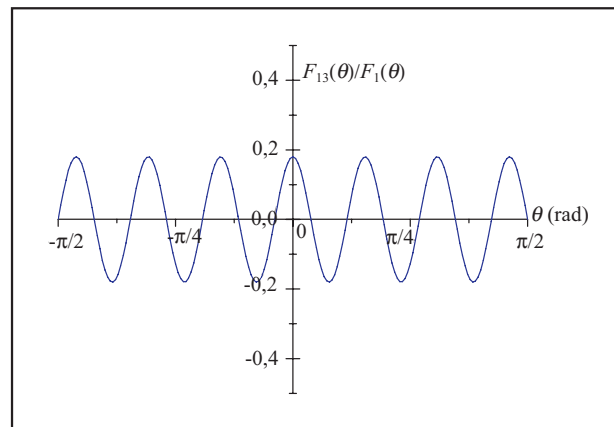
odnosno, njena relativna širina ( $l_s/\tau$ ) na dužini polnoga koraka osnovnog harmonika ( $\tau$ ), iznosi

$$l_s/\tau = \Delta\Theta_1/(\pi/2) \quad (17a)$$

i približno je ista za sve harmonike.



Slika 2. Uticaj nivoa polja osnovnog harmonika na širinu zone koja trpi zasićenje ( $2\Theta_{s,i}$ )



Slika 3. Prikaz polja 13-og harmonika na dužini polnoga koraka za osnovni harmonik ( $\tau_1=\pi$ )

Relativni deo magnetnog fluksa viših harmonika (slika 3), koji trpi zasićenje, je brojno jednak relativnoj širini zone zasićenja (slika 2). Pri tome je logično pretpostaviti da se vrednosti faktora zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ), duž zone zasićenja-položaja ( $\Theta_i$ ), menjaju kao i vrednosti faktora  $K_{1S}$ , i

približno uzimaju iste iznose  $K_{hS}(i) = K_{1S}(i)$ . Tako se na osnovu navedenih pretpostavki i odgovarajućih razmatranja, na osnovu slika 4a i slika 4b, dolazi do izraza za izračunavanje koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ):

$$K_{hS} = 1 \frac{\Delta\Theta_1/(\pi/2) + \sum_{i=2}^{i=n} 0,5 (K_{1s,(i)} + K_{1s,(i)})}{\Delta\Theta_1/(\pi/2)} \quad (18)$$

gde je

- $\Delta\Theta_1 = \pi/2 - \Theta_s$  zona mašine koja nije zasićena, tj. zona duž koje je vrednost koeficijenta zasićenja  $K_{1s} = 1$ , a čija je relativna širina  $\Delta\Theta_1/(\pi/2)$ ,
- $\Delta\Theta_i$  su pojedini delovi zone zasićenja, čije su širine

$$\Delta\Theta_i = (\Theta_{S,(i)} - \Theta_{S,(i-1)}) (2/\pi) \quad (19)$$

između odgovarajućih ugaonih položaja na obimu statora (i rotora)  $\Theta_{S,(i)}$  i  $\Theta_{S,(i-1)}$

Tabela 2.

Postupak određivanja vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ), za motore sa tipičnom karakteristikom magnećenja, i izračunate vrednosti koeficijenta  $K_{hS}$

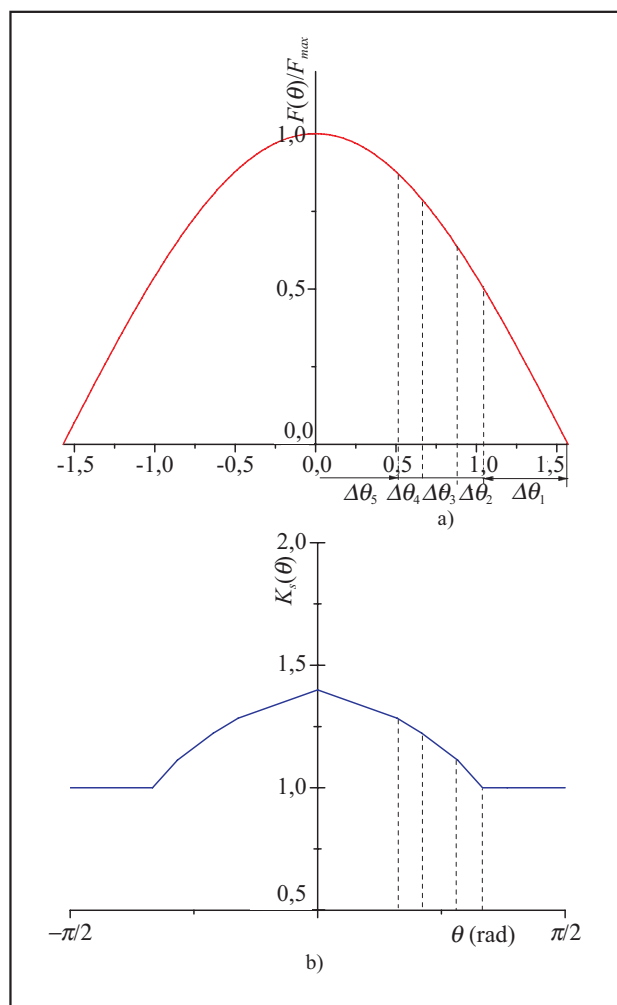
Tipična karakteristika magnećenja, $U_R$ -izabrani referentni napon									
$U_0/U_R$	0,0	0,700	0,800	0,900	0,950	1,000	1,050	1,100	1,150
$I_0/I_{0R}$	0,0	0,500	0,636	0,786	0,871	1,000	1,143	1,357	1,982
$I_{\delta}^2/I_{0R}^2$	0,0	0,500	0,571	0,643	0,678	0,714	0,750	0,786	0,821
$K_{s1}$	1,0	1,000	1,113	1,222	1,283	1,400	1,524	1,727	1,982
$U_{0n}/U_R = 0,8, K_{s1} = 1,113; K_{sv} = 1,024$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	0,666 0	0,000 0						
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,575 9	0,424 0						
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,575 9	0,448 1						
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$				<b>1,024</b>					
$U_{0n}/U_R = 0,9, K_{s1} = 1,222; K_{sv} = 1,077$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	0,881	0,628	0,000					
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,439	0,161	0,400					
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,439	0,170	0,467					
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$				<b>1,077</b>					
$U_{0n}/U_R = 0,95, K_{s1} = 1,283; K_{sv} = 1,112$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	0,959	0,752	0,445	0,000				
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,389	0,132	0,195	0,284				
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,389	0,139	0,228	0,356				
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$					<b>1,112</b>				
$U_{0n}/U_R = 1,00, K_{s1} = 1,400; K_{sv} = 1,165$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	1,047	0,881	0,666	0,514	0,000			
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,333	0,105	0,137	0,097	0,327			
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,333	0,111	0,160	0,122	0,439			
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$						<b>1,165</b>			
$U_{0n}/U_R = 1,05, K_{s1} = 1,524; K_{sv} = 1,232$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	1,118	0,981	0,812	0,704	0,505	0,000		
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,288	0,088	0,107	0,069	0,126	0,322		
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,288	0,092	0,125	0,086	0,170	0,471		
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$							<b>1,232</b>		
$U_{0n}/U_R = 1,10, K_{s1} = 1,727; K_{sv} = 1,337$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	1,193	1,083	0,953	0,874	0,742	0,569	0,000	
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,240	0,070	0,083	0,050	0,084	0,110	0,362	
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,240	0,074	0,097	0,063	0,112	0,161	0,589	
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$								<b>1,337</b>	
$U_{0n}/U_R = 1,15, K_{s1} = 1,982; K_{sv} = 1,480$									
$\Theta_i$	$\pi/2$	1,259	1,169	1,067	1,006	0,909	0,792	0,585	0,000
$\Delta\Theta_i/(\pi/2)$		0,199	0,057	0,065	0,039	0,061	0,074	0,132	0,373
$K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$		0,199	0,060	0,076	0,048	0,083	0,109	0,214	0,691
$K_{sv} = \sum K_{sv,med,i} \Delta\Theta_i$								<b>1,480</b>	

$$\Theta_{S,(i)} = \arccos (F_{0i}(\Theta_i)/F_{0m}) \quad (20)$$

Za zone zasićenja širine  $\Delta\Theta_i$ , srednje vrednosti koeficijenta zasićenja iznose  $0,5(K_{1S,(i)} - K_{1S,(i-1)})$ :

U tabeli 2 je ilustrovan postupak određivanja vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ), za različite relativne vrednosti napona motora, tj. za vrednosti  $U_0/U_R=0,8; 0,9; 0,95; 1,0; 1,05; 1,10$  i  $1,15$ . Najvažniji rezultati, u vidu zavisnosti  $K_{hS}=f(K_{1S})$  su dati u tabeli 1, i mogu se direktno koristiti pri primeni postupka, na način kako je to napred navedeno.

Za nominalnu vrednost koeficijenta zasićenja  $K_{1S,n} = 1,4$ , određenog pomoću slika 1 i izraza (14), po predloženom postupku ilustrovanom pomoću slika 4a i slika 4b, sračunate su odgovarajuće vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ) pomoću izraza (18):



Slika 4. Promene koeficijenta zasićenja duž polnog koraka motora-zavisnost  $K_S(\Theta_i)$  – slika b, za slučaj kada mašine koja nije zasićena ( $K_{1S}=1$ ) samo na zoni širine  $\Delta\Theta_i$ -slika a

$$K_{hS}=1 \times 0,333 + 0,5(1,113+1)0,105 + 0,5(1,113+1,222)0,137 + 0,5(1,222+1,283)0,097 + 0,5(1,283+1,400)0,327 = \mathbf{1,112}$$

To znači da su gubici snage zbog viših prostornih harmonika manji za  $K_{hS}=1,112$  puta, u odnosu na vrednosti izmerene u ogledu inverznog obrtanja pri vrednosti struje ( $I_t$ )-izraz (6), i iznose (izraz 9):

$$LL_r = (1/1,112)^2 \cdot LL_{r,t}$$

$$LL_r = 0,809 LL_{r,t}$$

što je manje za 19,1 %, u odnosu na vrednost koja bi se dobila po postupku datom u navedenom standardu [1].

Na osnovu izloženog (izraz (18) postaje očigledno da su vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ) niže, u odnosu na odgovarajuće vrednosti koeficijenta  $K_{1S}$ . Brojčani odnosi navedenih smanjenja se ilustruju preko vrednosti  $K_{hS}=1,112 < 1,400 = K_{1S}$ , u datom primeru, kao i na osnovu vrednosti za  $K_{1S}$  i  $K_{hS}$  u tabeli 2.

U svakom konkretnom slučaju se može sprovesti postupak određivanja vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike ( $K_{hS}$ ), na način koji je ilustrovan u tabeli 2. U cilju povećanja tačnosti, korisno je poslednju zonu (zonu najvećeg zasićenja), podeliti na 2-3 manje zone. Utvrđeno je da bi tako izračunate vrednosti koeficijenta  $K_{hS}$ , u tabeli 2, bile veće do 1%.

### 3. PROVERE TAČNOSTI POBOLJŠANOG POSTUPKA I PRIMENA

Tačnost predloženog postupka je proverena merenjima dodatnih gubitaka opterećenja na nekoliko primera, kao i na osnovu rezultata uporednih merenja koji su saopšteni u literaturi. Naime, predloženom korekcijom izmerenih vrednosti po metodi inverznog obrtanja, moguće je smanjiti greške koje su kvantifikovane u literaturi, ili ih učiniti zanemarljivim.

#### 3.1. Provere postupka na primerima iz literature [7]

Najpotpunija ispitivanja i uporedne analize dobijenih vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja su date u [7]. Daju se vrednosti dodatnih gubitaka, za ispitivane motore, koje su utvrđivane na različite načine, i to:

–  $W_{LL, C}$  – vrednosti dodatnih gubitaka koje su dobijene računskim postupcima;

- $W_{LL, CM}$  – vrednosti dobijene proračunima na osnovu izmerenih vrednosti struja i harmonika polja;
- $W_{LL, B}$  – izmerene vrednosti indirektnim postupkom merenja, tj. po standardu IEEE 112, Metod B, i
- $W_{LL, E}$  – izmerene vrednosti po metodi inverznog obrtanja, tj. po standardu IEEE 112, Metod E.

U tabeli 3 su dati odgovarajući rezultati merenja za navedeni asinhroni motor snage 11 kW. Na osnovu malih odstupanja između izmerenih vrednosti  $W_{LL, B}$  i vrednosti dobijenih proračunima  $W_{LL, C}$  i kombinovanim postupcima merenja i proračuna  $W_{LL, CM}$ , zaključuje se da se vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja dobijene indirektnim postupkom merenja, tj. po standardu IEEE 112 B, mogu smatrati tačnim. Time se potvrđuje stav da su izmerene vrednosti istih po metodi inverznog obrtanja, tj. po standardu IEEE 112 -Metod E, znatnije povećane: Tako je odnos navedenih vrednosti  $W_{LL, E} / W_{LL, B} = 1,687 \cdot 5$ , u prvom (1), i 1,532 u drugom primeru (2)-tabela 3. Ako se navedeno odstupanje želi objasniti samo uticajem zasićenja magnetnog kola za više harmonike dolazi se do vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike  $K_{hS} = 1,299$ , u prvom, i 1,238 u drugom primeru, tj. do odgovarajućih vrednosti za koeficijente zasićenja za osnovni harmonik  $K_{1S} = 1,641$ , u prvom, i 1,534 u drugom primeru (tabela 3). Moguće je da su stvarne vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik nešto niže, za ispitivane motore, ali bi se i tada po predloženom postupku dobile vrednosti dodatnih gubitaka koje se malo razlikuju od (tačnih) vrednosti  $W_{LL, B}$  dobijenih u [7].

### 3.2. Primeri primene i provere postupka pri merenju dodatnih gubitaka opterećenja

Za proveru predloženog postupka analizirani su rezultati merenja dodatnih gubitaka opterećenja, iz-

merenih po metodi inverznog obrtanja, tj. po Standardu IEEE 112, Metod E: kao i njihovih komponenti:

- $LL_s$  – Dodatni gubici opterećenja u statoru, koji se mere na motoru sa izvađenim rotorom, i
- $LL_{r,t}$  – Dodatni visokofrekventni gubici opterećenja, izmereni po metodi inverznog obrtanja.

Merenja su izvršena na istom motoru, motoru 2ZK100Ld-4,3 kW (tabela 4), u sklopu utvrđivanja vrednosti stepena iskorišćenja. Pri tom je motor bio priključen na nominalni napon od 380 V, u prvom, i na sniženi napon od 278 V ( $0,732U_n$ ) u drugom slučaju. Izmerene vrednosti, ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja  $W_{LL, B}$ , tj. vrednosti izmerene indirektnim postupkom merenja (Standardu IEEE 112, Metod B), pri nominalnom naponu su manje od odgovarajućih vrednosti pri sniženom naponu od 278 V ( $0,732U_n$ )- tabela 4. Kako se vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja u statoru ( $LL_s$ ) ne menjaju, jer se uticaj zasićenja na flukseve bočnog i žlebnog rasipanja može zanemariti, to su vrednosti visokofrekventnih gubitaka opterećenja,  $LL_{r,t} = W_{LL} - LL_s$ , pri nominalnom naponu, manje od odgovarajućih vrednosti pri sniženom naponu od 278 V ( $0,732U_n$ )-tabela 4. Tako su, izmerene vrednosti gubitaka  $W_{LL}$  i  $LL_{r,t}$  po metodi inverznog obrtanja, znatnije povećane pri nominalnom naponu, pa je odnos navedenih vrednosti  $LL_{LL, E} / LL_{LL, B} = 1,250-1,742$ . Srednji odnos tih povećanja se ne razlikuje mnogo od kvadrata vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike  $K_{hS}^2 = 1,545$ , koji je utvrđen na osnovu izmerene vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik  $K_{1S} = 1,546$ , pri nominalnom naponu.

Izmerene vrednosti gubitaka  $W_{LL}$  i  $LL_{r,t}$  po metodi inverznog obrtanja, pri sniženom naponu od 278 V ( $0,732U_n$ ), se malo razlikuju od odgovarajućih vrednosti dobijenih indirektnim postupkom merenja (Standard IEEE 112, Metod B) – tabela 4: Tako je odnos navedenih vrednosti  $LL_{LL, E} / LL_{LL, B} = 0,975-1,143$ , za opterećenja oko nominalnih po struji, a srednji odnos tih odstupanja se ne razlikuje

Tabela 3.

Vrednosti visokofrekventnih gubitaka opterećenja ( $W_{LL}$ ) u asinhronom motoru snage 11 kW,  $p=2$  para polova, broj žlebova na statoru  $S=36$ , i dva rotora sa različitim brojem žlebova  $R_1=28$ ,  $R_2=44$  [7], određene:  $W_{LL, C}$  – po proračunu; i  $W_{LL, CM}$  – po proračunu na osnovu izmerenih vrednosti struja i polja viših harmonika;  $W_{LL, B}$  – merenjem po St. IEEE 112 – Metod B, i  $W_{LL, E}$  – merenjem po metodi inverznog obrtanja-IEEE 112, Metod E [1]

	$W_{LL, C}$ $W$	$W_{LL, CM}$ $W$	$W_{LL, B}$ $W$	$W_{LL, E}$ $W$	$\frac{W_{LL, E}}{W_{LL, B}}$	$K_{hS} \approx \sqrt{\frac{W_{LL, E}}{W_{LL, B}}}$	$K_{1S} = f(K_{hS})$ (Table 1)
Asinhroni motor snage 11 kW sa neiskošenim žlebovima							
1. Broj žlebova na rotoru $R_1=28$	75	76	80	135	1,687	1,299	1,641
2. Broj žlebova na rotoru $R_2=44$	72	75	77	118	1,532	1,238	1,534

Tabela 4.

Izmerene vrednosti visokofrekventnih gubitaka opterećenja u asinhronom motoru 2ZK100Ld-4,3 kW, po Standardu IEEE 112: po direktnom (Metod E), i indirektnom (Metod B) postupku.

	1. Direktno merenje po postupku inverznog obrtanja-IEEE 112, Metod E [1]: – Komponenta gubitaka u statoru(LLs) iz testa sa odstranjenim rotorom test, – Visokofrekventni gubici u rotoru (LLr,t) iz testa inverznog obrtanja.						
1.1. $I_t = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ (A)	0	2,0	3,8	5,7	7,3	9,4	
1.2. $LL_s$ (W)	0	2,9	10,6	22,5	34,4	51,2	
1.3. $LL_{r,t}$ (W)	0	10,4	39,0	87,2	140,6	225,1	
1.4. $W_{LL} = LL_s + LL_{r,t}$ (W)	0	13,3	49,6	109,7	175,0	276,3	
	2. Indirektno merenje (Metod B): $W_{LL} = (P_i - P_0) - (I_1^2 R_s + I_2^2 R_r + P_{Fe} + P_{fw})$ , $U = U_n = 380$ V, $I_0 = I_{0n} = 4,26$ A; $K_{1S} = 1,546 \rightarrow K_{hS} = 1,243$ i $K_{hS}^2 = 1,545$						
2.1. $I_t = \sqrt{I_1^2 - I_{0n}^2}$ (A)	0	2,0	3,8	5,7	7,3	9,4	
2.2. $W_{LL,B}$ (W)	0	15,8	41,8	73,9	115,1	165,4	
2.3. $LL_s$ (W)	0	3,2	10,6	22,5	34,4	51,2	
2.4. $LL_{r,B} = W_{LL,B} - LL_s$ (W)	0	12,6	31,2	51,4	80,7	114,2	
2.5. $LL_{r,t}/LL_{r,B}$		0,825	1,250	1,696	1,742	1,971	
	3. Indirektno merenje (Metod B): $W_{LL} = (P_i - P_0) - (I_1^2 R_s + I_2^2 R_r + P_{Fe} + P_{fw})$ , $U = 0,732$ $U_n = 278$ V, $I_0 = I_{0n} = 2,10$ A < $I_{0n}$ ; $K_{1S} = 1,039 \rightarrow K_{hS} = 1,003$ i $K_{hS}^2 = 1,006$						
3.1. $I_t = \sqrt{I_1^2 - I_{0n}^2}$ (A)	0	1,9	4,0	6,5	9,5	10,2	11,7
3.2. $W_{LL,B}$ (W)	0	16,7	53,6	146,8	253,2	289,1	359,1
3.3. $LL_s$ (W)	0	2,6	11,6	29,2	52,3	60,3	79,3
3.4. $LL_{r,B} = W_{LL,B} - LL_s$ (W)	0	14,1	44,1	117,6	200,9	228,8	279,8
3.5. $LL_{r,t}/LL_{r,B}$		0,666	0,975	1,066	1,143	1,1988	1,289
PRIMEDBA:	Srednje vrednosti (boldiranih) odnosa $LL_r/LL_{r,B}$ su, približno, jednake odgovarajućim vrednostima $K_{hS}^2$						

mnogo od kvadrata vrednosti koeficijenta zasićenja za više harmonike  $K_{hS}^2 = 1,000$  6, koji je utvrđen na osnovu izmerene vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik  $K_{1S} = 1,039$ , pri datom naponu od 278 V ( $0,732U_n$ ). To ujedno potvrđuje stav da su izmerene vrednosti visokofrekventnih gubitaka opterećenja, po metodi inverznog obrtanja, tačnije što su vrednosti koeficijenta zasićenja za osnovni harmonik  $K_{1S}$  manje, tj, kada su vrednosti  $K_{1S} \rightarrow 1$ , ili je  $K_{1S} \approx 1$ .

#### 4. ZAKLJUČAK

Kao i standardni postupak [1], i ovaj poboljšani postupak je pogodan kada su u pitanju motori većih vrednosti stepena iskorišćenja (>90 %), tj. motori srednjih i većih snaga kao i energetska efikasni motori – motori sa visokim ili povišenim vrednostima stepena iskorišćenja. Pošto je znatno jednostavniji od drugih postupaka, očekuje se da će se povećati primena ovako poboljšanog postupka inverznog

sinhronog obrtanja za merenje dodatnih gubitaka opterećenja u asinhronim motorima..

Navedeni postupak treba, što pre, staviti na uvid odgovarajućim Nacionalnim i Internacionalnim telima koja propisuju postupke za određivanje gubitaka i stepena iskorišćenja rotacionih električnih mašina, kako bi došlo do provere i primene predloženog postupka. Poseban interes bi mogli imati proizvođači asinhronih motora kao i odgovarajuća udruženja tih proizvođača pošto aktuelni postupak inverznog sinhronog obrtanja precenjuje dodatne gubitke opterećenja i time umanjuje vrednost stepena iskorišćenja ispitivanih motora. Za navedeni postupak je zatražen patent, i sažetak prijave je objavljen u „Glasniku intelektualne svojine” [9].

#### 5. PRILOZI:

##### 5.1. Postupak testa inverznog obrtanja [1]

Komponenta dodatnih gubitaka ( $LL_r$ ), koji nastaju zbog viših harmonika, se određuje pomoću te-

sta inverznog obrtanja. Motor se u sklopljenom stanju (za razliku od sklopa sa odstranjenim rotorom koji se koristi za merenje dodatnih gubitaka osnovne frekvencije ( $LL_r$ )) priključuje na regulisani izvor napona osnovne frekvencije. Rotor se istovremeno pomoću dodatnog pogona obrće sinhronom brzinom u smeru koji je suprotan obrtnom polju statora.

Električna snaga koju motor uzima iz mreže se meri. Vrednost struje treba da bude jednaka izračunatoj po izrazu (6). Mehanička snaga koja je potrebna za pogon rotora se meri u dva slučaja- namotaj statora sa i bez proticanja struje.

Ukupni dodatni gubici ( $W_{LL}$ ) se izračunavaju kao:

$$W_{LL} = LL_s + LL_r \quad (A1)$$

U jednačini (A1), vrednosti  $LL_s$  i  $LL_r$  se izračunavaju za iste vrednosti struje  $I_p$ , gde su:

$LL_s = W_s - R_s I^2$  – komponenta dodatnih gubitaka polja osnovne frekvencije u statoru motora;

–  $W_s$  – Električna snaga koju motor sa odstranjenim rotorom uzima iz mreže

–  $R_s I^2$  – Gubici snage u namotaju statora.

Komponenta visokofrekventnih dodatnih gubitaka ( $LL_r$ ) se izračunava po izrazu:

$$LL_r = (P_r - P_f) - (W_r - LL_s - R_s I^2) \quad (A2)$$

gde su:  $P_r$  – Mehanička snaga koja je potrebna za pogon rotora kada kroz namotaj statora protiče struja;

$P_f$  – Mehanička snaga koja je potrebna za pogon rotora kada kroz namotaj statora ne protiče struja i

$W_r$  – Električna snaga koju motor uzima iz mreže u testu inverznog obrtanja.

## 5.2. Uticaj harmonika magnetopobudne sile na tačnost testa inverznog obrtanja

1. Pri izvođenju izraza (A1), pretpostavljeno je da se dodatni visokofrekventni gubici u celosti pokrивaju iz mehaničke snage za pogon rotora ( $P_r$ ). Ali, dodatni visokofrekventni gubici opterećenja su, po definiciji, posledica struja statora. Svaki od harmonika magnetopobudne sile (m.p.s) statora, koji je pobuđen strujom osnovnog harmonika, prenosi odgovarajuću energiju kroz vazdušni procep i tako stvara komponentu odgovarajućih dodatnih gubitaka u rotoru. Može se smatrati da svaki harmonik m.m.s. deluje na poseban (fiktivni) motor koji je spregnut na istu osovinu kao i motor na koji deluje (samo) osnovni harmonik m.m.s. Za bilo koji har-

monik je pokazano [5] da se deo od snage koja odlazi na gubitke u rotoru ( $P_h = m I_h^2 R_{r,h}$ ) dobija preko statora. Tako generatorski harmonici (reda  $h=5, -11, -11$ ), vraćaju (odaju) snagu u mrežu preko statoru, a za harmonike reda 7, 13, 19 motor je u režimu kočnice i oni preko statora prenose u rotor određenu snagu. Tako se pokazuje da izmerenoj-sračunatoj vrednosti dodatnih gubitaka  $LL_r$  po (A1), treba da bude dodata (neto) vrednost navedenog učinka viših harmonika:

$$P_5/2 + P_7/4 - P_{11}/5 + P_{13}/7 + \dots - P_{S_1-1}/(S_1-1) + P_{S_1+1}/(S_1+1) \quad (A3)$$

gde su  $P_h = m I_h^2 R_{r,h}$  gubici snage u rotoru od struja  $h$ -tog harmonika ( $h=5, 7, 11, 13, \dots, S_1-1, i S_1+1, S_1$ -broj žlebova statora po paru polova).

Greška izražena jednačinom (A3) može biti pozitivna ili negativna, zavisno od relativnih vrednosti efekata direktnih i inverznih harmonika. Uticaj te greške može biti veći samo kod velikih mašina, koje mogu imati značajne gubitke zbog pojasnih harmonika ( $h=5, 7$ ). Iako žlebni harmonici prouzrokuju najveći deo dodatnih visokofrekventnih gubitaka, reda  $S_1-1$  i  $S_1+1$ , njihov uticaj na navedenu grešku u izrazu (A3) je mali, jer je mala vrednost algebarskog zbira  $-P_{S_1-1}/(S_1-1) + P_{S_1+1}/(S_1+1)$ .

2. Drugi nedostatak merenja visokofrekventnih gubitaka metodom inverznog obrtanja je u tome što se frekvencije indukovanih struja viših harmonika u rotoru unekoliko razlikuju od istih indukovanih u nominalnom režimu, pa se i odgovarajuće rezistancije rotora unekoliko razlikuju. Za standardne namotaje sa celim brojem žlebova po fazi i polu, ta razlika je konstantna i iznosi  $2f$ , tačnije  $-2f$ , za harmonike reda  $h= -5, -11, -17, i +2f$ , za harmonike 7, 13, 19, tako da je uvedena greška verovatno mala u većini slučajeva.

3. Argument koji se često ističe protiv ovog postupka je u činjenici da je magnetno polje znatno manje od istog u normalnom radu [5, 6, 7, 8]. Iz tog razloga, rezultati koji se dobiju iz testa inverznog obrtanja mogu biti sa velikom greškom [7, 8]. Tako dobijene vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja mogu biti veće i do 40 % [7], u odnosu na stvarne izmerene pri nominalnom opterećenju.

Predlog dat u ovom radu omogućava da se ta greška većim delom (često i u potpunosti) eliminiše.

Test inverznog obrtanja omogućava direktno merenje visokofrekventnih dodatnih gubitaka opterećenja, i ima sledeće praktične prednosti:

– postupak je ekonomičan-potreban je pogonski motor, ili dinamometar, čija je snaga samo 10-20 % od snage ispitivanog motora;

- dodatni gubici opterećenja učestvuju sa znatno većim iznosom (20-30 %) u ukupnoj snazi koja se meri, u odnosu na režim kada je motor normalno opterećen, i
- test inverznog obrtanja je relativno jednostavan i nije skup za primenu.

## 6. LITERATURA

- [1] IEEE St. 112/1996. IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR POLYPHASE INDUCTION MOTORS AND GENERATORS.
- [2] Standard IEC 34-2, 1983. Part 2: METHODS FOR DETERMINING LOSSES AND EFFICIENCY OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES.
- [3] IEC Standard 61972, 1998. METHOD FOR DETERMINING LOSSES AND EFFICIENCY OF THREE-PHASE CAGE INDUCTION MOTORS.
- [4] B. Slaets, P. Van Roy, R. Belmans, ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MACHINES, Proceedings of the ICEM 2000, Vol. III, pp. 1503-1507.
- [5] B. J. Chalmers, A. C. Williamson, STRAY LOSSES IN SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS, Proc.IEE, 1963, 110 (10), pp. 1973-1977.
- [6] K. K. Schwarz, SURVEY OF BASIC STRAY LOSSES IN SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS, Proc.IEE, 1964. 111, pp. 1565-1574.
- [7] F. Taegen, R. Walezak, EXPERIMENTAL VERIFICATION OF STRAY LOSSES IN CAGE INDUCTION MOTORS UNDER NO-LOAD, FULL-LOAD AND REVERSE ROTATION TEST, Archiv für Electrotechnik 70 (1987), pp. 255-263.
- [8] A. M. [aripov, TO^NBÝ METOD OPREDELENĀ NAGRUZO^NBH DOBAVO^NBH POTERÝ V ASINHRONNBH KOROTKOTAMKNUTBH DVIGATELĀH, Ćlektrotehnika 1969, No.9, str.14-19.
- [9] GLASNIK INTELEKTUALNE SVOJINE SRBIJE I CRNE GORE, br. 3/2005. god, str. 508, Patentna prijava broj P-851/01 od 28. 11. 2001. godine (autor i nosilac prijave Miloje Kostić).

Rad je primljen u uredništvo 1. 03. 2007. godine



**Miloje M. Kostić** je rođen 1950. godine u Bioski gde je završio i osnovnu školu. Srednju elektrotehničku školu je završio 1969. godine u Užicu. U Beogradu je na Elektrotehničkom fakultetu diplomirao 1974. godine, a magistrirao 1983. godine. Doktorirao je 1990. godine na Tehničkom fakultetu u Čačku.

U preduzeću „Prvi partizan” u Užicu, je radio od 1974-1991. godine, kada prelazi u Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla” u Beogradu, gde radi i sada. Ostvario je značajne rezultate u oblastima (1) Racionalnog korišćenja električne energije u industriji, (2) Elektroenergetike, (3) Energetike motornog pogona i (4) Električnih mašina.

Do sada je objavio 3 knjige, od kojih 2 monografije autora, i 95 radova - 42 u nacionalnim i međunarodnim časopisima i 53 rada u zbornicima domaćih i internacionalnih konferencija. Autor je više primenjenih originalnih tehničkih rešenja i patenata.



# Model evaluacije upotrebnog kvaliteta rotornih bagera na bazi ekspertskih procena

Stručni rad  
UDK: 621.879; 622.232

---

*Rezime:*

*U radu se daje model evaluacije upotrebnog kvaliteta rotornog bagera na bazi analize informacija datih u vidu ekspertskih procena. Formirani matematički model koristi teoriju fazi skupova za integraciju performansi pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju, datih u obliku lingvističkih opisa, do nivoa definisanja sigurnosti funkcionisanja. Sigurnost funkcionisanja je korišćena kao performansa koja na najkompleksniji način sagledava upotrebnost kvaliteta određenog tehničkog sistema. Za integraciju dobijenih ocena sigurnosti funkcionisanja sa nižih nivoa na više hijerarhijske nivoe rotornog bagera korišćena je teorija činjenica (engl. Evidence Theory) operacionalizovana kroz ER-algoritam.*

**Ključne reči:** rotorni bager, sigurnost funkcionisanja, ekspertska procena, fazi skupovi, ER-algoritam

---

*Abstract:*

*EVALUATION MODEL FOR BUCKET WHEEL EXAVATORS  
QUALITY OF SERVICE BASED ON EXPERTISE JUDGMENT*

*Evaluation model for bucket wheel excavator quality of service is analyzed in this paper. Model was formed to introduce into analysis information created as experts' judgments. Fuzzy sets theory was used for integration of performances of reliability, maintainability and logistic support, given as linguistic descriptions, to the level of defining dependability. Dependability was used as the most complex performance which covers in total quality of service for specific technical system. Evidence Theory, i.e. ER-algorithm, was used for integration of obtained dependability estimations for the bucket wheel excavator, from lower levels up to the higher ones.*

**Key words:** bucket wheel excavators, dependability, expertise judgment, fuzzy sets, ER-algorithm

---

## 1. UVOD

Strateška orijentacija menadžmenta savremene rudarske industrije, u najvećoj meri je vezana za kvalitetno definisanje parametara upotrebnog kvaliteta odgovarajuće mehanizacije na rudniku. Poznato je da nivo proizvodnje rudnika najvećim delom za-

visi od raspoloživosti mehanizacije, dok sa druge strane, najveći broj rudarskih mašina osnovne mehanizacije predstavlja jedne od najkompleksnijih tehničkih sistema u smislu upravljanja njihovim životnim ciklusom. Pomenute konstatacije su posebno izražene u slučaju rotornog bagera, koji se često uzi-

*Dr Miloš Lj. Tanasijević, dipl. ing. rudarstva, tan@rgf.bg.ac.yu,*

*doc. dr Dejan D. Ivezić, dipl. ing. mašinstva, ivezic@rgf.bg.ac.yu – Rudarsko-geološki fakultet, 11 000 Beograd, Dušina 7*

ma kao sinonim za mašinu osnovne mehanizacije na rudniku.

Međunarodnim standardom ISO IEC-300, kao i našim standardom JUS IEC-300 definisan je termin sigurnost funkcionisanja, koji je definisan kao zajednički termin koji se koristi da opiše performansu raspoloživosti i faktore koji na nju utiču: performansu pouzdanosti, performansu pogodnosti održavanja i performansu podrške održavanju. Sa druge strane, navedeni faktori, tj. performanse, sigurno da su najizraženiji pokazatelji pominjanog upotrebno kvaliteta tehničkog sistema. Drugim rečima, praćenje i analiza pokazatelja sigurnosti funkcionisanja odgovarajućih mašina, trebalo bi da se definišu kao jedan od osnovnih zadataka upravljačkih struktura na rudniku. Praćenje se odvija kroz više koncepcija, od onih na bazi sistemskih nauka, preko niza postupaka merenja i kontrole pa do modela na bazi ekspertskih mišljenja. Iskustva, odnosno ekspertске procene prirodno se daju u obliku lingvističkih opisa u adekvatnom sistemu vrednovanja. Kvalitetno koncipirana ekspertska mišljenja često sadrže, doduše u nekvanitativnom obliku, i rezultate niza eksplicitnih stručnih analiza, merenja i sl. Osnovni problem je sistematizacija ovakvih znanja i iskustava, odnosno formiranje matematičko-koncepcijskog modela koji može da apsorbuje sve informacije koje mogu da se dobiju u vidu ekspertskih mišljenja i da zadrži njihovu specifičnu težinu.

Analiza pojedinačnih pokazatelja sigurnosti funkcionisanja rotornog bagera je u određenoj meri prisutna u naučnim i stručnim krugovima. Metode analize pouzdanosti i pogodnosti održavanja najčešće se izražavaju u kvantitativnom obliku na bazi teorije verovatnoće, odnosno u obliku funkcije verovatnoće pojave bilo odgovarajućeg otkaza, za pouzdanost ili u obliku funkcije verovatnoće trajanja određene operacije održavanja, za pogodnost održavanja. Problem ovakvih istraživanja je u kvalitetu podataka koji se uglavnom na kopovima EPS-a teško dobijaju u potrebnom obliku. Naime, obično su rezultat dispečerskih lista, koje se odlikuju nepreciznošću i uopštenošću u beleženju odgovarajućih fenomena. U tom smislu kvalitetene analize obično se javljaju samo u relativno retkim (nedovoljno prisutnim) naučno-istraživačkim radovima.

Problem sinteze dobijenih performansi kroz hijerarhijsku strukturu tehničkog sistema obično se rešava modelima višekriterijumske analize sa višeatributivnom ocenom. Nedostatak ovakvih modela je upravo u tome što se pomenute ekspertске procene i mišljenja transformišu u čisto numeričku formu, odnosno gubi se njihova specifična težina.

Radi prevazilaženja navedenih problema, u ovom radu je formiran model za određivanje upo-

trebnog kvaliteta rotornog bagera na bazi analize informacija datih u vidu ekspertskih procena, koje su evidentno prisutne na potrebnom nivou. Kao mera i najpotpunija ocena upotrebno kvaliteta rotornog bagera korišćena je sigurnost funkcionisanja. Teorija fazi skupova je iskorišćena za integraciju performansi pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju do nivoa sigurnosti funkcionisanja na najnižim hijerarhijskim nivoima konstrukcije rotornog bagera. Za sintezu parcijalnih ocena sigurnosti funkcionisanja do viših nivoa rotornog bagera korišćena je teorija činjenica (engl. Evidence Theory), konkretno algoritam činjeničnog zaključivanja – ER (engl. Evidential Reasoning) algoritam.

## 2. ISTRAŽIVANJE UPOTREBNOG KVALITETA

Ukupna svojstva tehničkog sistema u savremenoj tehničkoj literaturi najčešće se izražavaju pojmom upotrebni kvalitet (engl. Quality of service), odnosno pojmom koji obuhvata osobine sistema vezane za njegov rad, kao i elemente podrške nužne da bi sistem mogao uspešno da radi. Opšte prihvaćena definicija pojma upotrebni kvalitet glasi: ukupni efekat radnih performansi koji određuje stepen zadovoljenja korisnika. Očigledno je da ovakav prilaz omogućava da se ukupna svojstva tehničkog sistema iskažu na način koji više odgovara korisniku. Karakteristično je da se tehnički sistem pri tome sagledava kompleksno, odnosno sa gledišta sistema u celini. Posmatra se praktično kroz sve faze životnog ciklusa, sa stanovišta raznih tehničkih i tehnoloških disciplina. Ovakav, tzv. sinergetski, prilaz razmatranju sistema u cilju određivanja upotrebno kvaliteta, počiva na kompleksnom i zajedničkom razmatranju svih problema na nivou kako sistema u celini tako i konkretnih fenomena i elemenata, obuhvatajući sve osobine, svojstva, performanse sistema i njihove međusobne uticaje. Pri tome, na nivou značajno višem u odnosu na nivo koji bi dalo razmatranje samo tehničkog stanja mašine.

Sa početkom razvoja sistemskih nauka, praktično od perioda posle II Svetskog rata, u odgovarajućoj tehničkoj literaturi vremenom je definisan niz pojmova, koji su na odgovarajući način izražavali karakteristična svojstva tehničkog sistema. Najprepoznatljiviji su sigurno: pouzdanost (engl. Reliability) kao pokazatelj ponašanja tehničkog sistema tokom vremena u radu i pogodnost održavanja (engl. Maintainability) kao pokazatelj ponašanja tehničkog sistema tokom vremena u otkazu, čije su implementacije doživele najprogressivniji razvoj. Kasnije se definiše i pojam podrška održavanju (engl. Maintenance support), koji zajedno postaju sastavni deo

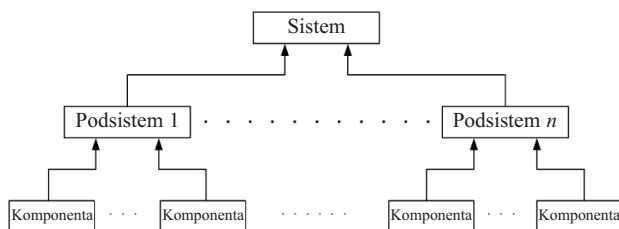
pojma sigurnost funkcionisanja kao suštinskog pokazatelja nivoa upotrebnog kvaliteta. Implementacija pojma sigurnost funkcionisanja detaljno je razrađena pomenutom serijom standarda IEC-300, sa posebnim akcentom na značaj stepena zadovoljenja korisnika odgovarajućim proizvodom, definišući zahteve za sigurnošću funkcionisanja kao i elemente programa vezane za organizaciju proizvođača sa organizacijom korisnika.

## 2.1. Matematičko-koncepcijski model

Matematičko-koncepcijski model koji na kvalitetan način uzima u obzir ekspertiska mišljenja, odnosno vrši evaluaciju upotrebnog kvaliteta rotornog bagera kroz performansu sigurnosti funkcionisanja, dat je u nastavku rada i izložen kroz tri koraka.

### 2.1.1. Hijerarhijska struktura

Prvi korak u formiranju evaluacijskog modela je definisanje hijerarhijske strukture tehničkog sistema, odnosno dekompozicija sistema, u ovom slučaju rotornog bagera. Tako se rotorni bager posmatra kroz 4 nivoa hijerarhijske strukture, odnosno: nivo komponente, nivo podsistema, nivo sistema i najviši nivo – sam rotorni bager.



Slika 1. Hijerarhijska struktura tehničkog sistema

Dekompozicija se vrši na osnovu konstrukcijsko – funkcionalnih celina. Na nivou sistema mogu da se identifikuju:

1. Sistem za kopanje;
2. Sistem za transport materijala;
3. Sistem za transport bagera;
4. Sistem za podizanje i spuštanje strele;
5. Sistem za obrtanje gornje gradnje bagera;
6. Noseća konstrukcija i
7. Pomoćna konstrukcija.

kao i sistemi: Elektro upravljanje i Elektro snabdevanje, koji ovde neće biti razmatrani.

Ostali nivoi hijerarhijske strukture bagera neće biti navedeni na ovom mestu zbog ograničenosti prostora. Treba pomenuti da kvalitet ocene tehni-

kog sistema u velikoj meri zavisi od načina dekompozicije, te da je neophodno izvršiti dekompoziciju do što nižih konstrukcijskih celina, ali sa jasno izraženom funkcijom.

### 2.1.2. Fazi propozicija

Najosetljiviji korak u izradi modela evaluacije tehničkog sistema je fazi propozicija, odnosno postupak koji se koristi za predstavljanje tvrdjenja koja sadrže lingvističke vrednosti. U tom smislu neophodno je, na bazi prisutnih informacija o razmatranom tehničkom sistemu, definisati: lingvističke vrednosti i lingvističke promenljive.

U radovima koji se bave tematikom fazi skupova i fazi odlučivanja ne postoje eksplicitne preporuke oko načina imenovanja odgovarajućih lingvističkih promenljivih. Često se koriste izrazi: odlična, vrlo dobra, prosečna, zadovoljavajuća, loša; eventualno se uvode još po dve „radikalne” lingvističke promenljive, npr. sa atributima izrazito (izrazito odlična i izrazito loša), sa dosta uskim intervalom pokrivenosti. Ovakve „radikalne” lingvističke promenljive uslovno mogu da predstavljaju i modifikovane prvo-navedene lingvističke promenljive. Sa druge strane, mogu da se nađu radovi gde autori uvode promenljive koje reprezentuju npr. pouzdanost, sa opisom verovatnoće pojave otkaza, kao: visoko frekventna, frekventna, prihvatljivo frekventna, prosečna, prihvatljivo niska, niska i vrlo niska.

Prvo-navedeni način imenovanja lingvističkih promenljivih u načelu ima nedostatak u mogućnosti poistovećivanja opšte korišćenih pojmova kao što su odlično ili vrlo dobro, sa već stečenim predrasudama o istim na osnovu nekog nereprezentativnog ličnog iskustva, kod davanja ocena od strane analitičara. Takođe, ovakve lingvističke promenljive sa nedovoljnom preciznošću u nazivu, mogu kod korisnika opreme praktično da preslikaju način razmišljanja, npr. sa same pouzdanosti na ukupan kvalitet razmatrane komponente. U tom smislu, može da se izvede zaključak da bi lingvističke promenljive trebalo da budu što preciznije, odnosno da koriste reči koje direktno navode na fenomen koji se analizira.

Što se tiče broja lingvističkih promenljivih, u literaturi može da se pronade preporuka da je sedam maksimalan broj racionalno sagledivih ocena koje čovek može da razgraniči u datom trenutku [2]. Međutim, zbog velikog broja mogućnosti koje pruža analiza na bazi fazi skupova u smislu pokrivenosti svih fenomena, pa čak i onih koji na prvi pogled ne pripadaju ni jednoj lingvističkoj promenljivoj, kao i u smislu mogućnosti davanja prelaznih ocena u okviru ekspertskih procena, sasvim je dovoljno dati

i manji broj lingvističkih promenljivih u cilju identifikacije razmatranog fenomena.

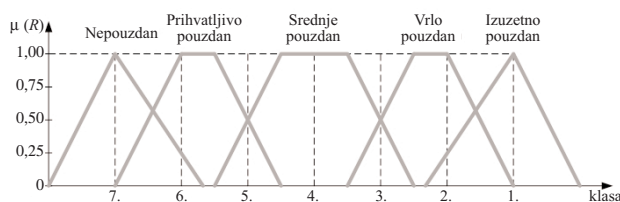
Potrebno je definisati i jednicu mere kojom se reprezentuje nivo kvaliteta analiziranog fenomena. Ocena performanse sigurnosti funkcionisanja dobija se na bazi analize njenih pokazatelja: pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanja. Što se tiče pouzdanosti, ona je po definiciji bezdimenzionalna i obično se izražava u intervalu 0...1, ili od 0 do 100 %. Načelno, isto važi i za pogodnost održavanja kao i podršku održavanja u smislu bezdimenzionalnosti. Kao jedinica mera koja oslikava kvalitet date komponente u pogledu sva tri pokazatelja sigurnosti funkcionisanja može se uvesti pojam klasa kao često korišćen pojam koji reprezentuje performanse kvaliteta (od 1. do 7, s tim što je 1. klasa najkvalitetnija, tj. sa najvećom pouzdanošću ...). Analiza sa sistemom merenja pouzdanosti ili pogodnosti održavanja u intervalu 0...1 tj. 0...100 %, imala bi daleko više smisla da postoje ulazni podaci u vidu funkcije pouzdanosti dobijene na klasičan način na bazi teorije verovatnoće, a ne na bazi ekspertskih mišljenja.

Na osnovu izloženog opšteg razmatranja u cilju imenovanja i broja lingvističkih promenljivih, kao i jedinice mere, uvode se sledeće lingvističke promenljive, koje reprezentuju:

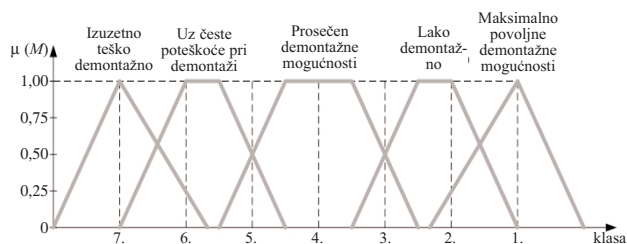
- Pouzdanost: izuzetno pouzdan, vrlo pouzdan, srednje pouzdan, prihvatljivo pouzdan, nepouzdan;
- Pogodnost održavanja: izuzetno teško za održavanje, uz česte poteškoće u procesu održavanja, prosečnih mogućnosti za održavanje, lako za održavanje, maksimalno povoljno za održavanje i
- Podrška održavanju: ne postoji, sa dosta ograničenja, dobro razvijena, vrlo razvijena.

Pri evaluaciji pogodnosti održavanja, reč održavanje u lingvističkim opisima trebalo bi zameniti odgovarajućom rečju koja definiše konkretnu operaciju održavanja vezanu za karakterističnu akciju održavanja na toj komponenti.

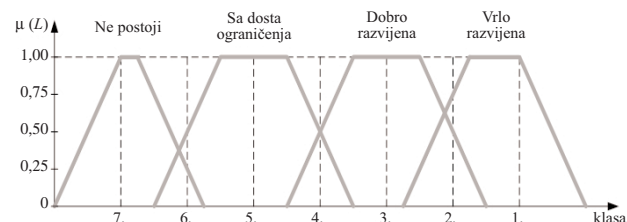
Položaj, oblik, odnosno pokrivenost odgovarajućih fazi skupova koji predstavljaju uvedene lingvističke promenljive, dati su na slikama 2, 3 i 4:



Slika 2. Fazi skupovi pouzdanosti



Slika 3. Fazi skupovi pogodnosti održavanja



Slika 4. Fazi skupovi podrške održavanju

Analitičar, na bazi pristupačnih informacija, formira ocenu ogovarajuće komponente tehničkog sistema za sva tri pokazatelja sigurnosti funkcionisanja, u zavisnosti od klasa kao mere odgovarajućih fazi skupova, u obliku:

$$R_{(\text{komponente})} = \{1/(0...1,0), 2/(0...1,0), 3/(0...1,0), 4/(0...1,0), 5/(0...1,0), 6/(0...1,0), 7/(0...1,0)\}$$

$$M_{(\text{komponente})} = \{1/(0...1,0), 2/(0...1,0), 3/(0...1,0), 4/(0...1,0), 5/(0...1,0), 6/(0...1,0), 7/(0...1,0)\}$$

$$L_{(\text{komponente})} = \{1/(0...1,0), 2/(0...1,0), 3/(0...1,0), 4/(0...1,0), 5/(0...1,0), 6/(0...1,0), 7/(0...1,0)\}$$

Oznake  $R$ ,  $M$ ,  $L$ , predstavljaju pouzdanost, pogodnost održavanja i podršku održavanja, respektivno.

Sledeći korak je sinteza ocena za  $R$ ,  $M$ ,  $L$  do nivoa sigurnosti funkcionisanja ( $D$ ). Sinteza se vrši na bazi odgovarajuće fazi kompozicije. U ovom slučaju se koristi tzv. „max-min” kompozicija, definisana na sledeći način:

$$D = R \circ M \times L,$$

Za razmatrani slučaj, kartezijanski proizvod dva skupa  $M$  i  $L$  kao pokazatelja vezanih za održavanje, tj vezanih za vreme dok je sistem u zastoju, odnosno odgovarajuća funkcija pripadnosti definisana je na sledeći način:

$$\mu_{M \times L} = (\mu^{ij}_{M \times L})_{n \times n},$$

– gde je u ovom slučaju:

$$\mu^{i^j M \times L} = \min(\mu^i M, \mu^j L),$$

– pri tome su funkcije pripadnosti za skupove  $M$  i  $L$  date na sledeći način:

$$\mu_M = (\mu^1 M, \mu^2 M, \dots, \mu^n M), \quad \mu_L = (\mu^1 L, \mu^2 L, \dots, \mu^n L)$$

Kompozicija, za date funkcije pripadnosti za skup  $R$  i za kartezijanski proizvod skupova  $M$  i  $L$ , funkcija pripadnosti za skup  $D$  može biti dobijena na sledeći način:

$$\mu_{D = \mu_{R \circ M \times L}} = (\mu^j_{D})_{1 \times n},$$

– gde je u ovom slučaju:

$$\mu^j_{D} = \max(\min(\mu^1_R, \mu^{1j}_{M \times L}), \dots,$$

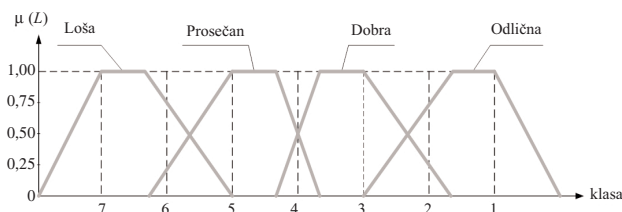
$$\min(\mu^n_R, \mu^{nj}_{M \times L}), j = 1, 2, \dots, n.$$

Ovako definisana „max-min” kompozicija postavlja fazi skup  $L$  kao „kritičan”, drugim rečima, u slučaju da neka komponenta na bageru ima visoku pouzdanost  $R$  i pogodnost održavanja  $M$  a izraženo nisku performansu podrške održavanju  $L$ , ocena sigurnosti funkcionisanja  $D$  biće isto na niskom nivou i to u daleko većoj meri nego u nekoj drugoj kombinaciji vrednosti  $R$ ,  $M$  i  $L$ .

Kao izlaz fazi kompozicije dobija se sigurnost funkcionisanja u obliku gde se daje zavisnost od klase, na način:

$$D_{(\text{komponente})} = \{1/(0...1,0), 2/(0...1,0), 3/(0...1,0), 4/(0...1,0), 5/(0...1,0), 6/(0...1,0), 7/(0...1,0)\}$$

Ovako definisano  $D$  treba transformisati u oblik koji definiše pripadnost odgovarajućim fazi skupovima sigurnosti funkcionisanja. Pre svega, treba definisati te fazi skupove, odnosno lingvističke promenljive: loša, prosečna, dobra i odlična sigurnost funkcionisanja, prema slici 5. Trebalo bi napomenuti da postavke koje važe za imenovanje fazi promenljivih u slučaju pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju ovde ne važe jer se ocene do-



Slika 5. Fazi skupovi Sigurnosti funkcionisanja

bijaju računskim putem, a ne na osnovu ekspertskih razmišljanja.

Transformacija izraza za  $D$  koji definiše stepen pripadnosti klasama u oblik koji definiše stepen pripadnosti fazi skupovima: loš, prosečan, dobar i odličan, odvija se postupkom koji se naziva identifikacija, odnosno u ovom slučaju identifikacija sigurnosti funkcionisanja. Metoda koju koristi postupak identifikacije naziva se „best-fit” i koristi rastojanje između dobijene vrednosti stepena pripadnosti  $\mu$  metodom „max-min” i vrednosti definisane oblikom i položajem fazi skupa preme slici 5, posebno za sva četiri fazi skupa.

$$d_{i1}(D_i, \text{loša}) = \sqrt{\sum_{j=1}^7 (\mu^j_{D_i} - \mu^j_{\text{loša}})^2},$$

analogno i za ostala tri fazi skupa.

Rastojanje  $d$  ima vrednost jednaku nuli, ukoliko je stepen pripadnosti, dobijen „max-min” metodom, nekoj klasi jednak vrednosti za tu klasu prema slici 5, za dati fazi skup: loš, ..., odličan. Ovako definisana rastojanja se relativizuju u odnosu na najmanje  $d_{ij}$ , i dalje normalizuju:

$$\hat{a}_{ij} = \frac{1}{d_{ij} / d_{ij \min}}, \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

gde je  $d_{ij \min}$  najmanje rastojanje među  $d_{ij}$ .

$$\hat{a}_{ij} = \frac{\hat{a}_{ij}}{\sum_{m=1}^4 \hat{a}_{im}}, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad \text{za} \quad \sum_{j=1}^4 \hat{a}_{ij} = 1$$

Na osnovu izloženog modela, dobija se sigurnost funkcionisanja za odgovarajuću komponentu (veza reduktora i pogonskog bubnja), u skladu sa lingvističkim promenljivima, za sračunato  $\beta_{ij} = \mu_{ij}$  u obliku:

$$D_{(\text{komponenta})} = \{(\mu_{ij1}, \text{„loša”}), (\mu_{ij2}, \text{„prosečna”}), (\mu_{ij3}, \text{„dobra”}), (\mu_{ij4}, \text{„odlična”})\}$$

Na ovaj način je definisana sigurnost funkcionisanja određene komponente datog tehničkog sistema na bazi fazi skupova: pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju.

### 2.1.3. ER-algoritam

S obzirom da se tehnički sistem sastoji od niza komponenti koje čine odgovarajuće podsisteme, sisteme, neophodno je da se izvrši sinteza pojedinačnih ocena sigurnosti funkcionisanja komponenti, do ukupne ocene sigurnosti funkcionisanja tehničkog sistema. Matematičko-koncepcijski postupak sinteze koji se koristi počiva na Evidence Theory (slobodan prevod sa engleskog: teorija činjenica), koja je

prvi put razvijena od strane Dempstera 1967. i dodatno razvijena u radovima Šafera 1976. godine. Prvi put je korišćena za konkretne probleme kroz teoriju višeatributivnog odlučivanja ranih 90-tih godina prošlog veka. Danas je ova teorija prepoznatljiva pod nazivom *D-S* teorija (engleski: Dempster-Shafer theory). U literaturi se karakteriše kao vrlo pogodna za postupanje sa nepotpunom ocenom neodređenosti.

Na bazi *D-S* teorije može da se analiza i sigurnost funkcionisanja rotornog bagera na sledeći način Sigurnost funkcionisanja određenog podsistema, bilo da je odlična, dobra, prosečna ili loša, može da se smatra hipotezom (pretpostavkom). Dobijena ocena sigurnosti funkcionisanja na jednom hijerarhijskom nivou, sigurnost funkcionisanja na nižem nivou može se smatrati kao jedan, pojedinačni deo dokaza ocene. Ukoliko je sigurnost funkcionisanja vezana za odgovarajuću komponentu do izvesnog stepena procenjena kao dobra, onda će sigurnost funkcionisanja na višem hijerarhijskom nivou – podsystemu, biti u nekoj meri takođe dobra. Proces hijerarhijske evaluacije obezbeđuje sistematski pristup sintezi takvih neodređenih ocena sigurnosti funkcionisanja komponenti u cilju dobijanja ocene za podsystem na koji se odnosi.

Za primenu *D-S* teorije, neophodno je da bude zadovoljen uslov međusobne isključivosti i iskorišćenosti (iscrpljenosti) svih hipoteza. Sve lingvističke promenljive koje opisuju sigurnost funkcionisanja, a definisane su kroz razvijene fazi skupove, zadovoljavaju zahteve isključivosti i iskorišćenosti. Ovo dozvoljava da se koristi ER algoritam razvijen za potrebe sinteze neodređenih ocena sigurnosti funkcionisanja, generisanih za odgovarajuće komponente fazi skupova.

Konkretno, sigurnost funkcionisanja kao sintezna ocena  $l$  – te strukturne celine (podsystem / sistem / rotorni bager) dobija se u obliku:

$$D(l) = \{(m_l^i, H_j), j = 1 \dots n\}$$

Veličina  $H$  predstavlja skup lingvističkih promenljivih za opis sigurnosti funkcionisanja i neka je  $H_j, j$ -ta lingvistička promenljiva:

$$H = \{H_1, \dots, H_j, \dots, H_n\},$$

gde je  $n$  broj lingvističkih promenljivih.

U konkretnom primeru  $H$  ima sledeći oblik:  
 $H = \{\text{loša, prosečna, dobra, odlična}\}$ ,  
 pri tome je  $n = 4$ .

Veličina  $m^i$  predstavlja  $f$ -ju pripadnosti datom fazi skupu sigurnosti funkcionisanja, i kreće se u in-

tervalu od 0 do 1. Na određenom hijerarhijskom nivou  $j$  i za neko  $l$ , dobija se na sledeći način:

$$\{H_j\}: m_n^j = m_{l(i+1)}^j / (1 - m_{l(i+1)}^j), j = 1, 2, 3, 4$$

$$\{H\}: m_H^j = m_{l(i+1)}^H / (1 - m_{l(i+1)}^H)$$

– gde je:

$$\{H_j\}: m_{l(i+1)}^j = K_{l(i+1)} (m_{l(i)}^j m_{l(i+1)}^j + m_{l(i)}^j m_{l(i+1)}^H + m_{l(i)}^H m_{l(i+1)}^j), j = 1, 2, 3, 4$$

$$\{H\}: m_{l(i+1)}^H = K_{l(i+1)} m_{l(i)}^H m_{l(i+1)}^H, j = 1, 2, 3, 4$$

$$K_{l(i+1)} = [1 - \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N m_{l(i)}^n m_{k(i+1)}^j] - 1, i = 1, 2, 3, 4$$

Odnosno:  $j$  = loša, prosečna, dobra, odlična;  $i$  = komponenta, podsystem, sistem, rotorni bager;

Veličina  $m^i$  je realan broj, koji se odnosi na iznos stepena poverenja (osnovne verovatnoće) i predstavlja stepen u kome dobijena ocena sigurnosti funkcionisanja  $i$ -tog elementa podržava hipotezu da je sigurnost funkcionisanja na  $j$ -tom hijerarhijskom nivou sigurno  $H_j$ . Dobija se kao proizvod:

$$m^i = \lambda_i \mu_{ij}$$

Veličina  $\lambda_i$  je normalizovan relativni težinski ponder sigurnosti funkcionisanja date komponente koja čini odgovarajući podsystem, dobijen na bazi ekspertske procene, u intervalu  $0 \leq \lambda_i \leq 1$ . Respektivno važi i za više hijerarhijske nivoe, podsystem / sistem / rotorni bager.

Na bazi izloženog sinteznog modela, sigurnost funkcionisanja rotornog bagera dobija se u obliku:

$$D_{(\text{rotorni bager})} = \{(\mu_{ij1}, \text{„loša“}), (\mu_{ij2}, \text{„prosečna“}), (\mu_{ij3}, \text{„dobra“}), (\mu_{ij4}, \text{„odlična“})\}$$

### 3. SIGURNOST FUNKCIONISANJA BAGERA SCHRS 630, PD RB KOLUBARA – TAMNAVA ZAPADNO POLJE, INTERNA OZNAKA G1

U uvodu ovog rada stoji da je uobičajeni način identifikacije pouzdanosti i pogodnosti održavanja na bazi teorije verovatnoće, tj. odgovarajućih funkcija  $F(t)$  i  $M(t)$ , te da je u velikom broju slučajeva takva identifikacija praktično nemoguća za uslove rada koji karakterišu kontinualne sisteme za eksploataciju lignita u Srbiji. Sa druge strane karakter mašina u smislu permanentnog razvoja konstrukcije i logistike u toku faze eksploatacije i održavanja, neminovno navodi na zaključak kako su znanja i iskustva

zaposlenih u tim fazama životnog ciklusa mašine i više nego značajan pokazatelj upotrebnog kvaliteta bagera. Prikupljanje ekspertskih procena odnosno sublimacija znanja i iskustava predstavlja značajan proces, u kome bi analitičar trebalo pre svega kvalitetno da sistematizuje sva znanja i iskustava sa posmatranog sistema kao i da objektivno sagleda postojeće pokazatelje u cilju apsorpcije navedenih znanja i iskustava. U slučaju analiziranog rotornog bagera SchRs 630 ankete su vršene među odabranim licima zaposlenim na održavanju u okviru JPRB Kolubara – Tamnava zapadno polje, na taj način što im su im date na uvid moguće ocene pokazatelja sigurnosti funkcionisanja (slika 2, 3. i 4), o kojima su se oni izjašnjavali. Detaljna analiza ovakvog jednog evaluacijskog procesa data je u [2] na primeru komponente *Veza reduktora i pogonskog bubnja*, gde su u prilogu navedena praktično sva teorijska znanja iz oblasti opštih mašinskih konstrukcija, kao i iskustva koja su bila osnova prilikom davanja ekspertске ocene u vidu lingvističke promenljive sa odgovarajućim stepenom pripadnosti. U ovom radu te ocene biće izložene samo kao ulaz u prezentaciji matematičko-konceptijskog modela.

U poglavlju 2.1.1 je definisana hijerarhijska struktura rotornog bagera koju čine sedam mehaničkih sistema. Radi ocene sigurnosti funkcionisanja čitavog sistema bilo bi neophodno izvršiti njihovo dalje raščlanjivanje i identifikaciju performansi pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju na tehnički racionalno najnižem nivou. Analiza takve širine bi izašla iz okvira ovog rada te je detaljno analiziran samo drugonavedeni sistem – sistem za transport materijala, koga čine pet podsistema, od kojih je prvi podsistem – pogonska grupa sa sledećim komponentama: elektromotor, spojnica, kočioni mehanizam, reduktor, i stezni prsten.

## RB 2. Sistem za transport materijala

### RB 2.1. Podsistem – pogonska grupa:

*RB 2.1.1. Elektromotor – 140 kW, Sever Subotica*  
Srednje pouzdan  $R_{2.1.1.} = \{1/0, 2/0,1, 3/0,5, 4/1,0, 5/0,3, 6/0, 7/0\}$   
Maksimalno povoljno...  $M_{2.1.1.} = \{1/1,0, 2/0,3, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Vrlo razvijena  $L_{2.1.1.} = \{1/1,0, 2/0,75, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
 $D_{211} = \{(0,230\ 75, \text{„loša“}), (0,251\ 46, \text{„prosečna“}), (0,256\ 32, \text{„dobra“}), (0,261\ 47, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{211} = 0,30$

*RB 2.1.2. Spojnica – sklop proizvođača MIN Niš, koji čine elastična i hidrodinamička spojnica EG 650, 14. Oktobar Kruševac*  
Vrlo pouzdan  $R_{2.1.2.} = \{1/0,1, 2/1,0, 3/0,4, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Lako za održavanje  $M_{2.1.2.} = \{1/0,1, 2/1,0, 3/0,4, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Vrlo razvijena  $L_{2.1.2.} = \{1/0, 2/0,6, 3/0,2, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
 $D_{212} = \{(0,098\ 59, \text{„loša“}), (0,103\ 03, \text{„prosečna“}), (0,119\ 62, \text{„dobra“}), (0,678\ 76, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{212} = 0,30$

*RB 2.1.3. Kočioni mehanizam – Ø 500 -160, projektovao O&K, proizvodnja MIN Niš*  
Vrlo pouzdan  $R_{2.1.3} = \{1/0,2, 2/1,0, 3/0,3, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Maksimalno povoljno...  $M_{2.1.3} = \{1/1,0, 2/0,3, 3/0,1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Vrlo razvijena  $L_{2.1.3} = \{1/1,0, 2/0,75, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
 $D_{213} = \{(0,208\ 07, \text{„loša“}), (0,224\ 82, \text{„prosečna“}), (0,237\ 05, \text{„dobra“}), (0,330\ 06, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{213} = 0,08$

*RB 2.1.4. Reduktor – konusno cilinrični dvostepeni, BK SH 335, projektovao O&K, proizv. MIN Niš*  
Vrlo pouzdan  $R_{2.1.4.} = \{1/0,1, 2/1,0, 3/0,4, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Maksimalno povoljno...  $M_{2.1.4.} = \{1/1,0, 2/0,2, 3/0,1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Vrlo razvijena  $L_{2.1.4.} = \{1/1,0, 2/0,5, 3/0,2, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
 $D_{214} = \{(0,211\ 17, \text{„loša“}), (0,228\ 85, \text{„prosečna“}), (0,283\ 65, \text{„dobra“}), (0,276\ 33, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{214} = 0,40$

*RB 2.1.5. Veza reduktora i pogonskog bubnja, veza šuplje vratilo – stezni prsten ESP 130/180, 4 komada sa jedne strane*  
Vrlo pouzdan  $R_{2.1.5} = \{1/0,1, 2/1,0, 3/0,5, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Lako demontažno  $M_{2.1.5} = \{1/0, 2/1,0, 3/0,5, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
Vrlo razvijena  $L_{2.1.5} = \{1/1,0, 2/0,4, 3/0,1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$   
 $D_{215} = \{(0,129\ 27, \text{„loša“}), (0,135\ 62, \text{„prosečna“}), (0,148\ 07, \text{„dobra“}), (0,587\ 04, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{215} = 0,25$

Prema opisanom matematičkom modelu sinteze na bazi ER algoritma, dobija se ukupna ocena sigurnosti funkcionisanja na nivou podsistema – pogonske grupe:

$D_{21} = \{(0,166\ 2, \text{„loša“}), (0,179\ 9, \text{„prosečna“}), (0,206\ 3, \text{„dobra“}), (0,447\ 5, \text{„odlična“})\}; \lambda_{21} = 0,30$

U nastavku se daju samo ocene kao i vrednosti  $\lambda$ , za ostale podsisteme u okviru sistema za transport materijala, bez ovako detaljnog zapisa, iz razloga ograničenosti prostora (detaljnije videti u [2]):

*RB 2.2. Podsystem – obrtni delovi:*

$D_{22} = \{(0,171\ 52, \text{„loša“}), (0,182\ 91, \text{„prosečna“}), (0,210\ 77, \text{„dobra“}), (0,434\ 81, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{22} = 0,60$

*RB 2.3. Podsystem – noseća konstrukcija:*

$D_{23} = \{(0,171\ 52, \text{„loša“}), (0,182\ 91, \text{„prosečna“}), (0,210\ 77, \text{„dobra“}), (0,434\ 81, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{23} = 0,80$

*RB 2.4. Podsystem – gumena traka, sa čeličnim jezgrom:*

$D_{24} = \{(0,047\ 82, \text{„loša“}), (0,049\ 85, \text{„prosečna“}), (0,05570, \text{„dobra“}), (0,84663, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{24} = 0,40$

*RB 2.5. Podsystem – sistem za podmazivanje*

$D_{25} = \{(0,102\ 88, \text{„loša“}), (0,128\ 53, \text{„prosečna“}), (0,653\ 19, \text{„dobra“}), (0,115\ 41, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_{25} = 0,25$

Na bazi ER-algoritam i parcijalnih ocena sigurnosti funkcionisanja pomenutih pet podsistema, dobija se sintezna ocena sistema za transport materijala:

**RB 2. Sigurnost funkcionisanja na nivou sistema – sistem za transport materijala:**

$D_2 = \{(0,133\ 4, \text{„loša“}), (0,144\ 7, \text{„prosečna“}), (0,216\ 2, \text{„dobra“}), (0,505\ 6, \text{„odlična“})\}; \lambda_2 = 0,67$

Ocene za ostalih šest sistema kao i vrednosti normalizovan relativni težinski ponder  $\lambda$ , daju se sintetizovano (detaljnije videti u [2]):

*RB 1. Sistem za kopanje:*

$D_1 = \{(0,086\ 67, \text{„loša“}), (0,742\ 04, \text{„prosečna“}), (0,093\ 83, \text{„dobra“}), (0,077\ 46, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_1 = 0,76$

*RB 3. Sistem za transport bagera:*

$D_3 = \{(0,172\ 72, \text{„loša“}), (0,249\ 75, \text{„prosečna“}), (0,381\ 50, \text{„dobra“}), (0,196\ 02, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_3 = 0,60$

*RB 4. Sistem za dizanje strele:*

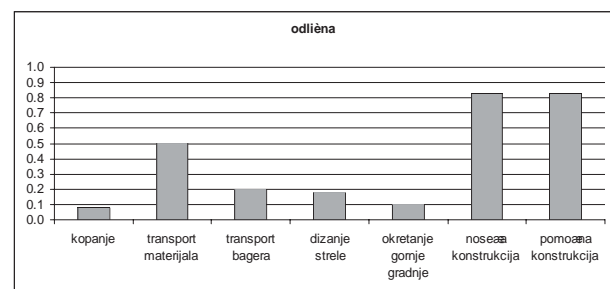
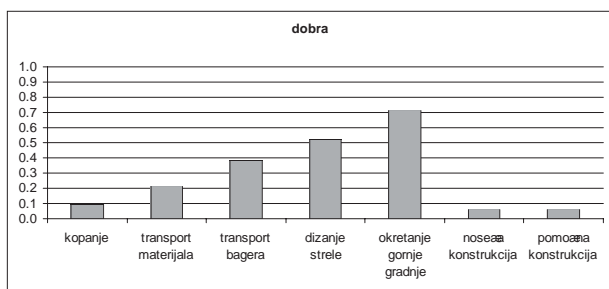
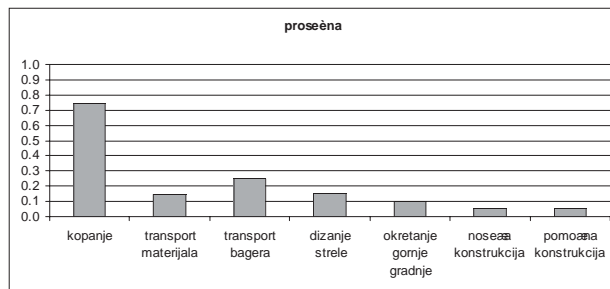
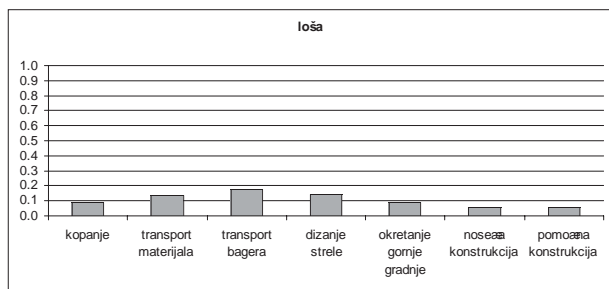
$D_4 = \{(0,142\ 85, \text{„loša“}), (0,155\ 06, \text{„prosečna“}), (0,522\ 11, \text{„dobra“}), (0,179\ 98, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_4 = 0,80$

*RB 5. Sistem za okretanje gornje gradnje:*

$D_5 = \{(0,086\ 48, \text{„loša“}), (0,102\ 92, \text{„prosečna“}), (0,713\ 46, \text{„dobra“}), (0,097\ 14, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_5 = 0,70$

*RB 6. Noseća konstrukcija:*

$D_6 = \{(0,053\ 02, \text{„loša“}), (0,055\ 33, \text{„prosečna“}), (0,061\ 69, \text{„dobra“}), (0,829\ 96, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_6 = 0,80$



Slika 6. Procena sigurnosti funkcionisanja po sistemima



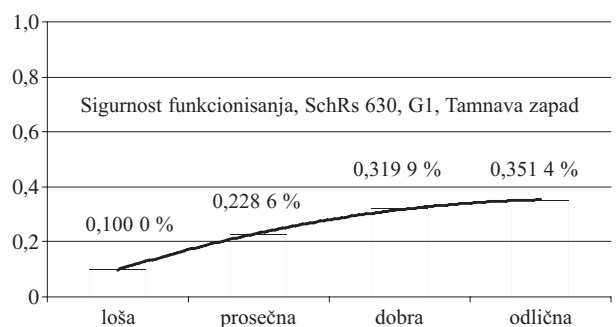
RB 7. Pomoćna konstrukcija:

$D_7 = \{(0,053\ 02, \text{„loša“}), (0,055\ 33, \text{„prosečna“}), (0,061\ 69, \text{„dobra“}), (0,829\ 96, \text{„odlična“})\};$   
 $\lambda_7 = 0,20$

Procenjene ocene sigurnosti po sistemimima na bageru, shematski su date na slici 6, na osnovu kojih lako mogu da se identifikuju slaba mesta na bageru.

Sigurnost funkcionisanja na nivou rotornog bagera (na osnovu samo mehaničkih komponenti)

$D$  (rotorni bager). =  $\{(0,1000, \text{„loša“}), (0,2286, \text{„prosečna“}), (0,3199, \text{„dobra“}), (0,3514, \text{„odlična“})\}$



Slika 7. Procenjena sigurnost funkcionisanja rotornog bagera SchRs 630

Procenjena sigurnost funkcionisanja rotornog bagera SchRs 630, koji radi na JPRB Kolubara – Tamnava zapadno polje, u najvećoj meri od skoro 36 % je odlična, odnosno orijentisana na 1. i 2. klasu kvaliteta u sistemu vrednovanja od 1 do 7; i u nešto manjoj meri od skoro 32 % dobra, tj orijentisana na 3. klasu kvaliteta.

#### 4. ZAKLJUČAK

Postavljeni matematičko-koncepcijski model procene sigurnosti funkcionisanja rotornog bagera na bazi fazi skupova i činjeničnog zaključivanja, pokušava u potpunosti da apsorbuje ekspertske ocene date u lingvističkom obliku, na bazi znanja i iskustava zaposlenih u fazi konstruisanja, eksploatacije i održavanja mašine, odnosno vezane za konstrukcijske i logističke karakteristike rotornog bagera. Model daje izlaz u obliku lingvističkog zapisa u konti-

nualnom obliku te daje višedimenzioni karakter oceni bagera, za razliku od uobičajeno korišćenih modela ocene bagera preko koeficijenata vremenskog ili kapacitativnog iskorišćenja ili dobijenih na bazi višeatributivnih ocena. Poseban kvalitet ovakvoj oceni na bazi ekspertskog mišljenja daje kompleksan karakter životnog ciklusa rotornog bagera, pre svega s obzirom na permanentan razvoj konstrukcije mašine i tokom faze eksploatacije i održavanja.

U navedenom primeru korišćene su samo ekspertske ocene u evaluaciji parametara sigurnosti funkcionisanja, što nije ograničenje za korišćenje i drugih oblika informacija, npr. u obliku matematički definisanih funkcija vezanih za pouzdanost i sl., koje bi se na odgovarajući način fazifikovale.

Postavljeni model može lako da se iskoristi i za procenu upotrebnog kvaliteta i drugih tehničkih sistema sa izraženom hijerarhijskom strukturom.

#### 5. LITERATURA:

- [1] Ivković S., OTKAZI ELEMENATA RUDARSKIH MAŠINA, RGF, Beograd, 1997.
- [2] Tanasijević M., SIGURNOST FUNKCIONISANJA MEHANIČKIH KOMPONENTI ROTORNOG BAGERA, DOKTORSKA DISERTACIJA, RGF, Beograd, 2007.
- [3] Tanasijević M., Ivezić D., Ivković S., POUZDANOST HIDRAULIČNE INSTALACIJE MAŠINA POMOĆNE MEHANIZACIJE – PRIMENA TEORIJE FAZI SKUPOVA I ČINJENIČNOG ZAKLJUČIVANJA, Naučno stručni časopis Istraživanja i projektovanja za privredu, broj 13 – 2006, str. 37-45.
- [4] Tanasković T., SIGURNOST FUNKCIONISANJA I PERFORMANSA RASPOLOŽIVOSTI, V jugoslovenski simpozijum sa međunarodnim učešćem Aktuelni problemi razvoja mehanizacije u rudarstvu, RGF, Beograd 1999, str. 219-223
- [5] Yang J. B., Wang Y. M., Xu D. L., Chin K. S., THE EVIDENTIAL REASONING APPROACH FOR MADA UNDER BOTH PROBABILISTIC AND FUZZY UNCERTAINTIES, European Journal of Operational Research, Vol. 171, Issue 1, 2006, Pages 309-343.

Rad je primljen u uredništvo 11. 07. 2007. godine



**Miloš Lj. Tanasijević** je rođen 1975. godine u Smederevskoj Palanci. Diplomirao je na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, smer za mehanizaciju u rudarstvu. Na istom fakultetu je magistrirao 2004. i doktorirao 2007. godine. Trenutno je zaposlen na Rudarsko-geološkom fakultetu u zvanju asistenta. Svoje naučno-istraživačke radove posvetio je opštim mašinskim konstrukcijama, kao i aplikaciji teorije pouzdanosti i teorije održavanja na mašinske sisteme u rudarstvu.



**Dejan D. Ivezić** je rođen 1970. godine u Kruševcu. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao na Mašinskom fakultetu u Beogradu. U periodu 1995-1997. godine bio je zaposlen u SI CIP na poslovima projektanta. Od 1998. godine zaposlen je na Rudarsko-geološkom fakultetu. Oblasti interesovanja obuhvataju teoriju i primenu robusnog upravljanja multivarijabilnim procesima, modeliranje i simulaciju sistema i teoriju i primenu fazi skupova. Kao saradnik Centra za energetiku RGF bavi se problematikom primene prirodnog gasa, kogeneracionih postrojenja i novih i obnovljivih izvora. Autor je većeg broja naučnih i stručnih radova objavljenih u zbornicima radova i časopisima.

# Određivanje dozvoljenih gubitaka paketa u IP telefonskoj mreži EPS-a

Stručni rad  
UDK: 621.391.812; 621.395.74

---

*Rezime:*

*U radu se analizira uticaj gubitaka paketa na kvalitet prenetog telefonskog signala preko buduće IP mreže Elektroprivrede Srbije. Posebno se posmatra slučaj grupnih gubitaka paketa. Pokazuje se kako se proračunava kvalitet govora saglasno poslednjoj ITU-T preporuci G.107. Dokazuje se da je dovoljno izvršiti proračun za srednju vrednost broja izgubljenih paketa u grupi, pošto ovaj rezultat daje najveću vrednost za gubitak kvaliteta govora.*

**Ključne reči:** *IP telefonija, gubici paketa, E – model*

---

*Abstract:*

**DETERMINATION OF PERMITTED PACKET LOSS  
IN THE IP TELEPHONE NETWORK OF SERBIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY**

*The influence of packet loss on the speech quality in the IP telephone network of Serbian Electric Power Industry (SEPI) is analysed in this short paper. The influence of burst packed loss is especially observed. It is shown how to calculate speech quality according to new ITU – T Recommendation G.107. It is pointed out that calculation of speech quality for average group of lost packets is on the safe side.*

**Key words:** *IP Telephony, Packet loss, E -model*

---

## 1. UVOD

U paketskoj telefonskoj tehnici se pojavljuju činioci koji utiču na kvalitet govornog signala na primnoj strani a koji nisu postojali ili su bili zanemarljivi u klasičnoj tehnici. To su: kašnjenje paketa, odjek, varijacija kašnjenja paketa, gubici paketa, kompresija govornog signala, [1], [2]. Kao što je poznato, uticaj ovih činilaca može da se proceni tzv. E – modelom, [3], koji omogućava da se uticaj svakog od pomenutih činilaca proceni u istim, bezdimenzi-onim, jedinicama. Opravdano se može pretpostaviti

da će u budućoj IP telefonskoj mreži EPS-a neki činioci smanjenja kvaliteta biti uticajniji od drugih. Dužine telekomunikacionih linija i dobro odabrana oprema u mrežnim čvorovima će učiniti da kašnjenje paketa bude zanemarljivo. Zbog toga će i varijacija kašnjenja i odjek biti zanemarljivi. Bogatstvo optičkih prenosnih puteva može omogućiti da se govorni signal prenosi u nekomprimovanom obliku tj. paketima koji sadrže delove govornog signala digitalizovanog saglasno ITU-T preporuci G.711. Ova realna pretpostavka otklanja uticaj kompresora na kvalitet signala. Ono što se teško može izbeći u

---

*Prof. dr Žarko Markov, dipl. ing. el. – Iritel, 11 080 Zemun, Batajnički put 23  
Goran Nedić, dipl. ing. el. – JP „EPS”, PD „Elektrovojvodina”, Centar za informatiku i telekomunikacije,  
21 000 Novi Sad, Bulevar oslobođenja 100*

EPS-ovoj telekomunikacionoj mreži je uticaj energetskog sistema na telekomunikacionu mrežu tj. gubici paketa koje izaziva ovaj uticaj, [4]. U radu [4] je prikazan pokušaj da se izračuna ovaj uticaj saglasno tada važećoj ITU-T preporuci, [3], a korišćenjem rezultata iz [5]. U ovom ćemo radu pokušati da nađemo onu dozvoljenu granicu smetnji tj. uticaja energetskog sistema pri kojoj govorni signal neće, zbog izgubljenih paketa, biti oštećen više od određene vrednosti. U ovim pokušajima koristiće se važeća preporuka [6] koja je zamenila preporuku [3].

## 2. IP TELEFONIJA

Paketska ili IP telefonija predstavlja niz postupa kojima se ostvaruje telefonska veza i prenosi telefonski signal kroz paketsku tj. IP mrežu. Proces uspostave veze u ovom našem razmatranju nije važan koliko proces prenosa telefonskog govornog signala. Proces prenosa govornog telefonskog signala kroz paketsku mrežu počinje pripremom signala. U pripremi, telefonski signal se obavezno pretvara iz analognog u digitalni oblik, najčešće, postupkom po ITU-T preporuci G.711. U načelu se mogu, ali ne moraju, radi štednje protoka, primeniti postupci otklanjanja pauza u govoru (*Silence Removal*) i kompresija govornog sadržaja (*Speech Compression*). Pripremljeni govorni signal se deli na odsečke trajanja od 10 ms do 50 ms i odsečki se ugrađuju u pakete kao sadržaj ili tovar (*Payload*). Ugradnja više od jednog odsečka u jedan paket, zbog štednje protoka, je danas napuštena tehnika.

Protokol koji se koristi za prenos govornog (i video) sadržaja je RTP (*Real-time Transport Protocol*). Osnovna svojstva ovog protokola su malo kašnjenje paketa ali i nepostojanje retransmisije, tj. postojanje izgubljenih paketa.

Paketskom sadržaju prethodi zaglavlje (*Header*) čiji je osnovni deo adresa odredišta i izvora. Govorni paketi se šalju kroz mrežu istim resursima kao i ostali paketi. Paketi iste veze se mogu slati i različitim putevima kroz mrežu. Na putu do odredišta paketi kasne zbog procesa paketizacije, obrade u čvorovima mreže i zbog vremena prenosa. Kašnjenje paketa može izazvati lošiji kvalitet govornog signala na prijemu, [1]. Kašnjenje paketa izaziva i veći uticaj signala odjeka, što je, takođe, poznato. Na putu od izvora do odredišta paketi se mogu izgubiti. Najčešći razlozi gubitka paketa su odbacivanje zbog zagušenja, prevelikog kašnjenja i neispravnosti paketa. U ovom radu posvećujemo pažnju uticaju izgubljenih paketa zbog neispravnosti na kvalitet IP telefonskog signala u budućoj EPS-ovoj paketskoj mreži.

## 3. BUDUĆA EPS-ova PAKETSKA MREŽA I PRENOS GOVORA

Jasno je da se danas (jun 2007) ne znaju detaljna svojstva buduće EPS-ove paketske mreže. Međutim, neka svojstva se mogu predvideti. To će, dakle, biti potpuno privatna mreža koja će prekriti teritoriju države. Potpuna privatnost znači da će EPS biti investitor i vlasnik svih resursa mreže. To, dalje, znači da će mrežni resursi biti projektovani saglasno potrebama kompanije. Sva loša svojstva u korišćenju javnih ili zajedničkih IP mreža će biti izbegnuta. Kašnjenja paketa, izazvana vremenom prostiranja, će biti minimalna zbog relativno kratkih deonica veza, reda stotina kilometara. (Vremena prostiranja se u proračunima uzimaju da su od 4  $\mu$ s/km do 6  $\mu$ s/km.) Kašnjenja u čvorovima mreže će biti mala zbog poznatog i kontrolisanog saobraćaja i u čvorovima obrade i na linkovima koji povezuju čvorove mreže. Ozbiljan uticaj na kvalitet prenetog govornog signala će imati smetnje potekle od energetskog sistema, koje će izazvati gubitke paketa. Kao što je rečeno u [4], odeljak 3, smetnje u telekomunikacionim uređajima se pojavljuju zbog uticaja energetskog sistema. Uticaj je najveći u intervalima rada tzv. sklopnih uređaja energetskog sistema. Vreme trajanja energetske smetnje je uvek višestruko veće od vremena trajanja paketa. Vreme trajanja smetnje je znatno veće i od vremena između susednih paketa koji nose govorne uzorke istog razgovora, tako da su, skoro redovno, ugrožene grupe uzastopnih paketa.

## 4. E – MODEL I UTICAJ GUBITAKA PAKETA

Poznato je da je E-model, [3] i [6], danas veoma korišćen način ocene kvaliteta govornog signala koji se prenosi telekomunikacionom mrežom. Njegova primena je prikazana u [1]. Ovde nas interesuje samo deo modela koji se odnosi na ocenu kvaliteta pod uticajem gubitka poziva.

Gubici paketa mogu biti slučajni i grupni. Kao što je objašnjeno u [7], za slučajne gubitke je svojstveno da verovatnoća neispravnosti sledećeg paketa ne zavisi od ispravnosti paketa koji se trenutno prima. U slučaju grupnih gubitaka paketa, verovatnoća neispravnosti sledećeg paketa je veća ako je paket koji se trenutno prima takođe neispravan nego u slučaju kada se prima ispravan paket.

Umanjenje kvaliteta govornog signala pod uticajem kompresora govornog signala i slučajnih gubitaka paketa je dato sledećom jednačinom:

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) P_{pl} / (P_{pl} + B_{pl}) \quad (1)$$

gde su:

$I_e$  – činilac umanjenja kvaliteta govornog signala (*Equipment Impairment Factor*) izazvanog korišćenjem kompresora govornog signala;

$I_{e-eff}$  – prepravljena vrednost  $I_e$  (*Effective Equipment Impairment Factor*) zbog uticaja gubitaka paketa;

$P_{pl}$  – verovatnoća gubitka paketa (*Packet-loss Probability*), u procentima i

$B_{pl}$  – otpornost pojedinih postupaka kodiranja i dekodiranja (tj. kompresije i dekompresije) govornog signala na gubitke paketa (*Packet-loss Robustness Factor*). Vidi se, iz jednačine (1) da je otpornost srazmerna veličini činioca  $B_{pl}$ .

Veoma je realna pretpostavka da se u IP mreži EPS-a neće koristiti kompresori govornog signala tako da će, saglasno tabeli I.1/G.113 iz [8], biti  $I_e=0$ . Jednačina (1) postaje

$$I_{e-eff} = 95P_{pl}/(P_{pl}+B_{pl}) \quad (1')$$

U slučaju grupnih (*burst*) gubitaka paketa, uz već usvojene pretpostavke i oznake važi:

$$I_{e-eff} = 95P_{pl}/\{(P_{pl}/BurstR)+B_{pl}\} \quad (2)$$

gde je *BurstR* – (*Burst Ratio*), činilac koji izražava uticaj grupisanih gubitaka paketa. Ovaj činilac uzima vrednost  $I$  ukoliko su gubici paketa slučajni a vrednosti veće od  $I$  ako su gubici paketa grupni. Saglasno jednačini (2) vidi se da grupni gubici paketa povećavaju činilac  $I_{e-eff}$  tj. smanjuju kvalitet govornog signala više nego slučajni gubici paketa istog nivoa. Vrednost *BurstR* se može izračunati uz pomoć jednačine (3-30) iz ref. [6]:

$$BurstR = 1/(p+q) \quad (3)$$

gde su  $p$  i  $q$  verovatnoće prelazaka iz dobrog (prijem ispravnih paketa) u loše stanje (prijem neispravnih paketa tj. gubitak paketa) i obrnuto, u Gilbertovom modelu sa dva stanja, [7].

Jedno od svojstava činioca *BurstR* je da, u uprošćenom slučaju grupisanih gubitaka paketa u grupe od  $n$  paketa i malih vrednosti  $P_{pl}$ , važi  $BurstR \approx n$ .

$$\text{Jasno je da važi } \lim_{P_{pl} \rightarrow 0} I_{e-eff} = 95P_{pl}/B_{pl} \text{ i}$$
$$\lim_{n \rightarrow \infty} I_{e-eff} = 95P_{pl}/B_{pl}.$$

Iz jednačine (2) se vidi da je uticaj grupisanih gubitaka paketa utoliko veći ukoliko je vrednost činioca otpornosti na gubitke paketa  $B_{pl}$  manja. Ova vrednost je, nažalost, najmanja (4,3 – 4,8, [8]) baš

kod kovera po G.711, koji se najviše koristi u profesionalnim IP mrežama.

*Primer 1.*

Posmatra se paketski link kojim se, između ostalih, prenose i govorni paketi jednog govornog kanala, obrađeni po preporuci G.711 i sa slučajnim gubicima paketa  $P_{pl}=1,5\%$ . Svi ostali uslovi prenosa su idealni tj. nema kašnjenja paketa, odjeka, višestrukog kodovanja. Govorni odsečki su trajanja 20 ms pa je prema tabeli I.4/G.113, [8],  $B_{pl}=4,8$ . Saglasno jednačini (1') ima se  $I_{e-eff}=22,6$ . Kvalitet telefonskog signala tj. Rating Factor, [6] i [9],  $R=95-22,6=72,4$  se ocenjuje ocenom *Medium* (neki korisnici nezadovoljni), tabela 1/G.108 [9].

*Primer 2.*

Za isti slučaj ali sa grupisanim gubicima paketa u grupe po 6 paketa dobija se, uz  $BurstR=5,91$  iz tabele I. 5/G.113, [8], da je  $I_{e-eff}=28,2$ . Kvalitet telefonskog signala  $R=95-28,2=66,8$  se u ovom slučaju ocenjuje ocenom *Low* (mnogi korisnici nezadovoljni).

Napomenimo da se u slučajevima nedozvoljeno velikog narušavanja kvaliteta govornog signala gubitkom paketa, koriste postupci nadonade izgubljenih paketa PLC (*Packet Loss Concealment*).

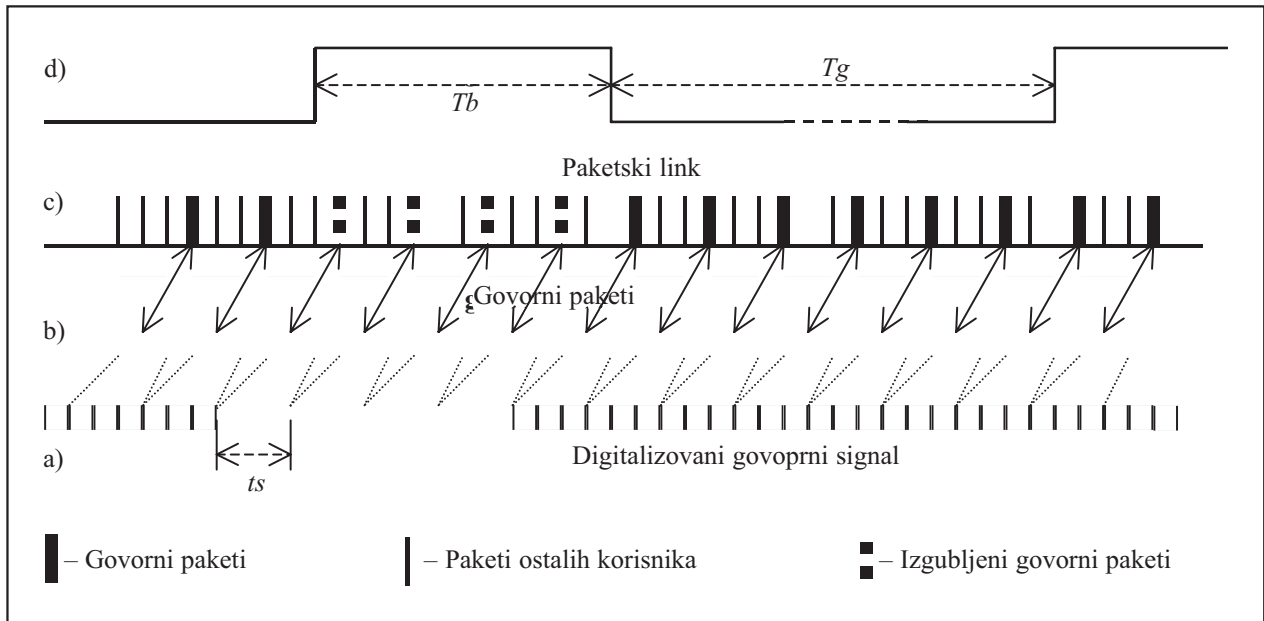
## 5. DOZVOLJENI GUBITAK KVALITETA GOVORA U EPS-ovoj IP MREŽI

U radu [1] je prikazan jedan pokušaj proračuna kvaliteta IP i mešovitih telefonskih veza u budućoj telefonskoj mreži EPS-a. Ponovimo, još jednom, važnu a realnu pretpostavku iz ovog rada: osnovni činilac smanjenja kvaliteta govornog signala u budućoj mreži će biti mešovitost mreže tj. mogućnost da u jednoj vezi učestvuju delovi koji se ostvaruju u analognim, digitalnim, paketskim i mobilnim delovima mreže. Zbog toga se za činioce smanjenja kvaliteta u IP mreži moraju postaviti strogi uslovi.

U radu [1] se predviđa pad kvaliteta veze usled gubitka paketa za 3 jedinice. Pogledajmo kako se ovaj zahtev preslikava na dozvoljeni nivo smetnji na telekomunikacionoj opremi.

Posmatrajmo model jednog govornog kanala, postupak paketizacije govornog signala i smetnju koja izaziva gubitke poziva, slika 1. Na slici je prikazan najgori slučaj tj. onaj sa grupnim gubicima paketa.

Odsečki digitalizovanog govornog signala, slika 1a., trajanja  $ts$ , se smeštaju u pakete, slika 1b. Ovi, govorni paketi, se šalju na link zajedno sa paketima ostalih korisnika paketske mreže, slika 1c. Trajanje govornog paketa na linku visokog protoka je  $ts \ll ts$ .



Slika 1. Digitalizovani govorni signal a), paketizovani govorni signal b), paketski link c) i smetnja koja izaziva gubitke paketa d)

Zbog uticaja energetskeg sistema na telekomunikacionu opremu, koja je često smeštena u energetskom objektu, pojavljuju se smetnje, slika 1d, čija je dužina vremena trajanja slučajna veličina  $tb$ , sa srednjom vrednošću  $Tb$ , a dužina trajanja vremena između uzastopnih smetnji je slučajna veličina  $tg$ , sa srednjom vrednošću  $Tg$ . Usled uticaja smetnji, paketi bivaju oštećeni i odbačeni. Kao što je pokazano u [5], smetnje u elektroprivrednoj telekomunikacionoj mreži, a koje izazivaju gubitke paketa su uvek znatno dužeg trajanja od trajanja vremena između uzastopnih paketa jedne veze,  $Tb > ts$ , tako da su gubici paketa uvek grupni. Na slici je simbolično predstavljeno da se gube  $n = 4$  uzastopna paketa tj. na prijemnoj strani nedostaje odsečak govornog signala čije je trajanje približno  $Tb = 4 ts$ . Na slici 1a. je odsečak govornog signala, koji nedostaje na prijemu, predstavljen debelom linijom.

Osnovna pitanja ovoga rada su sledeća:

- kakav je odnos veličina  $Tb$ ,  $Tg$  i  $I_{e-eff}$  i
- kako odrediti onaj nivo smetnji koji će zadovoljiti traženi nivo kvaliteta govornog signala?

Prikažimo odgovore na ova pitanja jednim brojnim primerom. Zahteva se da pad kvaliteta govornog signala, digitalizovanog po standardu G.711, ne bude veći od  $I_{e-eff}=3$ . U ovom primeru veličine sa slike 1 imaju sledeće vrednosti:

- trajanje odsečka govornog signala u jednom paketu  $ts = 40$  ms;
- srednje vreme trajanja smetnje  $Tb = 160$  ms i

- srednje vreme između uzastopnih smetnji  $Tg = 1$  min.

Ovde se može primeniti jednačina (2) uz napomenu da je, bez obzira na protok linka,  $P_{pl} = 100Tb/(Tb+Tg)$  i  $B_p = 4,8$ . Proračun pokazuje da je u ovom slučaju gubitak kvaliteta govornog signala zbog izgubljenih paketa  $I_{e-eff} = 5,19$ . Očigledno je da se u ovom slučaju ne zadovoljava traženi uslov te se moraju primeniti algoritmi nadoknade izgubljenih paketa PLC.

Kako se može u praksi primeniti ovaj postupak? Za mrežu je potrebno nabaviti IP opremu i postavlja se pitanje kakav će biti kvalitet telefonskog signala koji koristi IP mrežu. Da li je potrebno nabavljati PLC? Za davanje odgovora na ova pitanja potrebno je znati raspodelu dužina vremena trajanja smetnji i raspodelu trajanja vremena između uzastopnih smetnji u mreži. Na osnovu ovih raspodela mogu se odrediti  $Tb$  i  $Tg$  a na osnovu njih  $P_{pl}$ . Pretpostavljajući da su gubici paketa grupisani može se izračunati najgori slučaj umanjnja kvaliteta govornog signala. Pri malim vrednostima verovatnoće gubitka paketa i grupama izgubljenih paketa sa velikim brojem paketa, umanjnje kvaliteta govornog signala se može računati i uprošćeno kao  $I_{e-eff} = 95P_{pl}/B_{pl}$ .

Sada treba da odgovorimo na pitanje: kako izvršiti proračun kvaliteta govornog signala ako grupe izgubljenih paketa ne sadrže isti broj paketa, što je sasvim realna pretpostavka?

Posmatra se, dakle, jednačina (2) u opštem obliku

$$y = f(x) = A/[(B/x)+C] \quad (4)$$

gde je  $y$  smanjenje kvaliteta govornog signala zbog gubitka paketa, a  $x=1, 2, 3, \dots, n$  broj izgubljenih paketa u grupi, slika 2. Oznaka  $E[v]$  će označavati srednju vrednost veličine  $v$ .

Pretpostavimo, za naš proračun, da je veličina  $x$  kontinualna promenljiva veličina  $x \geq 1$ . Može se pokazati da je

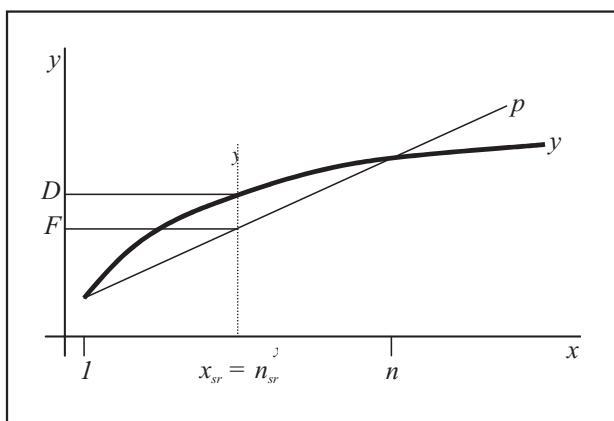
$$d^2f(x)/dx^2 < 0$$

što znači da je funkcija  $y$  konkavna, tj. ispućena *nagore*. To se može videti i sa slike 2, gde je predstavljen tok funkcije  $y=f(x)$ . Primena Jensenove nejednakosti daje:

$$D = f(E[x]) \geq E[f(x)] \quad (5)$$

tj. dokazuje da je smanjenje kvaliteta govora,  $y=I_{eff}$ , izračunato za srednju vrednost broja izgubljenih paketa  $x_{sr}=n_{sr}$  veće od srednje vrednosti smanjenja kvaliteta govora izračunatih za pojedinačne brojeve izgubljenih paketa u grupama.

Zamislamo da postoje samo dve vrste grupa izgubljenih paketa. Jedno su pojedinačno izgubljeni pozivi ( $x = 1$ ) a druga vrsta su grupe koje se sastoje od ( $x = n$ ). Neka je učešće ovih grupa izgubljenih paketa u smanjenju kvaliteta govora podjednako. Vidi se sa slike 2. da je srednja vrednost umanjena kvaliteta govora,  $F$ , manja od vrednosti funkcije  $f(x_{sr})=D$  koja se dobija za srednju vrednost broja paketa u grupi izgubljenih paketa.



Slika 2. Funkcija  $y = A/[(B/x)+C]$

To pokazuje da je rezultat smanjenja kvaliteta govora, ako postoje grupe izgubljenih paketa sa različitim brojem izgubljenih paketa, uvek manji od

onoga koji se dobija za srednju vrednost  $n$  tj. zadovoljava se proračun *najgoreg slučaja*.

## 6. ZAKLJUČAK

*U proračunu smanjenja kvaliteta telefonskog signala koji se prenosi kroz paketsku mrežu, mora se poći od postojećih svojstava smetnji koje izazivaju gubitke poziva. Potrebno je znati bar srednje vreme trajanja smetnje i srednje vreme između susednih smetnji. Dovoljno je izvršiti proračun za srednju vrednost broja izgubljenih paketa. Ako izračunati kvalitet govornog signala ne zadovoljava postavljeni uslov, moraju se primeniti postupci nadoknade izgubljenih paketa.*

## 7. LITERATURA

- [1] Savović, T., Maksić, D., Banjac, B., Markov Ž.: PROCENA KVALITETA IP TELEFONSKIH VEZA U BUDUĆOJ TELEFONSKOJ MREŽI ELEKTROPRIVREDE SRBIJE, Elektroprivreda 4/04.
- [2] Markov, Ž.: O SABIRANJU UTICAJA NA KVALITET TELEFONSKOG SIGNALA U IP TELEFONIJI, Telekomunikacije, 1/06.
- [3] ITU-T RECOMMENDATION G.107, march, 2005
- [4] Markov, Ž.: PROCENA UTICAJA SMETNJI NA KVALITET TELEFONSKIH VEZA U PAKETSKOJ MREŽI EPS-a, Elektroprivreda 2/04.
- [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] ITU-T RECOMMENDATION G.107, march, 2003
- [7] Markov, Ž.: IZBOR MODELA KANALA SA SMETNJAMA U TELEKOMUNIKACIONOJ MREŽI EPS-A, Elektroprivreda 1/2007
- [8] ITU-T Recommendation G.113, Appendix I, 05/2002
- [9] ITU-T Recommendation G.108, 09/1999
- [10] <http://economics.about.com/library/glossary/bldef-jensens-inequality.htm>

Napomena: Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja na projektu TR6136 koje pomaže Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije.



**Žarko Markov** je rođen 1946. godine. Diplomirao je 1969. godine, magistrirao 1975. i doktorirao 1976. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Radi u Iritelu na razvoju i proizvodnji telefonskih centrala za elektroprivrednu telefonsku mrežu (videti: [www.iritel.com/english/products/products.html](http://www.iritel.com/english/products/products.html)). Autor nekoliko desetina radova objavljenih u zemlji i inostranstvu, od kojih se petnaestak odnosi na elektroprivrednu telefoniju. Učestvovao u izradi Tehničkih uslova za elektroprivredne telefonske centrale i u projektima digitalne telefonske mreže EPS-a. Objavio nekoliko knjiga i udžbenika. Ima naučno zvanje naučnog savetnika i nastavno zvanje vanrednog profesora. Dobitnik nagrade za elektroniku iz fonda „Prof. Branko Rako-  
vić” za 1997. godinu.



**Goran Nedić** je rođen 1967. godine u Novom Sadu. Diplomirao je 1992. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, elektrotehnički odsek, smer elektronika i telekomunikacije. Trenutno radi u Elektrovojvodini u Centru za informatiku i telekomunikacije kao rukovodilac Službe radiokomunikacija.



# Prva iskustva sa ADSS optičkim kablovima

Stručni rad  
621.315; 621.316; 681.85.025

---

## Rezime:

Pojava optičkih vlakana i široka primena na polju telekomunikacija privukla je pažnju radnih organizacija prenosa i distribucije električne energije radi korišćenja više razradjenih rešenja samonosivih kablova postavljenih po dalekovodima, poznatih po različitim nazivima, medju kojima dominiraju: *Optical Power Ground Wire (OPGW)* i *All Dielectric Self-Supporting (ADSS)* kablovi.

*OPGW (Optical Power Ground Wire)* kablovi praktično predstavljaju zaštitno uže u čijem središtu se po određenom pravilu kablovske tehnologije ugrađuje najviše 144 vlakana, dobro zaštićenih od mehaničkih, termičkih i klimatskih uticaja.

**Ključne reči:** *optički kablovi ADSS, konstrukcija ADSS kablova, oprema za ADSS kablove, karakteristike ADSS kablova*

---

## Abstract:

### *FIRST EXPERIENCES WITH ADSS (ALL DIELECTRIC SELF-SUPPORTING) CABLES*

*The appearance of optical fibers and their wide application in the field of telecommunications has drawn the attention of work organizations engaged in transmission and distribution of electric power, for the sake of the utilization of several types of self-supporting cables installed on long distance transmission lines, the most known of them being OPGW and ADSS cables.*

*OPGW (Optical Power Ground Wire) cables practically represent a protective rope the core of which consists of maximum 144 fibers, well protected from mechanical, thermic and climate influences.*

**Key words:** *optical cables ADSS, construction of ADSS cables, fittings for ADSS cables, characteristics of ADSS cables*

---

## 1. UVOD

S obzirom na ulogu zaštite dalekovoda od atmosferskog pražnjenja i struje kratkog spoja, postoje definisani poprečni preseći zaštitnog užeta sa kombinacijom čeličnih i Al-legiranih žičanih elemenata u cilju postizanja propisane mehaničke čvrstoće i podužne provodnosti užeta.

Najekonomičniju primenu OPWG kablovi pokazuju kod izgradnje novih dalekovoda svih naponskih nivoa, dok kod postojećih dalekovoda postoji evidentan trošak skidanja starog zaštitnog užeta, zamene vešajućeg pribora, isključenja rada dalekovoda zbog montažnih radova i dr.

Konačno, OPGW kablovi su izuzetno jake konstrukcije zbog sadržaja metalnih elemenata, visoke

pouzdanosti, naročito zbog efikasne zaštite optičkih vlakana od prisutnih mehaničkih i električnih uticaja.

ADSS (All Dielectric Self-Supporting) optički samonosivi kablovi predstavljaju potpuno nemetalnu konstrukciju sa 144 i više optičkih vlakana [1].

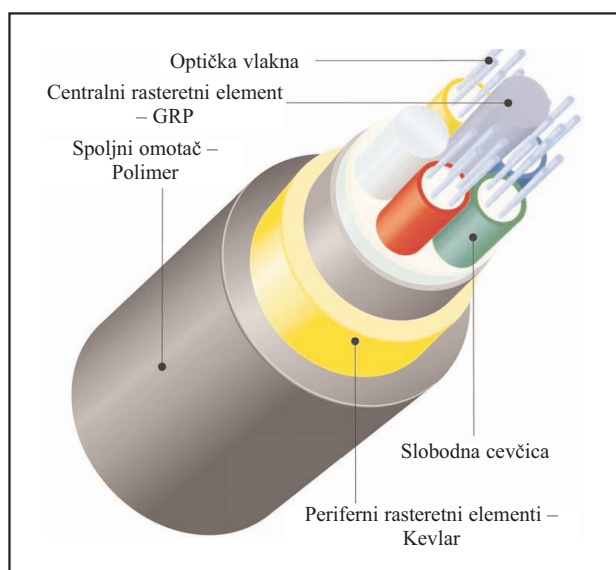
Zadnjih 20 godina u svetu ovi kablovi se instaliraju uglavnom po postojećim 35 kV, 110 kV, 220 kV ili 380 kV dalekovodima, dok danas postoji sve veća tendencija postavljanja i po niskonaponskoj mreži 0,4 kV.

Pošto se radi o premošćavanju raspona reda 300 – 500 m i većih, konstrukcija kabla se ojačava jakim slojem aramidnih vlakana, poznatim pod nazivom Kevlar. Zbog toga ADSS kablovi imaju znatno manju težinu po jedinici dužine, manji prečnik kabla u poređenju sa OPGW kablom, samim tim i nižu tačku vešanja za stubove dalekovoda, čime se postiže manje opterećenje postojećih stubova.

Dielektrična konstrukcija ADSS kabla omogućuje instalisanje na dalekovode bez dodatnih proračuna uticaja EM polja. Ako je tačka vešanja ADSS kabla niža od sigurnosne visine telekomunikacionog optičkog kabla u odnosu na gole provodnike, dozvoljeno je postavljanje ADSS kabla i po dalekovodima pod naponom.

Mada su iskustva sa OPGW kablovima u svetu dosta velika, kod nas su u primeni uglavnom kod rekonstrukcije magistralnih dalekovoda sa kvalitetnijim rešenjem zaštitnog užeta, istovremeno uvažavajući činjenicu da su montažni radovi veoma slični montaži klasičnog, zaštitnog – Al/Fe užeta.

Nasuprot OPGW kablovima, primena ADSS kablova u našoj zemlji je skorijeg datuma, jer su na pr. problemi opterećenja stubova, nepristupačnost



Slika 1.

terena za podzemno polaganje i posebno efikasnost optičkih veza u niskonaponskoj mreži, zahtevali tehnički opravdanija rešenja.

## 2. KONSTRUKCIJA ADSS KABLOVA

Tipični poprečni presek kabla dat je na slici 1.

- Optimalan broj optičkih vlakana u kablju je ustanovljen na 24 monomodna vlakna 9/125/250  $\mu\text{m}$  sa karakteristikama prema ITU -TG.652.
- U ovoj konstrukciji četiri optička vlakna sa različito obojenom primarnom zaštitom su smeštena u PBT cevčicu prečnika 2,1 mm sa propisanom nadužinom i ispunom od tiktotropnog vazelina. Boja cevčica po svom kolor kodu je definisana radi lakšeg raspoznavanja i montaže.
- Šest optičkih cevčica, koje čine sekundarnu zaštitu optičkih vlakana, se pouzavaju sistemom SZ oko centralnog kompozitnog FRP elementa prečnika 2,3 mm u jezgro kabla.
- Preko jezgra kabla postavljena je bubreća traka radi dodatne zaštite od prodora vode.
- Unutrašnji PE omotač, min.debljine 1,0 mm veoma tesno obuhvata jezgro kabla.
- Preko PE omotača postavljen je beztorzioni sloj Kevlara 49 radi obezbeđenja propisane mehaničke čvrstoće kabla.
- Spoljašnji PE omotač crne boje, debljine 1,5mm sa izuzetnim malim koeficijentom termičkog skupljanja štiti kabl od UV zračenja i spoljnih klimatskih uticaja.

### 2. 1. Optičke karakteristike

Monomodna vlakna u potpunosti zadovoljavaju međunarodne preporuke ITU-T G.652 sledećih karakteristika:

Tip vlakna: Match cladding

Primarna zaštita: Dvostruki UV stabilisani akrilatni sloj

Materijal jezgra vlakna: Ge dopiran sa Si

Prečnik polja moda:  $9,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$

Prečnik omotača vlakna:  $125 \pm 2 \mu\text{m}$

Prečnik primarne zaštite:  $250 \pm 10 \mu\text{m}$

Proof test  $\geq 1 \%$

Optičko slabljenje:  $1 \text{ 310 nm} \leq 0,37 \text{ dB/km}$

$1 \text{ 550 nm} \leq 0,23 \text{ dB/km}$

Hromatska disperzija:

$1 \text{ 310-1 330nm} \leq 3,5 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$

$1 \text{ 550 nm} \leq 18 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$

Nulta disperzija,  $\lambda_0$ :  $\leq 0,095 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$

Cut-off talasna dužina ( $\lambda_{cc}$ ):  $\leq 1 \text{ 260 nm}$

## 2. 2. Mehaničke karakteristike

Najpoznatiji svetski proizvođači izrađuju ADSS kablove za različite opsege raspona i to uglavnom podeljene u tri kategorije opterećenja na osnovu opšte prihvaćenog američkog NESC standarda za uslove okoline i to :

- Laka (Light),
- Srednja (Medium) i
- Teška (Heavy)

Svaka kategorija je okarakterisana različitim vrednostima prečnika leda, brzine vetra i dopunskih opterećenja za dati optički kabl u rasponu:

Tabela 1.

NESC opterećenje	Lako (Light)	Srednje (Medium)	Teško (Heavy)
Led (mm)	0,0	6,5	12,5
Vetar (km/h)	94,4	62,8	62,8
Dopunsko (N/m)	0,7	2,5	4,4

Veličine raspona za ADSS kablove se kreću od 50 do 1 000 m i odnose se na veličinu strele od 1 % na 20 °C.

Saglasno pomenutim uslovima sredine, za svaki kabl, iz praktičnih razloga, daje se tabelarna zavisnost određenog raspona (m) od strele (%) i vrednosti dozvoljene zatezne sile (kN) za svaku kategoriju uslova okoline.

Za uslove okoline u Srbiji usvojena je Srednja (Medium) NESC kategorija, tako da opterećenja ADSS kablova za najveće raspone ne treba da prelaze dozvoljene vrednosti zatezne sile.

Izbor osnovnih mehaničkih karakteristika za odabrana dva tipa ADSS kablova sa 24 optička vlakna obavljen je na bazi veličine raspona i odnosi se na sledeće:

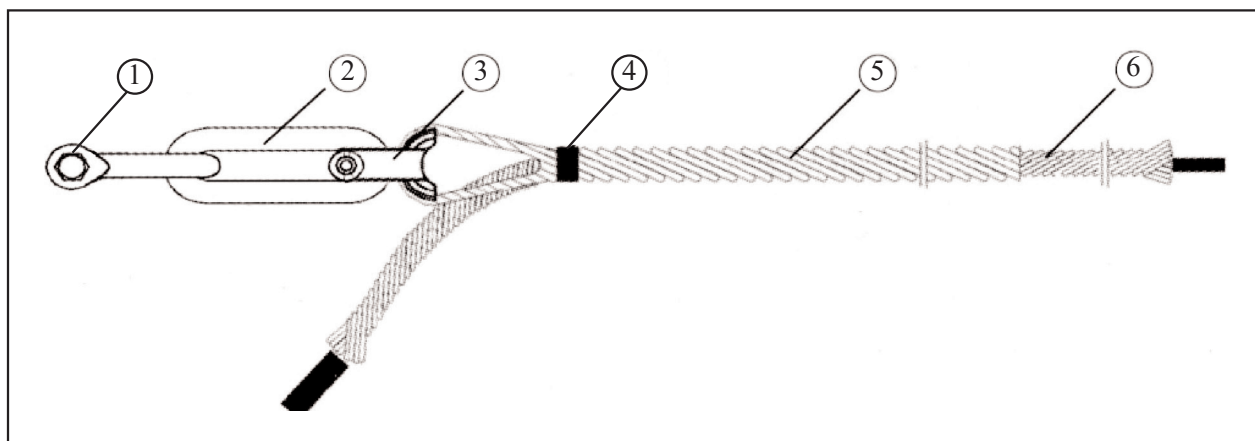
## 3. OPREMA ZA VEŠANJE ADSS KABLOVA

Kod vešanja ADSS kablova po vodovima elektromreže treba razlikovati opremu za raspone do 150 m i raspone reda 300 do 1 000 m iz razloga što se radi o različitim veličinama zatezne sile kojim se izlažu kablovi u rasponu [2].

U jednoj ADSS deonici imamo zatezne i noseće stubove, pa prema tome i oprema za vešanje mo-

Tabela 2.

	Za raspone do 150 m	Za raspone do 300 m
· teoretska prekidna čvrstoća, kN	15,0	45,00
· najveća dozvoljena zatezna sila, kN	5,8	16,00
· najveće izduženje, %	0,8	0,77
· Jungov modul, GPa	5,3	13,00
· koeficijent termičkog širenja, $\exp-6/^{\circ}\text{C}$	6,7	10,00
· radijus savijanja, mm	270,0	280,00
· radna temperatura, $^{\circ}\text{C}$	-20 do +70	
· temperatura instalisanja, $^{\circ}\text{C}$	-5 do +50	
· veličina strele (ugiba) na 20°, %	1,0	1,00
· prečnik kabla, mm	13,5	14,20
· težina kabla, pribl., kg/km	135,0	150,00
· fabričke dužine, m	2 000, 4 000	2 000, 4 000, 6 000



Slika 2. Oprema za zatezne stubove

ra da bude prilagođena uslovima raspona, tako da razlikujemo:

- Opremu za zatezne stubove;
- Opremu za noseće stubove i
- Ublaživače vibracija.

### 3. 1. Oprema za zatezne stubove

Oprema na jednoj strani zateznog polja (slika 2) sastoji se od:

- pričvršćivača za stub;
- zaštitne spirale od legiranih okruglih Al žica, prečnika oko 3 mm (1);
- zatezne čelične spirale od pocinkovanih žica, prečnika oko 4 mm (4);
- 2 čelične spojke (škopac) (3) i
- pocinkovane produžne šine 400-500 mm (2).

Ista takva oprema se postavlja i na drugoj strani zateznog polja.

### 3. 2. Oprema za noseće stubove

Oprema za noseće stubove je nešto jednostavnije konstrukcije s obzirom na manje opterećenje kabela na nosećim stubovima i sastoji se iz sledećih elemenata:

- pričvršćivača za stub;
- gumenog umetka (3);

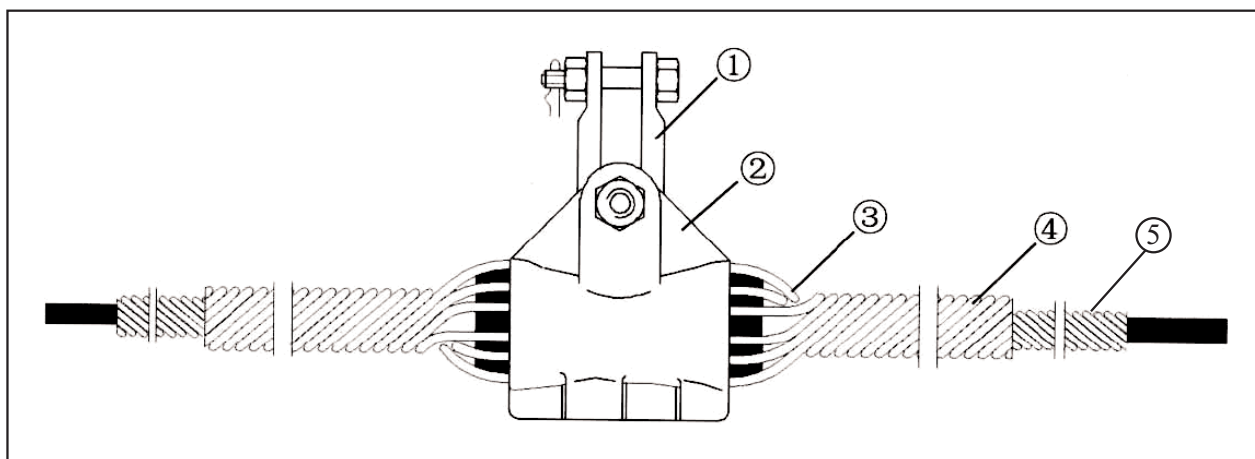
- spirale od okruglih Al legiranih žica, prečnika oko 4 mm (4);
- metalnog nosača (2) i
- čelične spojke (škopac) (1).

### 3. 3. Ublaživač vibracija

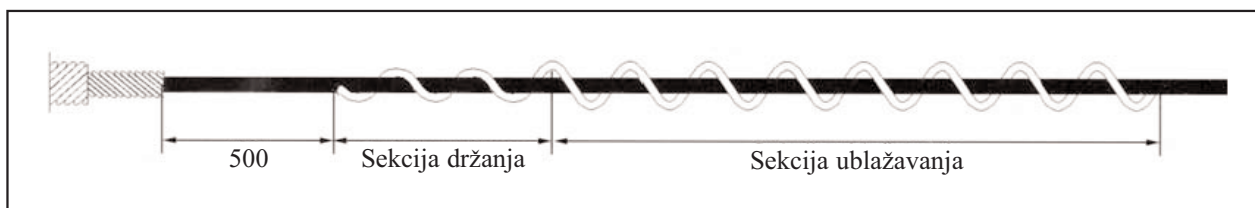
Pored zatezne i noseće opreme, uglavnom na velikim rasponima, prateći element je tzv. ublaživač vibracija (slika 4) koji je kompletno urađen od jakog kompozitnog materijala, prečnika oko 12 mm, formiran u vidu spirale dužine oko 2 m. Postavlja se neposredno na ADSS kabl na rastojanju 500 mm od ivice vešajućeg pribora prema posebnom planu postavljanja.

## 4. OPREMA ZA POSTAVLJANJE ADSS PO NISKONAPONSKOJ MREŽI 0,4 kV

Pošto se radi o relativno malim rasponima reda 50-80 m, okarakterisanim malim zateznim silama, iz praktičnih razloga se preporučuje korišćenje postojećeg pribora za energetski snop SKS, koji po dimenzijama odgovara ADSS kabl u prilagođen je različitim vrstama stubova na terenu. Iz tog razloga se ne navode detalji konstrukcije vešajuće opreme, jer je to dobro poznato iz kataloga mnogih domaćih proizvođača.



Slika 3. Oprema za noseće stubove



Slika 4. Ublaživač vibracija

Naravno, za ovu namenu postoje i rešenja koja su slična onim za velike raspone, ali sa znatno manjim dimenzijama i za manja opterećenja.

## 5. POLAGANJE ADSS KABLOVA

Montaža ADSS kablova obavlja se uglavnom u tri faze koje se odnose na postavljanje učvršćivača po svim stubovima, razvlačenje i zatezanje kablova.

Učvršćivači se postavljaju bez bušenja *L* profila metalne konstrukcije stuba, poštujući propisanu visinu i rastojanje od konzole, koja nosi fazne provodnike dalekovoda.

Razvlačenje kablova po trasi se obavlja prenošenjem kompletnog kablova sa dobošem ili stacionarno, tj. odmotavanjem kablova sa jednog mesta i njegovo postavljanje po koturačama raspoređenim po stubovima. Koji će metod biti primenjen zavisi od terenskih uslova i veličine raspona.

Zatezanje kablova mora biti kontrolisano putem dinamometra ili preko veličine strele (ugiba). Kontrola sile zatezanja preko veličine strele je praktičniji način, ali manje precizan, posebno kada se radi o ozbiljnijim rasponima. Veličina strele se uzima iz tabele za dati kabl, raspon i temperaturu okoline. Redosled zatezanja kablova uz montažu zateznog i nosećeg pribora je takav da se počinje od krajnjeg stuba pa se nastavlja sve do kraja celokupne trase.

Preporučuje se da se u toku i posle zatezanja kablova vrši kontrola optičkog slabljenja svakog zateznog polja korišćenjem optičkog reflektometra OTDR.

## 6. REALIZOVANI PROJEKTI

Iako ADSS kablovi predstavljaju relativno novo rešenje, realizovano je više projekata za potrebe ED u Srbiji i to:

### 6. 1. Projekat „Zlatibor” – 2005.

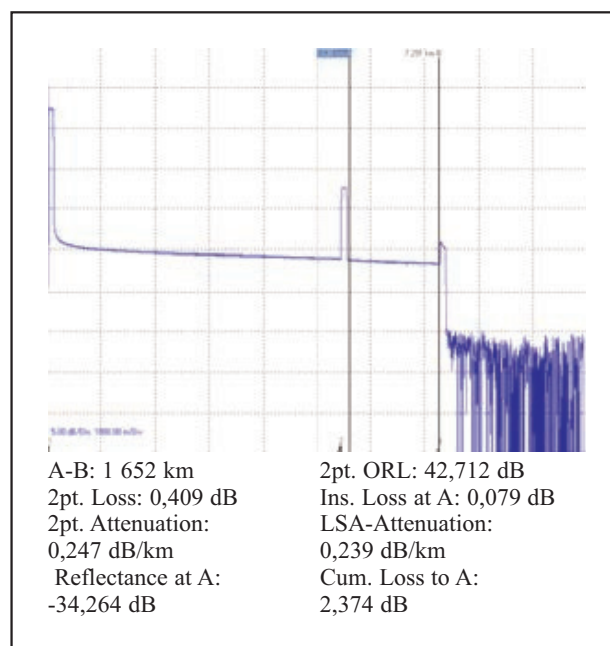
Prvi projekat se odnosio na povezivanje dve trafostanice Zlatibor-Zlatibor 1 preko dalekovoda 2x35 kV na rastojanju oko 2 km [5].

Pošto se savremena TS Zlatibor nalazi u fazi izgradnje i ista predstavlja mesto konekcije sa dalekovodom 110 kV Beograd – Kokin Brod, zahtev projekta je da te dve TS budu povezane optičkom vezom radi povećane potrebe upravljanja, prenosa podataka i ostalih komunikacija a veći deo ostao bi za buduće širenje telekomunikacione mrežne infrastrukture na Zlatiboru.

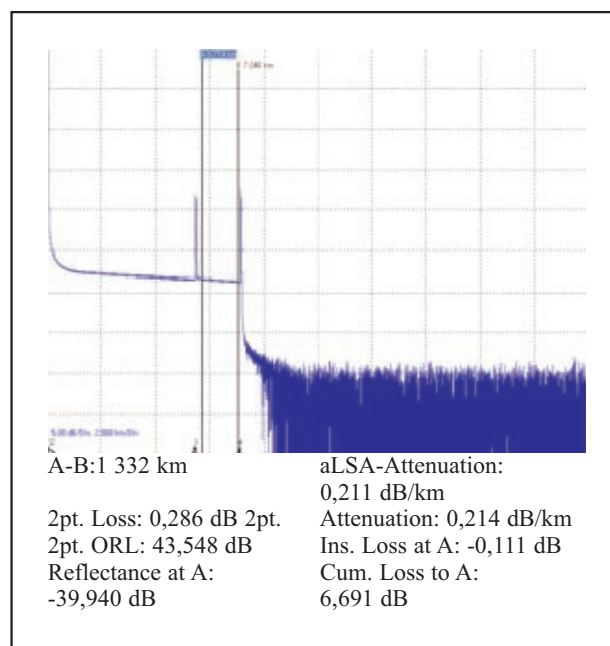
Projektom je predviđena upotreba ADSS kablova (TO SM 31 R...) sa 24 monomodna vlakna za najveće raspone od 300 m i delom podzemnog standardnog optičkog kablova (TO SM 03...), položenog u PE

cevi. Rešenje načina učvršćenja za rešetkastu konstrukciju stuba dalekovoda, izbor vešajućeg pribora nemačkog proizvođača RIBE, optičke spojnice, izbor završne optičke kutije, svi montažni radovi, optička merenja i projekat izvedenog stanja su zadovoljavajući i isti predstavljaju prvo iskustvo u instalaciji ADSS kablova u našoj zemlji.

Pošto se radilo o prvom polaganju ADSS kablova, posebna pažnja je posvećena merenjima optičkog



Slika 5. Merenja slabljenja ADSS na dobošu dužine 1 882 m sa predvlaknom



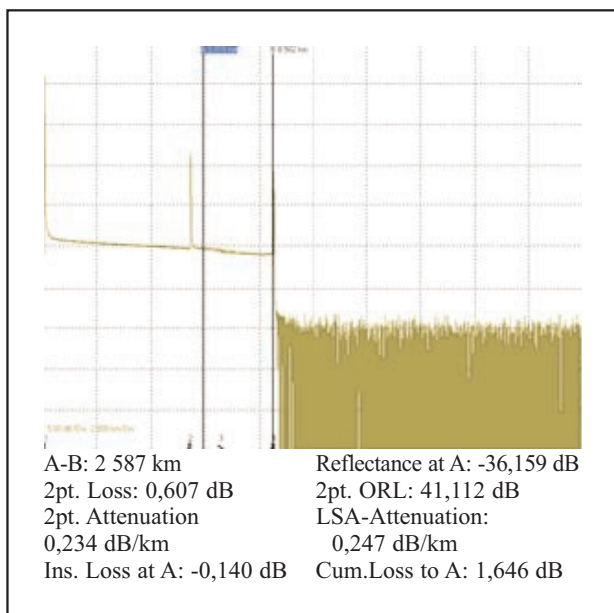
Slika 6. Slabljenje ADSS dužine 1 600 m nakon vešanja na stubove dalekovoda

slabljenja na 1 300 i 1 550 nm korišćenjem OTDR na kablju pre polaganja. Rezultati su u potpunosti zadovoljili vrednosti deklarisanе za isporučeni kabl.

Pri postavljanju, na svim zateznim poljima, nakon kontrole strele proveravana je vrednost optičkog slabljenja na 1 550 nm. Na kraju deonice ADSS kabla još jednom su urađena merenja optičkog slabljenja na obe talasne dužine koja pokazuju da nema odstupanja u odnosu na početne vrednosti.

Nakon montaže kabla sa posebnom pažnjom pristupilo se merenju karakteristika ADSS kabla. Karakteristika je prikazana na slici 6.

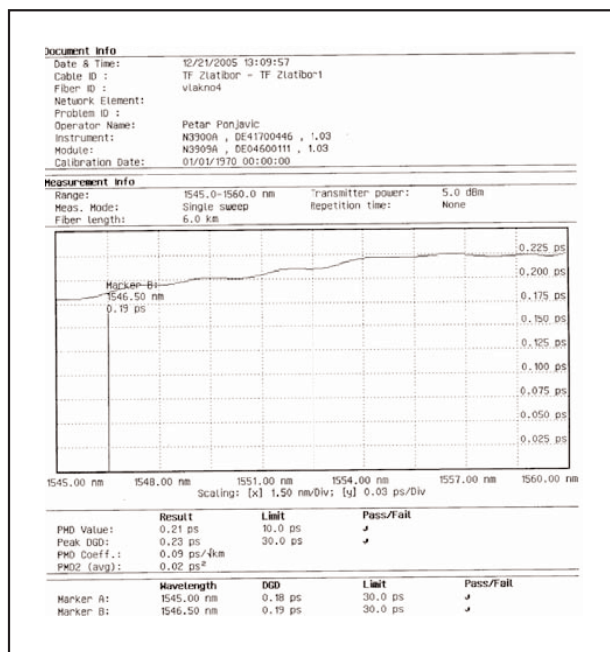
Pošto je cela deonica kompletirana sa terminalnom opremom, pristupilo se završnim merenjima a ista su pokazala potpuno zadovoljavajuće karakteristike ugrađenog optičkog kabla.



Slika 7. Slabljenje na izgrađenoj deonici

Sa slike 7 vidimo da je slabljenje vlakana na izgrađenoj deonici od 3 000 metara sa dva nastavka u proseku 0,24 dB/km na 1 550 nm, što je skoro isto kao i samo fabričko slabljenje vlakna. Pošto su merenja karakteristika optičkih vlakana, kao što su slabljenje, optička dužina i refleksija, pokazala izuzetne vrednosti, da bi se sve to još na najbolji način i potvrdilo, u okviru sastanka Radne grupe EPS za ADSS kablove na Zlatiboru 22. 12. 2005, izvedena su merenja disperzije sa posebnim osvrtom na merenja PMD (Disperzija Polarizacionog Moda). Ovim parametrom se najbolje reprezentuje stanje izgrađene optičke relacije u pogledu stalnih spoljašnjih uticaja, a što je upravo slučaj sa ADSS kablom. Merenja su izvedena najsavremenijim instrumentom po Jones Matrix Eigenanalysis direktnoj metodi mere-

nja disperzije. Merena je dvostruka dužina kabla koja je dobijena prespajanjem vlakana u petlju u TS Zlatibor 1 a merenja su vršena iz TS Zlatibor. Rezultat je prikazan na slici 9 a vrednost od 0,09 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  predstavlja vrednost znatno bolju od zadovoljavajuće vrednosti od 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ , koja je standard za vazdušne optičke kablove.



Slika 8. Rezultati merenja PMD-a

## 6. 2. Projekat: DC Slavija – TS tehnički fakultet – 0,4 kV

Drugi realizovani ADSS projekat odnosio se na ostvarenje optičke veze na relaciji DC Slavija-TS Tehnički fakultet u Beogradu u dužini oko 1 100 m. ADSS kabl je postavljan po stubovima javne rasvete i niskonaponske mreže sa prelazom tramvajske mreže. Kabl je sa standardnim brojem od 24 monomodna optička vlakna (TO SM 31 R 6x4xIIx0,5 x3,5 xCMAN) predviđen za raspone do 150 m.

Ovaj projekat predstavlja i prva iskustva u postavljanju ADSS kablova u gradskim uslovima saobraćaja i rešavanjima kritičnih tačaka koje su iziskivale postavljanje dva nova betonska stuba da bi se trasa održala u projektovanoj dužini. Interesantno je navesti da je zahvaljujući svojoj dielektričnoj konstrukciji prelaz preko tramvajske trase bio izveden bez problema i bez prekida saobraćaja.

Primenjen je vešajući pribor koji se normalno koristi za energetski snop za SKS kablove 0,4 kV tj. čelične obujmice, stezaljke za zatezno prihvatanje, stezaljke za noseće prihvatanje i zatezači.

Ulaz u objekte je izveden preko zidne konzole, direktno sa uličnog stuba.

Terminalna oprema kabla u vidu dve kompletne ZOK kutije bila je sa FC/PC konektorima sa odgovarajućim brojem patch kablova.

### 6. 3. Projekat:

#### DC Slavija – TS Neimar – TS Obilić

Ovaj projekat je obuhvatio dve nezavisne deonice tako da se u TS Neimar stiču dva ADSS kabla, jedan iz DC Slavija od 1 327 m i drugi iz TS Obilić od 1 590 m [4].

Postavljanje kablova obavljeno je u izuzetnim teškim gradskim uslovima sa prelazom preko trolej-buske trase, komplikovanih raskrsnica gradskog saobraćaja uz korišćenje kombinovanih postupaka polaganja, kako bi bila sačuvana integralna dužina optičkog kabla za datu deonicu i sigurnosna visina kabla od 5-6 m na svakom stubu javne rasvete.

Takođe i ovde je korišćen ADSS kabl (TO SM 31 R 6x4xIIx0,5x3,5 CMAN) dok su terminalnu opremu kabla sačinjavale ZOK kutije sa SC konektorima.

U svim objektima ostavljena je rezerva optičkog kabla oko 50 m, namotana i učvršćena na zid.

Na relaciji TS Neimar – TS Obilić na 50 metara od TS Obilić, zbog incidentnog slučaja morao je da se uradi nastavak na stubu korišćenjem optičke spojnice slika 9.

Rezultati merenja optičkog slabljenja dali su različite rezultate za buduću primenu optičkih vlakana u II i III prozoru.



Slika 9. Nastavak ADSS kabla na stubu

Rad je primljen u uredništvo 9. 07. 2007. godine

## 7. BUDUĆI PROJEKTI

Na osnovu prethodnih iskustava i dokazanih prednosti ADSS kablova nastalo je veliko interesovanje elektrodistributivnih organizacija za implementiranje ovih rešenja na postojećim dalekovodima kao što su:

- Elektrodistribucija Republike Srpske preko tendera za ugradnju oko 140 km;
- ED Užice za tender rekonstrukcije 35 kV mreže oko 10 km;
- ED Beograd za rekonstrukciju mreže Krnjača-Borča-Padinska Skela oko 15 km i
- ED Leskovac – realizacija projekta u toku za 3 km ADSS kabla.

## 8. ZAKLJUČAK

*Ostvarena su prva iskustva u polaganju ADSS kablova u našoj zemlji. Laka i brza montaža otvara nove perspektive u primeni, tako da treba očekivati da će ovi kablovi postati moćno sredstvo u komunikacijama po dalekovodima, pored odomaćenog OPGW kabla.*

*Ukazano je na dalje aktivne pomake u realizaciji novih projekata u ED preduzećima za rešenje savremenih optičkih veza naročito po 35 kV mreži dalekovoda kao i u NN mreži.*

*Iako je Projekat TS Zlatibor – TS Zlatibor 1 inicirao donošenje Preporuka za postavljanje i održavanje telekomunikacionih vodova po stubovima srednjenaponskih elektro-distributivnih vodova izvedenih golim provodnicima, realizovani projekti su neosporno potvrdili ubranu primenu ovih kablova.*

*Izložena primena ADSS kablova u našoj zemlji ukazuje na potrebu da treba smelije ići na njihovo postavljanje ne samo u srednjenaponskoj i NN mreži, već i u mreži dalekovoda visokog napona, ukoliko se na tim relacijama javi potreba za novim optičkim vezama.*

## 9. LITERATURA

- [1] TEHNIČKI DEO IZ PONUDE IZRAELSKE FABRIKE KABLOVA-SUPERIOR CABLE
- [2] Katalog nemačke firme RIBE
- [3] Katalog firme proizvođača pribora
- [4] Glavni projekat DC Slavija-TS Neimar-TS Obilić
- [5] D. Nešić, P. Ponjavić REALIZACIJA OPTIČKE VEZE SA ADSS I STANDARDNIM OPTIČKIM KABLOM IZMEĐU TS ZLATIBOR I TS ZLATIBOR 1, Sigre 2005



**Dušan Nešić** je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na odseku za telekomunikacije i elektroniku 1964. godine, nakon čega, sve do 1991. godine, radi u Razvojno-istraživačkom centru u Fabrici kablova u Jagodini, u oblasti konstrukcije i primene svih telekomunikacionih kablova i kablovskog pribora.

Rukovodio je radom tima koji je doprineo da se u ovoj oblasti usvoje mnogi novi telekomunikacioni kablovi za potrebe Telekoma, železnice, JNA, naftovoda i izvoza. Tako je 1988. godine njegovim stručnim angažovanjem konstruisan i proizveden prvi optički kabl za Telekom Srbije za relaciju TK centar u Katićevoj – TC Konjarnik 4,5 km, a zatim je projektovana i realizovana investicija u opremu za prvu masovnu proizvodnju isključivo optičkih kablova u našoj zemlji.

U periodu od 1991. do 1998. godine radio je u Fabrici kablova – Zaječar na realizaciji investicionog projekta proizvodnje savremenih bakarnih kablova počev od definisanja opreme, izgradnje građevinskog objekta, montaže opreme, puštanja u rad i uvođenja tehnološkog procesa.

U periodu od 1998. do 2003. godine radio je u Telekomu Srbije, u službi nabavke, na organizaciji kvalitetnog prijema celokupne telekomunikacione opreme, uključujući kablove, kablovski pribor i dr.

Od 2003. godine radi u Telegroupu Beograd kao stručni saradnik podrške u komercijalnoj službi. Pokrenuo je inicijativu za širu primenu ADSS kablova, tako da su ostvareni prvi rezultati koji su navedeni u ovom stručnom radu.



---

Ljiljana Rašković i Časlav Lačnjevac

# Antikorozijska zaštita energetskih postrojenja premaznim sredstvima

Pregledni rad  
UDK: 620.197.6

---

Rezime:

U radu su prikazani Sistemi za zaštitu od korozije energetskih postrojenja premaznim sredstvima na bazi jednog tipa premaznih sredstava ili kombinacije više tipova, sa osvrtom na njihovu primenu i prednosti. Izložena su osnovna svojstva glavnih komponenata premaznih sredstava primenjenih u antikorozijskoj zaštiti energetskih postrojenja. Funkcionalna svojstva projektovanih Sistema zaštite eksperimentalno su ispitana u skladu sa namenom i uslovima eksploatacije. Projektovani Sistemi za zaštitu od korozije energetskih postrojenja su rezultat dugogodišnje primene.

**Ključne reči:** premazna sredstva, veziva, umrežavanje, suvi film, pigmenti, inhibiranje korozionog procesa, sistemi antikorozijske zaštite.

---

Abstract:

## ANTI-CORROSION PROTECTION OF ENERGETIC PLANTS BY COATING SUBSTANCES

The paper shows anti-corrosion protection systems of energetic plants by means of coating substances consisting of one type or of combination of several types of coating, with a review of their application and advantages. Basic properties of major components of coating substances applied in anti corrosion protection of energetic plants have been presented in the paper. The functional characteristics of designed protection systems have been experimentally tested in accordance with both the purpose intended and exploitation conditions. The designed systems for anti-corrosion protection of energetic plants are a result of a long-term application.

**Key words:** coating substances, resins, crosslinking, dry film, pigments, corrosion process inhibition, anti-corrosion protection systems

---

## 1. UVOD

Premazna sredstva za zaštitu od korozije su specijalni proizvodi, koji se koriste za dugotrajnu zaštitu energetskih i industrijskih postrojenja izloženih vremenskim i drugim uticajima sredine.

Danas, sve više postoji potreba za premazima, koji bi se primenjivali u zahtevanim uslovima rada, a morali bi da sadrže aktivnu formulaciju fleksibilnosti, dobru sposobnost formiranja filma u uslovima okoline i dobre radne karakteristike.

U tu svrhu razvijena su moderna premazna sredstva sa višekomponentnim formulacijama, koji-

---

Prof dr Ljiljana Rašković, dipl. ing. tehn., – Industrija boja i lakova Pomoravlje ad Niš, 18 000 Niš, Bulevar 12. februar 129  
Prof dr Časlav Lačnjevac dipl. ing. tehn., – Poljoprivredni fakultet Zemun – Univerzitet Beograd, 11 080 Zemun, Nemanjina 6

ma se obezbeđuje zaštita u najagresivnijim sredinama. Modeliranjem reoloških osobina povećava se ekonomičnost smanjenjem broja nanosa. Primenom sintetičkih polimera kao vezivnih materijala obezbeđuje se postojanost na habanje usled abrazije, koja se ispoljava naročito pri debljinama filma većim od 120 µm. Međutim, i pored vidnog poboljšanja svih performansi premaznih sredstava, može se reći, da ne postoji idealno premazno sredstvo, čijim bi se svojstvima istovremeno obezbedila i dobra zaštita i dizajn sa odgovarajućim imidžom. Zato se u oblasti površinske zaštite primenjuju sistemi premaza čija je uloga različita i čija sumarna svojstva zadovoljavaju zahteve i zaštite i dizajna. Od sistema zaštite zahteva se dobra prionljivost za podlogu, kompaktnost, čvrstoća, elastičnost i dekorativni izgled u toku dugotrajnih eksploatacionih uslova. Zaštitni sistemi moraju biti inertni, kako ne bi došlo do reakcije između njih i materija sa kojima dolaze u kontakt. Drugim rečima zaštitni sistem mora sprečiti prodiranje korozivnih agenasa do površine podloge.

Prema današnjim saznanjima postoje dva modela zaštite od korozije, sistemima premaza. Po prvom, u osnovi je nepropustljivost. U ovom slučaju sistem zaštite mora imati odličnu prionljivost za površinu podloge, koju štiti od korozije i mora stvarati prepreke za prolaz korozivnih agenasa. Ovde je proces korozije sprečen odvajanjem podloge od uticaja spoljašnjih faktora kao uzročnika korozije. Po drugom modelu proces korozije se sprečava primenom aktivnih inhibitorских pigmenata u osnovi. U vlažnoj sredini aktivni pigmenti jonizuju u dovoljnoj koncentraciji da reaguju s čeličnom podlogom i na taj način je pasiviraju.

Ovi modeli zaštite od korozije, u praksi su pokazali veliku efikasnost, a njihovim kombinovanim dejstvom postignuta je optimalna zaštita od korozije u veoma agresivnim sredinama.

U cilju unapređenja kvaliteta antikorozone zaštite (AKZ) energetskih postrojenja, neophodno je analizirati sve uslove, koji bi mogli da doprinesu uspešnosti te zaštite.

Analizom uslova obuhvaćeni su sledeći elementi:

- standardi pripreme podloge;
- izbor i određivanje sistema antikorozone zaštite;
- praćenje dozvoljenih mikroklimatskih uslova pri izvođenju antikorozone zaštite;
- definisanje debljine suvih filmova;
- međupremazni intervali;
- očekivani uslovi izlaganja objekta u eksploataciji i
- očekivana trajnost zaštite u odnosu na cenu premaznih sredstava.

Svaki predloženi sistem antikorozone zaštite mora imati tehnološko i ekonomsko opravdanje. Va-

žno je da se u početnoj fazi razmatranja uradi odgovarajući projekat antikorozone zaštite u kome su bitni elementi:

- odgovarajuća priprema podloge;
- prihvatljiva tehnologija nanošenja premaza i
- procena korozivne agresivnosti, radi definisanja zaštite u zavisnosti od funkcije objekta.

Pravilnim definisanjem odnosa između pripreme podloge, načina nanošenja i sastava sistema antikorozone zaštite može se uticati na kvalitet i trajnost, odnosno na ekonomičnost. Na primer: ako su troškovi pripreme podloge i izvođenja antikorozone zaštite veći u odnosu na cenu materijala, onda se mora primeniti kvalitetniji sistem antikorozone zaštite, kojim se obezbeđuje veća trajnost zaštite.

Izbor sistema zaštite zavisi i od eksploatacionih uslova, odnosno korozivne agresivnosti sredine. Energetska postrojenja izložena su nepovoljnim režimima eksploatacije u:

- područjima industrijskih oblasti i
- područjima agresivne sredine, a to su industrijske oblasti sa visokom vlažnošću i agresivnom atmosferom.

Sistemi zaštite od korozije mogu biti na bazi jednog tipa premaznih sredstava ili kombinacije više tipova. Premazna sredstva, koja ulaze u sastav sistema zaštite poseduju različita zaštitna svojstva. Osnovni premazi su sa inhibitorским svojstvima, a pokrivni premazi su sa svojstvima nepropustljivosti.

Efikasnost zaštitnih sistema premazima zavisi i od kompatibilnosti između pojedinih slojeva, od poroznosti i od debljine suvih filmova sistema. Debljina zaštitnog sistema bira se u zavisnosti od uslova eksploatacije i veka trajanja zaštite.

U propisanoj projektnoj dokumentaciji definiše se minimalna debljina sistema zaštite. To je debljina pri kojoj sistem pruža efikasnu i ekonomski opravdanu zaštitu od korozije.

## **2. IZBOR SASTAVA PREMAZA NA PERFORMANSE U ANTIKOROZIONOJ ZAŠTITI ENERGETSKIH POSTROJENJA**

Premazna sredstva su složeni proizvodi u kojima učestvuje veliki broj sirovina (vezivo, pigmenti, punila, pomoćna sredstva i dr.). Lista sirovina je neograničena i svakim danom je sve veća. Svojstva premaznih sredstava, najvećim delom zavise od osobina učesnika, ali i od njihovog međusobnog odnosa. Nanešeno premazno sredstvo na podlogu, posle sušenja formira film, kojim je potrebno da se obezbedi:

- odvajanje podloge od spoljašnjeg uticaja sredine;
- boja i ostale estetske osobine;

- sprečavanje korozivnih procesa i
- otpornost na habanje i deformacije i sl.

Nosioci svih navedenih osobina su dve osnovne komponente: vezivo i pigmenti. Ostale komponente služe samo za modifikaciju međusobnih odnosa osobina. Uloge između osnovnih komponenti podeležene su tako što su veziva odgovorna za adheziju, mehaničke i hemijske osobine, dok su pigmenti nosioci inhibitorskih i optičkih osobina.

Poznato je da su kao veziva ranije upotrebljavane prirodne smole i ulja, a sa razvojem moderne hemije ista su zamenjena sintetičkim polimerima. Upotreba polimera za veziva u premazima uslovljena je njihovim hemijskim, fizičkim i mehaničkim osobinama.

Hemijski karakter makromolekula utiče direktno na njihovu rastvorljivost, otpornost prema vodi i drugim agensima. Fizičke osobine, naročito vizkozitet su pod velikim uticajem oblika i veličine makromolekula.

Mehaničke osobine zavise od oblika, veličine i konstitucije makromolekula.

Trodimenzionalne makromolekularne mreže sa kovalentnim vezama između atoma, daju filmove sa velikom mehaničkom otpornošću i dobrom postojanošću na uticaj raznih agenasa.

Polimeri sa trodimenzionalnim makromolekularnim rešetkama sa kompaktnom gustinom umrežavanja daju filmove sa velikom tvrdoćom kojima nedostaje elastičnost.

Polimeri sa linearnim makromolekularnim lancima daju veoma elastične filmove, kojima nedostaje tvrdoća.

Karakteristično je za linearne polimere da nagrađeni film zadržava rastvorljivost, za razliku od trodimenzionalnih makromolekula, koji svoju finalnu građu rešetke završavaju u procesu formiranja filma i kod kojih film više nije rastvoran u rastvaračima u kojima je prethodno bio rastvoran polimer.

Proces formiranja filma počinje isparavanjem isparljivih komponenti, što dovodi do čvrstog zbijanja čestica polimera. Kada preostale komponente ispare, pod uticajem sila dolazi do čvrstog zbijanja i koalescencije čestica. Predloženi su mnogi modeli i mehanizmi vezani za poreklo ovih sila [1] ali se svi slažu da je potrebna difuzija molekula polimera duž granice čestica. Kada do ovog dođe, pojedine čestice prestaju da postoje, kohezivna jačina filma se značajno povećava i formira se čvrst film na supstratu. Ovo je udruženo sa velikim pomeranjem lanca, tako da polimer na temperaturi višoj od temperature stakla  $T_g$  lakše formira film. Na temperaturi, koja je niža od  $T_g$  za dati polimer, formira se film koji pokazuje manju otpornost na deformativne procese i koji nije hemijski rezistentan. Zbog toga se predlaže

temperatura viša od temperature stakla  $T_g$  polimera pri formiranju filma. Kod dvokomponentnih premaza za antikorozijsku zaštitu energetskih postrojenja (poliuretani, epoksi) kinetika reakcije je dovoljno brza, da se reaktanti moraju mešati neposredno pred upotrebu, inače bi u protivnom došlo do preranog geliranja.

Dvokomponentni poliuretani, formiraju se iz reakcije polifunkcionalnog izocijanata sa hidroksi funkcionalnim polioliom. Ova reakcija dovodi do umrežavanja i stvaranja uretanskih veza. U tom slučaju kinetika obično sledi odnos drugog reda [2]. Ključni problem vezan za ovaj mehanizam je relativna brzina isparavanja rastvarača u odnosu na brzinu reakcije. Rastvarači mogu da budu zarobljeni i da formiraju mehuriće unutar filma. Ukoliko se pak molekulska masa suviše brzo povećava, tokom ranih stadijuma stvrdnjavanja, difuzija reaktivnih grupa može biti ometena. To sprečava kompletnu reakciju i ostavlja niže molekulske mase u filmu. Brze reakcije dovode do nepokretnosti i potencijalnih mehaničkih defekata. S druge strane, spore reakcije mogu da uzazovu sporo sušenje i razvoj osobina koje su takođe nepoželjne. Ukoliko je prisutna vlažna sredina pri formiranju filma odigravaju se kompetitivne reakcije izocijanata sa hidroksilnim grupama poliola i sa vodom. Dok prva reakcija daje željene poliuretane, drugom reakcijom nastaje poliurea i ugljen-dioksid. Neka istraživanja ukazuju da je prva reakcija izocijanata i hidroksilne grupe iz poliola brža od druge reakcije izocijanata sa vodom [3,4].

Epoksi smole same za sebe formiraju loše filmove. Filmovi sa dobrim osobinama ostvaruju se samo kada se kreiraju trodimenzionalno povezane strukture od epoksi smola u reakcijama sa polifunkcionalnim umreživačima [5,6].

Najčešće korišćena reakcija za umrežavanje epoksi smola je reakcija poliadiacije. U ovom slučaju funkcionalnu grupu predstavlja aktivni proton, sa kojim se odvija adicija na epoksi prsten uz formiranje hidroksilne grupe i sekundarne amino grupe, a u daljoj reakciji formira se tercijarni amin. Proces umrežavanja ubrzava se prisustvom hidroksilne grupe, dok tercijarni amin ujedno predstavlja katalizator. Iz poznatog mehanizma reakcije može se smatrati da se povezivanje odvija kao reakcija poliamina sa epoksi smolama u praktično ekvivalentnom odnosu. U praksi je međutim, potvrđeno da korišćenje teoretskih količina umreživača ne rezultuje uvek optimalnim osobinama filma.

Za umrežavanje epoksi smola koristi se širok izbor umreživača. Tako, formirani filmovi epoksi smola sa poliaminima karakterišu se visokom rezistencijom na hemikalije, vodu i rastvarače. Formirani filmovi epoksi smola sa poliamidoaminima u od-

nosu na filmove formirane sa poliaminima, pokazuju bolju elastičnost, adhezivnost i postojanost prema vodi, istu postojanost prema rastvaračima i alkalijama, ali slabiju postojanost prema kiselinama.

U cilju zaštite čovekove sredine sve više se primenjuju sistemi zasnovani na bazi vodenih emulzija epoksi smola i umreživača [7]. Osobine formiranih filmova iz samoemulgujućih epoksi smola sa poliamidoaminima u vodenom rastvoru su veoma slične onima koje se dobijaju umrežavanjem epoksi smola sa poliamidoaminima u organskim rastvaračima. Epoksi smole mogu da se umrežavaju i sa drugim sintetičkim smolama, kao i sa poliizocijanatom.

Izbor umreživača epoksi smola uslovljava primenu premaznih sredstava. Tako, za formiranje veoma elastičnih filmova primenjuju se alifatični poliamini, za rezistentnost prema različitim agensima poliamidoamini, a za veoma teške uslove eksploatacije u obzir dolazi i primena većeg broja umreživača različitih po sastavu i strukturi.

Za veoma nepovoljne uslove eksploatacije, danas se sve više za osnovne premaze primenjuju neorganska silikatna veziva, koja otvrdnjavaju samostalno u organskim rastvaračima. Ovako formirani filmovi izuzetno su otporni na atmosferilije i abraziju.

Kopolimeri vinil hlorida koriste se kao veziva u premazima pod zajedničkim nazivom vinilne smole. Filmove formiraju otparavanjem rastvarača. Korigovanje fizičko mehaničkih osobina, u svojstvu bolje antikorozijske zaštite, postiže se kombinovanjem sa alkidnim ili akrilnim smolama uz očuvanje postojanosti prema agresivnim hemikalijama. Proces formiranja filma u ovom slučaju je mnogo složeniji, a osobine formiranih filmova zavise kako od isparavanja rastvarača, tako i od verovatnoće poprečnog povezivanja u trodimenzionalno umreženu strukturu.

Alkidne smole imaju dosta široku primenu kao vezivni materijali u premazima, bez obzira na sve veći broj drugih sintetičkih veziva. Radi poboljšanja svojstava, na primer: brzine sušenja, hemijske postojanosti i dr. alkidne smole se modifikuju.

Umrežavanje alkidnih smola sušivih na vazduhu odvija se reagovanjem dvostruke veze iz dela sušivih masnih kiselina sa kiseonikom [8,9,10]. Proces polimerizacije se brzo odvija pri čemu se veći broj molekula povezuje preko peroksidnih mostova.

Pigmentima se obezbeđuje pokrivenost odnosno dizajn objekta. Ova osobina pigmentata prouzrokovana je interakcijom upadne svetlosti i pigmenta. Za osnovnu ocenu pokrivenosti pigmentata može se koristiti Fresnelova [11] relacija, koja povezuje reflektivnost filma sa razlikom indeksa refrakcije pigmenta i medijuma u kojem je dispergovan.

Od brojnih metoda za merenje pokrivenosti pigmentata, najčešće se koriste one koje se baziraju na

određivanju kontrastnog odnosa i korišćenju matematičkog modela koji daje Kubelka-Munk teorija.

Inhibiranje korozionog procesa ostvaruje se primenom koroziono inhibirajućih pigmentata u osnovnim premazima, odnosno u stvaranju zaštitnih pasivirajućih slojeva na anodnim površinskim centrima uz istovremenu redukciju na katodnim površinskim centrima [12,13]. Međutim, visoka toksičnost olova i soli hromne kiseline su ograničavajući faktor za primenu pigmentata na bazi olova i hroma. U svetlu ovog problema sve veći značaj danas dobijaju netoksični fosfatni pigmenti. Na osnovu literaturnih podataka inhibiranje korozionih procesa sa fosfatnim pigmentima bazirano je na obrazovanju kompleksa. Osnov teorije čini postavka da se tercijarni cinkfosfat ponaša kao bazna kompleksna kiselina, koja u reakciji sa fero i feri jonima stvara anodni bazni inhibitorski kompleks što dovodi do formiranja pasivirajućih zaštitnih slojeva.

Ostalim komponentama, balansiraju se osobine premaza, koje su neophodne za primenu.

### **3. SISTEMI ANTIKOROZIJSKE ZAŠTITE ENERGETSKIH POSTROJENJA I OČEKIVANA TRAJNOST**

U sledećim tabelama 1 i 2 prikazani su Sistemi AKZ, kao rezultat dugogodišnje primene na zaštiti energetskih postrojenja. U tabeli 1 su zaštitni sistemi za primenu u novogradnji, a u tabeli 2 zaštitni sistemi za sanaciju i revitalizaciju.

Sistemi zaštite na bazi dvokomponentnih epoksi-poliuretanskih premaza primenjeni su u uslovima veoma agresivne sredine. To su kombinovani sistemi sa više tipova premaza. Osnovni premazi su sa netoksičnim inhibitorskim pigmentima, a pokrivni su poliuretanski premazi, koji se odlikuju visokom otpornošću na abraziju i udar i postojanošću boje i sjaja. Za specifične uslove primene (duži međufazni interval) primenjeni su osnovni premazi sa neorganskim silikatnim vezivom, za istu namenu u uslovima agresivne sredine.

Sistemi zaštite na bazi vinil-akrilnog veziva primenjeni su za zaštitu u industrijskoj okolini. Premazi su jednokomponentni i lako se apliciraju. Odlikuju se brzim sušenjem i ostvarivanjem velike debljine suvih filmova. Premazna sredstva sa vinil-akrilnim vezivnim materijalom mogu se primenjivati i pri veoma niskim temperaturama.

Sistemi zaštite na bazi modifikovanih alkidnih smola primenjeni su na zaštiti objekata u gradskoj i ruralnoj sredini kao i u industrijskim područjima sa manje zagađenom atmosferom. I pored sve veće težnje za primenom modernih sistema, alkidni sistemi

i dalje značajno opstaju, a osnovni razlog je znatno niža cena alkidnih premaza i jednostavna primena.

Za objekte koji su permanentno u vodi ili u vlažnoj sredini primenjeni su sistemi zaštite sa dvokomponentnim epoksi-katranskim vezivom. U prostorijama bez ventilacije (reparatura kondenzatora)

primenjeni su dvokomponentni epoksi premazi bez rastvarača. Sistemi zaštite na bazi ovih premaza su postojani na uticaj hemikalija, vode i povećane vlažnosti.

Prikazani sistemi zaštite u praksi su pokazali veliku efikasnost.

Tabela 1.

Sistemi AKZ energetskih postrojenja – novogradnja

Redni broj	Oznaka sistema S.	Stepen pripreme površine	Osnovne prevlake		Među prevlake		Pokrivne prevlake		Sistemi AKZ		Očekivana trajnost zaštite ISO 12944-6	Kategorija agresivnosti ISO 12944-2
			Vezi-vo	NDFT (µm)	Vezi-vo	NDFT (µm)	Vezi-vo	NDFT (µm)	Broj prevlaka	NDFT (µm)		
1.	EP/PUR	Sa 2½	EP	80	EP	100	PUR	60	3	240	H (više od 15 g)	C5-I C5-M
2.	ESI/EP	Sa 2½	ESI	75	–	–	EP	200	3	275	M (5-15g)	C5-I
3.	ESI/EP/PUR	Sa 2½	ESI	75	EP	125	PUR	50	4	250	H (više od 15 g)	C5-I C5-M
4.	EP	Sa 2½	EP	80	EP	100	EP	40	3	220	M (5-15g)	C5-I
5.	EP	Sa 2½	EP	200	EP	2x2,5 mm sa peskom	EP	80	4	5 280	M (5-15g)	Im1 Im2 Im3
6.	EP/CTE	Sa 2½	EP	20	–	–	CTE	250	3	270	M (5-15g)	Im1 Im2 Im3
7.	EP/PVC/AY	Sa 2½	EP	80	–	–	PVC/AY	120	3	200	M (5-15g)	C5-I C5-M
8.	AKM	St 3	AKM	80	AKM	40	AKM	40	3	160	L (2-5 g)	C-3

Tabela 2.

Sistemi AKZ energetskih postrojenja – sanacija i revitalizacija

Redni broj	Oznaka sistema S.	Stepen pripreme površine	Osnovne prevlake		Među prevlake		Pokrivne prevlake		Sistemi AKZ		Očekivana trajnost zaštite ISO 12944-6	Kategorija agresivnosti ISO 12944-2
			Vezi-vo	NDFT (µm)	Vezi-vo	NDFT (µm)	Vezi-vo	NDFT (µm)	Vezi-vo	NDFT (µm)		
1.	EP	▲*	EP	50	EP	40	EP	60	3	130	L (2-5g)	C5-I C5-M
2.	PVC/AY	▲	PVC/AY	40	–	–	PVC/AY	80	3	120	L (2-5g)	C5-I
3.	AKM	▲	AKM	40	AKM	40	AKM	40	3	120	L (2-5g)	C5-I C5-M

\*▲ – obojena površina bez korozije i nečistoća

Označavanje simbola:

– EP – epoksi vezivo

– ESI – etilsilikatno vezivo

– AKM – alkidno modifikovano vezivo

– PUR – poliuretansko vezivo

– PVC/AY – vinil akrilno vezivo

– CTE – epoksi katransko vezivo

– NDFT – nazivna debljina suvog filma

#### 4. FUNKCIONALNA SVOJSTVA SISTEMA AKZ U PRIMENI

U eksploatacionim uslovima sistemi AKZ izloženi su hemijskim i fizičkim promenama, koje su posledica prirodnog starenja polimernog veziva, ali i hemijskog dejstva različitih agenasa iz okoline, zračenja, pre svega u UV delu spektra i mehaničkih oštećenja.

Osnovne funkcije sistema AKZ su antikoroziorna zaštita i dekorativna svojstva.

Razvijene su brojne metode za ispitivanje ponašanja tokom eksploatacije, koje se svode na merenja promena odabranih karakteristika u uslovima pojačanog dejstva nekoliko faktora okoline.

Za projektovane sisteme zaštite povezana su eksperimentalna i primenska ispitivanja. Takav pristup omogućava optimizaciju zahteva ne samo u primeni već i samih karakteristika premaznog materijala.

Eksperimentalna ispitivanja postojanosti prema koroziji Sistema AKZ izvršena su u skladu sa nameonom i uslovima eksploatacije, a rezultati su prikazani u sledećoj tabeli 3. Pored toga, ispitivanja su usklađena i sa vrstom organske prevlake, a sa druge strane uticajima dejstva atmosfere i korozionog dejstva različitih hemijskih materija.

Eksperimentalna ispitivanja postojanosti i otpornosti na koroziju, sprovedena po uslovima međunarodnog standarda ISO, potpuno su očekivana i u skladu su sa rezultatima ostvarenim na dugogodišnjoj trajnosti u eksploatacionim uslovima.

#### 5. ZAKLJUČAK

*Projektovani sistemi AK zaštite prikazani u tabelama 1 i 2 pokazuju dobru postojanost i pružaju dugotrajnu i efikasnu zaštitu od korozije u uslovima eksploatacije energetskih postrojenja.*

#### 6. LITERATURA

- [1] Hegedus R. C., Gilicinski G. A. Haney I. R., Jour. Of Coatings Tehn. Vol 68, N0 852 Jan. 1996, 51-56
- [2] Oertel G., Polyurethane handbook, Hanser Publishers, New York, 1985, 90-96
- [3] Senker S. D. Potter T. A. Journal of Coatings technology, 63, N0 793, 1991, 19
- [4] Jacobs P. B. Yu P. C. Journal of Coatings technology, 65, N0 822, 1993, 45
- [5] Rašković D. Lj. OSNOVI POLIMERNOG INŽENJERSTVA Tehnološki fakultet Leskovac, 1995, 26-33
- [6] Ciba Geigy, FORMULATIONS AND THEIR PROPERTIES, Publ. Nr. 28337/e 1989 Switzerland
- [7] Ciba Geigy, Wasserverdünnbares, kolthartedes Epoxyd harz-system auf Basis von Araldit Py 340/HZ 340 Publ. Nr. 24852/2/d 1996 Switzerland
- [8] Kern W. ELEMENTARVORGANGE BEI DER ÖLTROCKUNG, Farben, Lacken Austrichstoffey 1950, 242
- [9] Kern W. DIE KATALYSE DER AUTOHIDRATION UNGESÄTINGTER VERBINDUNGEN, DFZeit 10, 1956, 337

Tabela 3.

Otpornost na koroziju Sistema AKZ energetskih postrojenja

Redni broj	Oznaka sistema S	ISO 6270 Vlažna komora	ISO 7253 Slana komora	ISO 2812-1 Hemijska otpornost	ISO 2812-2 Potapanje u vodu	ISO 12944-2 Kategorija agresivnosti	ISO 4628-1 Ocena
1.	EP/PUR	720 h	1 440 h	–	–	C5-I C5-M	Bez promene
2.	ESI/EP	480 h	720 h	–	–	C5-I	Bez promene
3.	ESI/EP/PUR	720 h	1 440 h	–	–	C5-I C5-M	Bez promene
4.	EP	480 h	720 h	–	–	C5-I	Bez promene
5.	EP	–	–	–	2 000 h	Im1 Im2 Im3	Bez promene
6.	EP/CTE	–	–	–	2 000 h	Im1 Im2 Im3	Bez promene
7.	EP/PVC/AY	480 h	720 h	–	–	C5-I C5-M	Bez promene
8.	AKM	–	240 h	–	–	C3	Bez promene

- [10] Kaufmann H. OXYDATION UND VERFILMUNG TROCKENDER ÖLE, Fette, Seifen, Anstrichmittel 59, 1957, 153
- [11] Simson L. A. Measuring Opacity
- [12] Mayer G., Farbe + Lack vol 71, 2 1965, 113
- [13] Mayer G., Farbe + Lack vol 79, 4 1973, 293
- [14] Tehnička publikacija PREMAZNA SREDSTVA I SISTEMI ZAŠTITE ZA ELEKTROENERGET-

SKA POSTROJENJA INDUSTRIJA BOJA I LAKOVA POMORAVLJE NIŠ 2003

- [15] Tehnička publikacija ZAŠTITA DALEKOVODA, ELEKTRIČNIH STUBOVA I TRAFI STANICA PREMAZANIM SREDSTVIMA INDUSTRIJE BOJA I LAKOVA POMORAVLJE NIŠ 2004.

Rad je primljen u uredništvo 5. 04. 2007. godine



**Ljiljana Rašković** je rođena 1935. godine u Nišu. Diplomirala je 1960. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu, magistrirala 1976. godine, a doktorirala je 1984. godine na Tehnološko – metalurškom fakultetu u Skoplju. Po diplomiranju, zaposlila se u fabrici boja i lakova „Pomoravlje” Niš, a 1987. godine prelazi u stalni radni odnos na Tehnološki fakultet – Leskovac, Univerzitet Niš do kraja aktivne službe. U Industriji boja i lakova „Pomoravlje” Niš radi kao stručni saradnik i danas na razvoju i programskoj orijentaciji. Kao autor objavila je tri knjige i preko 100 stručnih i naučnih radova, koji su prezentirani u časopisima i na domaćim i inostranim konferencijama. Posebna oblast interesovanja su joj tehnologije i sistemi zaštite od korozije, značajni za razvoj industrije boja i lakova.



**Časlav Lačnjevac** je rođen u Aleksandrovcu Župskom, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. TM fakultet završio je u Beogradu 1976. godine, postdiplomske studije završio je u Centru za multidisciplinarnu studiju u Beogradu 1979. godine a doktorirao je na TMF 1994. godine. Tokom školovanja bio je nagrađivan raznim nagradama: Oktobarska nagrada grada Beograda za najbolje diplomske radove (1976), Nagrada Privredne komore grada Beograda za najbolje magistarske (1979) i Nagrada Privredne komore grada Beograda za najbolje doktorske radove (1995). Posle diplomiranja radio je tri godine u IHTM-u, do 1980. godine, zatim, od 1980. godine do 1995. godine u VZ Moma Stanojlović a od 1995. godine do 2003. godine u Institutu IMS. Od 2003. godine radi na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu, kao vanredni profesor na predmetu Opšta i neorganska hemija.

U toku dosadašnjeg rada bavio se problemima iz oblasti korozije i zaštite materijala. Objavio je jednu knjigu, jednu monografiju, deset preglednih radova, dvadeset radova u međunarodnim časopisima, preko četrdeset radova u domaćim časopisima i preko stopešest saopštenja na raznim skupovima u inostranstvu i zemlji. Uže polje interesovanja mu je zaštita čeličnih konstrukcija od korozije aktivnom i pasivnom zaštitom (katodna zaštita i premazna sredstva).

# Hidroenergetski potencijali Crne Gore

## Mogućnosti korišćenja za razvoj i unapređenje životne sredine

**Autori: Branislav Đorđević i Milinko Šaranović**

Izdavač: Crnogorska akademija nauka i umjetnosti,  
Podgorica, 2007, strana 264, bibl. 90, rezime

*Autori, prof. dr Branislav Đorđević, redovni član Akademije inženjerskih nauka Srbije i akademik Milinko Šaranović, finalizovali su u okviru posebne, obimne, lepo sistematizovane monografije svoja istraživanja hidroenergetskih potencijala Crne Gore. Radi se o vrlo značajnom istraživanju koje pokazuje da je Crna Gora jedna od retkih zemalja Evrope koja bi mogla, uz celovito i ekološki veoma usklađeno korišćenje svojih vodnih potencijala, da najveći deo svojih potreba za električnom energijom (oko 80 %) u narednim decenijama zadovolji iz hidroelektrana, kao ekološki najpovoljnijih obnovljivih izvora.*

*Knjiga je podeljena u osam poglavlja. U uvodnom delu se daje metodološki jasna distinkcija pojmova vode prisutne na slivu i vode koja se može kvantifikovati kao vodni resurs. To je vrlo bitno, jer se zbog mešanja tih pojmova daju pogrešne ocene vodnog bogatstva država i regija. U glavi koja se odnosi na prirodne odlike – bitne za analizu vodnih potencijala – daje se primerno sistematizovan prikaz orografskih, geoloških i hidrogeoloških odlika, klimatoloških karakteristika i padavina. Posebno je podroban prikaz hidroloških karakteristika (prosečni protoci, režimi malih i velikih voda, vodo-*

*staji i bilansi prirodnih jezera), kao i vodnih bilansa. Veoma su bitni zaključci o velikim vremenskim i prostornim neravnomernostima protoka, koje jako relativiziraju zaključke o navodnom velikom vodnom bogatstvu Crne Gore. U posebnom poglavlju se daje dosta detaljna analiza hidroenergetskih potencijala Crne Gore. Najvažniji je zaključak da se u najnovijim uslovima stanja na tržištu energenata, najveći deo tehnički iskoristivog potencijala, od 5,4÷6,1 TWh/godine, zavisno od varijante korišćenja voda, može tretirati kao ekonomski iskoristiv potencijal. Posle dobro ilustrovanog razmatranja hidroenergetskog razvoja Crne Gore, sledi vrlo zanimljiva i za sve energetičare važna glava, sa karakterističnim naslovom „Polazište za planiranje: u svetu je nastupilo pravo vreme za hidroelektrane”. U tom delu se vrlo pregledno ilustruje tendencija u svetu da se što celovitije iskoriste vodni potencijali (Kjoto protokol!) i da se revitalizacijom poboljšaju performanse postojećih sistema.*

*Centralni, najobimniji deo knjige je glava 6, u kojoj se detaljno razmatraju mogućnosti iskorišćenja hidroenergetskih potencijala na najvažnijim slivovima Crne Gore: Pivi sa Komarnicom, Tari, Čehotini, Limu, Ibru, Morači sa Zetom. Za svaki sliv se raz-*



matraju varijante i predlaže se strategija koja je primerena sadašnjim prilikama u okruženju. Posebno se razmatra integralno rešenje u gornjim tokovima Tare i Morače, kao deo integralnog sistema na slivovima Drine i Morače. U posebnom poglavlju se daje vrlo zanimljiva analiza ciljeva Crne Gore, kao i nizvodnih država – Republike Srpske, FBiH i Srbije – kao polazište za nalaženje zajedničke platforme za rešenje više-decenijskog problema oko prevođenja dela voda Tare. Pošto je ključni vodno-resursni problem Drine veoma velika neravnomernost protoka (protoci Drine u donjem toku se spuštaju i na manje od 50 m<sup>3</sup>/s, rešenje se mora tražiti u velikim čeonim akumulacijama sa godišnjim regulisanjem protoka, kojima bi se vrlo značajno povećavale male vode na čitavom nizvodnom toku Drine.

Posebno je važna glava 7, koja se vrlo detaljno bavi problemima uklapanja planiranih sistema u okruženje. Analiza obuhvata sve već navedene veće slivove, sa predlogom mera kojima se svi planirani objekti skladno uklapaju u ekološko okruženje. Daje se decidan, dokumentovan stav da se do-

brim projektovanjem i upravljanjem sistema – uz poboljšavanje vodnih režima, posebno povećanjem malih voda – mogu ostvariti poboljšavanja ekoloških stanja i stvoriti uslovi za povećanje biološke raznovrsnosti. U okviru te glave se razmatraju i metode za određivanje garantovanih ekoloških protoka, a navode se i primeri načina korišćenja voda u ekološki i kulturološki najuređenijim državama. U poslednjoj glavi se detaljno razmatraju metode planiranja sistema, isključivo u okviru integralnih razvojnih projekata sa složenim ciljnim strukturama, kojima se obuhvataju svi socijalni, privredno-ekonomski, ekološki, urbani, kulturološki, saobraćajni, vodoprivredni i hidroenergetski ciljevi. Knjiga se završava i sugestijama kako takve razvojne projekte treba prezentirati.

Ovo je vrlo značajna monografija, koja dolazi u pravi momenat, upravo kada u okviru Prostornog plana Crne Gore treba definisati rešenja u oblasti korišćenja, uređenja i zaštite vodnih potencijala.

Tina Dašić

# Rudarstvo na tlu Srbije

**Autor prof. dr Petar Jovanović**

redovni član Jugoslovenske inženjerske akademije

*Izdavačka delatnost Jugoslovenske inženjerske akademije obogatila je stručnu literaturu objavljivanjem prve knjige trotomnog dela RUDARSTVO NA TLU SRBIJE autora profesora dr Petra Jovanovića. Na 743 strane autor daje detaljan istorijski osvrt razvoja rudarstva na tlu današnje Srbije od preistorijskog doba do rudarstva u obnovljenoj Srbiji. Nastavak razvoja rudarstva do 2000. godine biće obrađeno u drugom i trećem tomu ove obimne studije.*

*Celokupna problematika obuhvaćena prvim tomom sistematizovana je i podeljena u tri tematske celine:*

*1. OPŠTI DEO, u kom, pored uvodih informacija o knjizi, je dat kraći osvrt na genezu i prostorni raspored mineralnih i energetskih sirovina u okviru državne teritorije današnje Srbije, i opisani prirodni uslovi i strani uticaji koji su omogućili da se rudarstvo na ovom prostoru razvije još u praistorijskom, a posebno u ranom istorijskom periodu.*

*2. SRPSKO RUDARSKO NASLEĐE, obuhvata prirodne i političke uslove pod kojima se rudarstvo na današnjim srpskim prostorima formiralo i razvilo, zbog čega je*

*postalo veoma cenjena, profitabilna i izuzetno važna privredna grana u: prerimskom, zatim rimskom, srednjovekovnom srpskom, turskom i austrijskom periodu.*

*3. RUDARSTVO U OBNOVLJENOJ SRBIJI, započinje sa Prvim srpskim ustanomom i sa posebnim zanimanjem prati sve što se sa rudarstvom dešavalo u toku obnove srpskih rudnika, prvo u Karađorđevoj Srbiji, zatim nastavlja sa naporima kneza Miloša da u kneževini Srbiji, ne samo obnovi stare i otvori nove rudnike, već Srbiji obezbedi i za rudasku struku školovane srpske građane. Posebno je istaknuta uloga Ustavobranitelja, njihovo nastojanje da u Majdanpeku izgrade srpski rudarski i metalurški centar, i zakonima regulišu odnose u oblasti rudarstva; nastojanje srpskih rudarskih inženjera da svojim znanjem, od malih i slabo opremljenih i vođenih rudnika, izgrade savremene i dobro tehnički opremljene rudarske pogone, i srpsko rudarstvo izvuku iz zaostale zanatske radinosti i daju mu obeležje moderne rudarske industrije. Koliko su u tome ovi vredni i požrtvovani srpski rudarski inženjeri postigli, iako je Srbija u međuvremenu vodila na svom tlu, od 1876. do 1941. godine, nekoliko velikih ratova, svaki čitalac*

*će moći to da sazna i pronađe odgovore na stranicama ove knjige.*

*Kao posebni delovi knjige, u odeljku PRILOZI, obrađeni su rudarski simboli (zastava, znak, rudarska slava); tradicionalna rudarska svečanost Skok preko kože; proizvodnja metala u starom i prvoj polovini srednjeg veka; srednjovekovno evropsko rudarstvo...*

*Knjiga je štampana na 80 gramskoj ofsetnoj hartiji sa koricama u tvrdom, luksuznom povezu i dekorativnim zaštitnim omotom (štamparija MST Gajić, Beograd).*

*Beograd, 19. 09. 2007.*

*Nekoliko reči o autoru.*

*Dr Petar Jovanović se školovao u Zemunu i Beogradu. Sa 32 godine odbranio je doktorsku disertaciju na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu. Nakon diplomiranja kratkko je radio u REIK „Kostolac”, posle čega prelazi na fakultet gde je od zvanja asistenta nastavničku karijeru uspešno završio kao redovni profesor i penzionisao se 1997. godine.*

*Za naučni doprinos rudarskoj struci dobio je mnoga društvena priznanja. Objavio je veći broj udžbenika, monografija, priručnika itd. Nakon penzionisanja posvetio se izučavanju istorije rudarstva i do sada objavio više radova iz te oblasti.*

*Mr Radmilo Ivanković*

---

# 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**