



# Elektroprivreda

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

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

Sadržaj	Strana Page	Content
		<i>Petar Vukelja, Radomir Naumov, Mítko Vučinić</i>
<b>PRENAPONI PRI PREKIDANJU MALIH INDUKTIVNIH STRUJA</b>	3	<b>OVERVOLTAGES FOR INTERRUPTION OF SMALL INDUCTIVE CURRENTS</b>
		<i>Vladimir Strezoski, Nenad Katić, Dušan Janjić</i>
<b>REGULACIJA NAPONA KAO INTEGRALNI DEO DISTRIBUTIVNOG MENADŽMENT SISTEMA</b>	12	<b>VOLTAGE CONTROL INTEGRATED IN DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEM</b>
		<i>Dragan Tasić, Miodrag Stojanović</i>
<b>ANALIZA FORMULA ZA PROCENU GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE</b>	26	<b>ANALYSIS OF EQUATIONS APPLICATION ON ELECTRICAL ENERGY LOSSES ASSESSMENT</b>
		<i>Miloje Kostić</i>
<b>POSTUPAK ZA PRORAČUN I ANALIZU UKUPNIH MARGINALNIH EFEKATA KOMPENZACIJE REAKTIVNIH SNAGA</b>	39	<b>A METHOD FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF TOTAL MARGINAL EFFECTS OF REACTIVE POWER COMPENSATION</b>
		<i>Lidija Korunović, Dobrivoje Stojanović</i>
<b>PARAMETRI MODELA POTROŠNJE NA NISKOM I SREDNJEM NAPONU KOD DISTRIBUTIVNIH MREŽA</b>	46	<b>LOAD MODEL PARAMETERS ON LOW AND MIDDLE VOLTAGE IN DISTRIBUTION NETWORKS</b>
		<i>Dragan Kovačević, Slobodan Skandrić, Slobodan Mikičić</i>
<b>MERENJA ELEKTRIČNIH SLOŽENOPERIODIČNIH VELIČINA</b>	57	<b>THE ELECTRICAL MEASUREMENT IN NONSINUSOIDAL CONDITIONS</b>
		<i>Milica Sovrlić, Hristina Stevanović - Čarapina</i>
<b>KOMERCIJALNA UPOTREBA POLIHLOOROVANIH BIFENILA I MOGUĆE ZAGAĐENJE ŽIVOTNE SREDINE</b>	63	<b>COMMERCIAL USE OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS AND POSSIBLE POLLUTION OF THE ENVIRONMENT</b>
		<i>Dobrivoje Marjanović</i>
<b>PRIMENA PROTIVEKSPLOZIONO ZAŠTIĆENIH UREĐAJA U RUDNIČKIM INFORMACIONO-UPRAVLJAČKIM SISTEMIMA</b>	72	<b>USE OF EXPLOSION-PROOF PROTECTED ELECTRICAL DEVICES IN COAL MINES INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS</b>
		<i>Božidar Rajnović</i>
<b>RAZVOJ MODELA OSNOVNIH PROGRESIVNIH RESURSA U IZGRADNJI SLOŽENIH PROIZVODNIH SISTEMA</b>	79	<b>MODEL OF DEVELOPMENT OF PROGRESSIVE RE- SOURCE IN BUILDING OF COMPOUND PRODUCTION SYSTEMS</b>
		<i>- drugi deo -</i>
		<i>Prikaz knjiga</i>
<b>„TRANZISTORSKI PRETVARAČI SNAGE” (drugo izdanje), autor RADOJLE Radetić</b>	91	<b>TRANSISTOR POWER CONVERTERS (second edition), by Radojle Radetić</b>
<b>ZBIRKA REŠENIH ZADATAKA IZ PROIZVODNJE, PRENOŠA I UPOTREBE ELEKTRIČNE ENERGIJE</b>	92	<b>COLLECTION OF SOLVED PROBLEMS COVERING POWER PRODUCTION, TRANSMISSION AND APPLICATION</b>
		<i>(drugo izdanje), autor Jovan Štarklj</i>

**IZDAVAČ:**  
**PUBLISHER:**

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

11 000 Beograd, Balkanska 13  
Telefon: 686-633, 643-823, 688-092, 687-199 (centrala)  
Telefaks: 686-398  
www.jugel.com; E-mail: jugel@sezampro.yu

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

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

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

Branislav A. Bošković, dipl. ing., predsednik,  
Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;  
Dr Duško Tubić, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Dr Slobodan Ružić, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Mr Rade Drča, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;  
Dr Radomir Milović, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;  
Branko Kotri, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić.

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

Dr Duško Tubić, dipl. ing., predsednik, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Dr Petar Vukelja, dipl. ing., zamenik predsednika, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;  
Prof. dr Dragomir Jelovac, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Podgorica;  
Dr Strahinja Bulajić, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;  
Nikola Jablan, dipl. ing., član, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, Nikšić;  
Prof. dr Miroslav Benišek, dipl. ing., član, Mašinski fakultet, Beograd;  
Prof. dr Branislav Đorđević, dipl. ing., član, Građevinski fakultet, Beograd;  
Prof. dr Jovan Nahman, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;  
Prof. dr Nikola Rajaković, dipl. ing., član, Elektrotehnički fakultet, Beograd;  
Prof. dr Dragan Popović, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;  
Radomir Naumov, dipl. ing., član, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd;  
Dr Borislav Perković, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Dr Gordan Tanić, dipl. ek., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Mr Milan Gavrilović, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Gojko Lončar, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Dragomir Marković, dipl. ing., član, „EPS” - JP TE „Nikola Tesla”, Obrenovac;  
Ljubo Mačić, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Srećko Milić, dipl. ing., član, „EPS” - JP „Elektroistok”, Beograd;  
Dragoljub Popović, dipl. ing., član, JP „Elektroprivreda Srbije”, Beograd;  
Mr Radmilo Ivanković, dipl. ing., član;  
Momčilo Gojgić, dipl. prav., član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd;  
Lela Lončar, dipl. filolog, član, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd.

**TEHNIČKI UREDNIK**  
**TECHNICAL EDITOR**  
Jovo Todorović dipl. teh.

**LEKTOR**  
**LINGUISTIC REVIEW**  
Lela Lončar, dipl. filolog

**TEHNIČKI CRTAČ**  
**MAPS AND GRAPHICS**  
Milanka Pejović, teh. crtač

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Časopis „Elektroprivreda” se izdaje u 2002. godini uz finansijsku pomoć Saveznog sekretarijata za razvoj i nauku.

The „Elektroprivreda” journal is published in 2002 with financial support of the Federal Secretariat for Development and Science.

**Štampa:** „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

**Tiraž:** 1 000 primeraka

**Circulation:** 1,000 copies

---

*Petar Vukelja,  
Radomir Naumov, Mitko Vučinić*

# **Prenaponi pri prekidanju malih induktivnih struja**

Pregledni rad  
UDK: 621.316.933; 621.3.015.3

---

*Rezime:*

*U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja prenapona pri prekidanju malih induktivnih struja koja je izvršio Institut "Nikola Tesla". Istraživanja prenapona su izvršena u velikom broju različitih konfiguracija elektroenergetskog sistema i to pri isključenjima: neopterećenih transformatora (autotransformatora), neopterećenih ili slabo opterećenih visokonaponskih motora, reaktora i transformatora (autotransformatora) opterećenih induktivnim potrošačima. Analiza rezultata istraživanja je ukazala na značajna dielektrična naprezanja izolacije opreme u ovim konfiguracijama pri isključenju sklopnih aparata i date su mere i sredstva za ograničenje prenapona.*

**Ključne reči:** *prenapon, sečena struja, transformator, visokonaponski motor, reaktor*

---

*Abstract:*

## **OVERVOLTAGES FOR INTERRUPTION OF SMALL INDUCTIVE CURRENTS**

*The paper presents the results of experimental investigations of overvoltages caused by interruption of small inductive currents performed by the Nikola Tesla Institute. These investigations of overvoltages were performed in a number of different configurations of power networks and during switchings-off: unloaded transformers (autotransformers), unloaded or low loaded high-voltage motors, reactors and transformers (autotransformers) loaded with the inductive consumers. The analysis of the results of the investigation point out considerable dielectric stress of equipment in these configurations during switching-off operation and suggested measures and means for limiting overvoltages.*

**Key words:** *overvoltage, chopping current, transformer, high-voltage motor, reactor*

---

### **1. UVOD**

Uključenja i isključenja sklopnih aparata u elektroenergetskom sistemu dovode do prelaznih naponskih i strujnih pojava. One ne zavise samo od konfiguracije mreže već i od karakteristika sklopnih aparata. Svojim radom (uključenjem i isključenjem) sklopnih aparata mogu da doprinesu intenzivnosti prelaznih režima, a time i do povišenih naprezanja

opreme u elektroenergetskom sistemu. Jedna od pojava koja može da dovede do znatnih dielektričnih naprezanja opreme, odnosno do visokih prenapona, je sečenje struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu [7, 13]. To se može desiti kada sklopni aparat prekida male induktivne struje. Svojevremeno je prekidanim kod kojih se pri isključenju električni luk gasi istim intenzitetom i za male struje i za struje krat-

---

*Dr Petar Vukelja, dipl. ing., Radomir Naumov, dipl. ing., Mitko Vučinić, dipl. ing. –  
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11000 Beograd, Koste Glavinića 8a*

kog spoja. Ova osobina se sreće kod većine prekidača koji se nalaze u eksploataciji u našem elektroenergetskom sistemu.

Pojava sečenja struje je tipična za sledeće operacije isključenja prekidača:

- isključenja neopterećenih transformatora, posebno u slučajevima isključenja koja su nastala neposredno posle uključenja dok još traje prelazni proces u transformatoru,
- isključenja reaktora,
- isključenja transformatora opterećenih reaktorom,
- isključenja visokonaponskih motora u zaletu,
- isključenja neopterećenih ili slabo opterećenih visokonaponskih motora.

U ovom radu će se, pored kratkog opisa pojave nastanka sečene struje i njene posledice pojave prenapona, dati rezultati eksperimentalnih istraživanja prenapona u elektroenergetskom sistemu Jugoslavije koja je izvršio Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”.

## 2. POJAVA SEČENE STRUJE I NASTANAK PRENAPONA

Pri prekidanju induktivnih struja, kada se one približavaju svojoj prirodnoj nuli, otpornost električnog luka između kontakta prekidača počinje naglo da menja svoju vrednost i postaje bitan element konture koju čine kapacitivnosti u neposrednoj blizini prekidača sa strane izvora ( $C_i$ ) i sa strane induktivnog potrošača ( $C_p$ ) i induktivnost konture ( $L_k$ ) koju čini prekidač sa susednim elementima. Sopstvena učestanost ove konture je:

$$f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_i C_p / (C_i + C_p)}} \quad (1)$$

Pošto je induktivnost  $L_k$  mala, sopstvena učestanost  $f_k$  može da bude veoma velika (reda 100 kHz). Kada struja „ $i$ ” kroz prekidač, pri približavanju prirodnoj nuli (trenutak  $t_o$ ) padne ispod određenog nivoa  $I_g$ , dolazi do nestabilnih oscilacija frekvencije  $f_k$  (slika 1). Oscilacije se naglo povećavaju, tako da do sečenja struje dolazi vrlo brzo po njihovom nastanku pri vrednosti  $I_s$  naizmenečne struje industrijske učestanosti (trenutak  $t_s$ ).

Tipične vrednosti struje pri kojoj nastupa sečenje za malouljne, pneumatske i SF<sub>6</sub> prekidače se nalaze u opsegu od 4 A do 20 A, kada je kapacitivnost induktivnog potrošača reda 10 nF [13]. Kod vakuumskih prekidača vrednost sečene struje zavisi od kontaktnog materijala i obično se kreće u intervalu 2-10 A, a kod vakuumskih kontaktora vrednosti sečene struje su ispod 2 A.

Sečenje struje uzrokuje pojavu intenzivnog prelaznog procesa na strani induktivnog potrošača koji može da se manifestuje visokim prenaponima. Maksimalni prenapon koji pritom nastaje na jednofaznom induktivnom potrošaču može se dobiti iz izraza [13]:

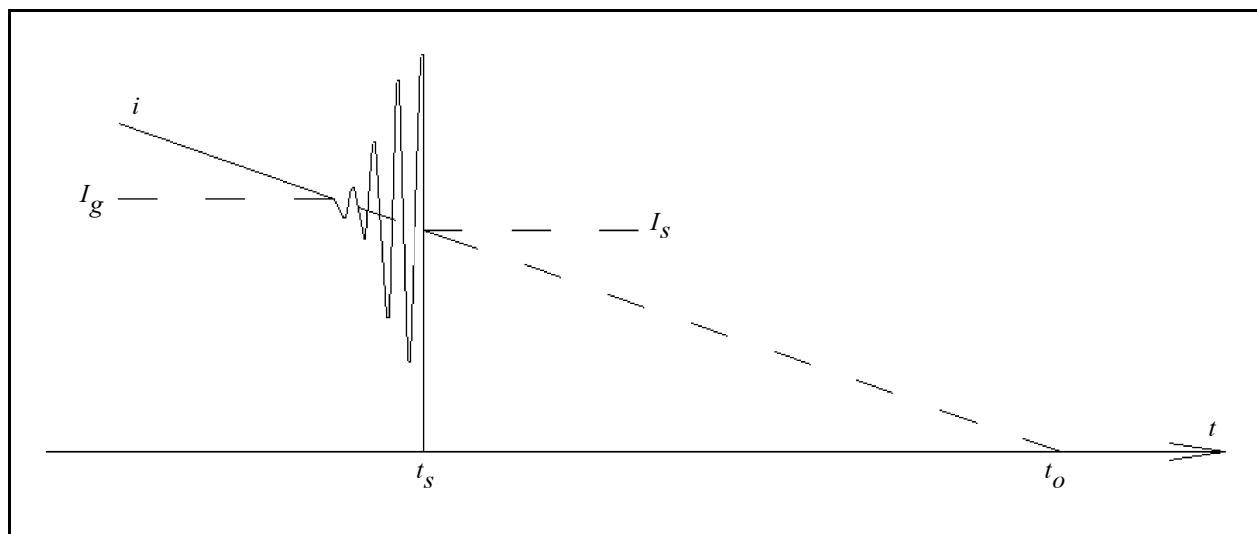
$$U_{max} = \sqrt{U_s^2 + \frac{L_p}{C_p} I_s^2 h} \quad (2)$$

( $U_s$  - trenutna vrednost napona na kapacitivnosti  $C_p$  induktivnog potrošača u trenutku sečenja struje,  $I_s$  - vrednost sečene struje;  $L_p$  - induktivnost potrošača;  $h$  - koeficijent gubitaka koji se za neopterećene transformatore nalazi u intervalu 0,3-0,5, a za neopterećene motore je blizak jedinici).

Učestanost oscilatornog procesa koji se javlja na strani potrošača je:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad (3)$$

i veća je od učestanosti izvora.



Slika 1. Proces sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu

Između kontakta prekidača se uspostavlja prelazni povratni napon učestanosti  $f_p$ , znatne maksimalne vrednosti i može da izazove ponovno uspostavljanje električnog luka između kontakta prekidača probojem međukontaktne razmaka.

Karakteristična pojava pri prekidanju malih induktivnih struja je višestruko ponovno paljenje električnog luka između kontakta prekidača. Ova pojava je svojstvena prekidačima koji mogu da prekidaju struju za vreme dok traje njena visokofrekventna komponenta uslovljena prethodnim ponovnim paljenjem električnog luka. Pritom, mogu da se pojave visoki prenaponi na induktivnom potrošaču. Pošto se kontakti prekidača razmiču, svako naredno ponovno paljenje električnog luka je moguće samo pojavom sve većeg prelaznog povratnog napona, jer raste i dielektrična izdržljivost međukontaktne razmaka. Tako se može dogoditi da napon na induktivnom potrošaču pri svakom sledećem ponovnom paljenju luka postaje sve viši. Ova pojava se naziva eskalacijom napona i izaziva veoma velika naprezanja izolacije induktivnog potrošača.

### 3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA PRENAPONA PRI ISKLJUČENJU INDUKTIVNOG OPTEREĆENJA

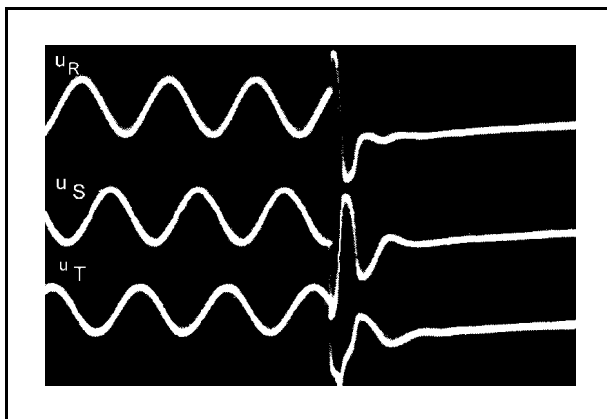
U toku eksperimentalnih istraživanja sklopnih prenapona u mrežama napona od 5,25 kV do 400 kV izvršen je veliki broj operacija sklopnih aparata sa kojima je isključivano induktivno opterećenje. Isključivani su: reaktori, neopterećeni transformatori (autotransformatori) i visokonaponski motori, autotransformatori sa reaktorom i transformatori (autotransformatori) opterećeni induktivnim potrošačima. Sklopni aparati sa kojima su vršena isključenja su: malouljni, pneumatski, SF<sub>6</sub>, sa magnetnim odvajanjem luka i vakuumski. Pri isključenjima su snimani prelazni fazni naponi na strani potrošača, a u pojedinim konfiguracijama i prelazni međufazni naponi na strani potrošača, prelazni fazni naponi na strani mreže i prelazni naponi na kontaktima prekidača. Snimanja prelaznih napona su izvršena digitalnim i analognim osciloskopima, koristeći kapacitivne naponske merne sisteme, koji verno prenose pojave od nekoliko Hz do 1 MHz. Takođe su osciloskopima snimane i prelazne struje. Međutim, snimanja struja su vršena preko strujnih mernih sistema na bazi postojećih strujnih transformatora u istraživanim konfiguracijama mreže. Vernost reprodukcije ovih transformatora je prihvatljiva samo do nekoliko kHz. Sa ovakvim strujnim mernim sistemima nije bilo moguće ustanoviti nivo sečenih struja pri isključenju prekidača.

### 3.1. Isključenja neopterećenih transformatora (autotransformatora)

Izvršen je veliki broj isključenja neopterećenih transformatora i autotransformatora u 16 različitih konfiguracija [2, 4, 5, 8, 10, 11, 15]. Određen broj isključenja je izvršen nekoliko desetina do nekoliko stotina milisekundi posle njihovog uključenja, dok još traje prelazni proces nastao pri uključenju. U tabeli 1 su dati za sve konfiguracije osnovni podaci o transformatoru, odnosno autotransformatoru koji se isključuje, sa kojim prekidačem se isključuje, broj izvedenih operacija isključenja prekidača i maksimalne vrednosti faznih prenapona koje su snimljene na izolaciji namotaja visokog napona transformatora, odnosno autotransformatora. Analiza rezultata istraživanja ukazala je na sledeće:

- U određenom broju istraživanih konfiguracija, dolazilo je pri pojedinim isključenjima prekidača do sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu, a time i do pojave prenapona na izolaciji namotaja transformatora.
- Visina prenapona zavisi od vrste i tipa prekidača i od istraživane konfiguracije.
- Viši prenaponi se javljaju na izolaciji transformatora u mrežama nižih naponskih nivoa.
- Izrazito visoki prenaponi se javljaju pri isključenjima transformatora (autotransformatora) neposredno posle njihovog uključenja (konfiguracije 1K5\*, 1K14\* i 1K15\*) kada verovatno nastupa sečenje pri većim vrednostima struje.

Primeru radi, na slici 2 dati su prelazni fazni naponi na 10 kV priključcima neopterećenog transformatora 10 kV/0,4 kV pri njegovom isključenju koje je usledilo neposredno posle uključenja.



Slika 2. Prelazni fazni naponi  $u_R$ ,  $u_S$  i  $u_T$  na 10 kV priključcima neopterećenog transformatora 10 kV/0,4 kV pri njegovom isključenju vakuumskim prekidačem 12 kV koje je usledilo 680 ms posle uključenja

Prenaponi pri isključenju neopterećenih transformatora i autotransformatora

Konfiguracija	Neopterećeni transformator (autotransformator)	Prekidač koji isključuje	Broj isključenja prekidača (n)	Maksimalna izmerena vrednost faznih prenapona na namotajima visokog napona transformatora $U_{max}$ (p.u.)
1K1	400 kV/231 kV/31,5 kV 400 MVA	420 kV; malouljni	21	1,09
1K2	400 kV/115 kV/31,5 kV 300 MVA	420 kV; malouljni	22	1,00
1K3	400 kV/115 kV/31,5 kV 300 MVA	420 kV; pneumatski	18	1,00
1K4	400 kV/115 kV/36 kV 300 MVA	420 kV; SF <sub>6</sub>	19	1,21
1K5*	400 kV/231 kV/31,5 kV 400 MVA	420 kV; pneumatski	11	2,30
1K6	400 kV/15,75 kV/15,75 kV 400 MVA	420 kV; malouljni	10	1,68
1K7	400 kV/231 kV/31,5 kV 400 MVA	245 kV; malouljni	11	1,07
1K8	230 kV/115 kV/10,5 kV 150 MVA	245 kV; malouljni	5	1,15
1K9	235 kV/15,75 kV 240 MVA	245 kV; malouljni	5	1,20
1K10	110 kV/10,5 kV 40 MVA	123 kV; SF <sub>6</sub>	26	1,40
1K11	230 kV/115 kV/10,5 kV 150 MVA	123 kV; malouljni	5	1,40
1K12	110 kV/20 kV 40 MVA	123 kV; pneumatski	5	1,30
1K13	110 kV/11 kV/10 kV 60 MVA	123 kV; malouljni	7	1,35
1K14	10 kV/0,4 kV 630 kVA	12 kV; malouljni	7	2,20
1K14*	10 kV/0,4 kV 630 kVA	12 kV; malouljni	9	2,95
1K15	10 kV/0,4 kV 630 kVA	12 kV; vakuumski	11	2,15
1K15*	10 kV/0,4 kV 630 kVA	12 kV; vakuumski	14	4,35
1K16	6 kV/0,4 kV 1 MVA	7,2 kV; malouljni	15	1,35

\* Isključenja neopterećenih transformatora (autotransformatora) nekoliko desetina do nekoliko stotina milisekundi posle njihovog uključenja.

### 3.2 Isključenja transformatora (autotransformatora) opterećenih induktivnim potrošačima

U 7 konfiguracija izvršen je znatan broj isključenja transformatora, odnosno autotransformatora

opterećenih induktivnim potrošačima [1, 2, 3, 4, 6, 14, 15]. U tabeli 2 su dati, za sve konfiguracije, osnovni podaci o transformatoru (autotransformatoru) koji se isključuje: sa kojim prekidačem se isključuje, broj izvedenih operacija isključenja prekidača

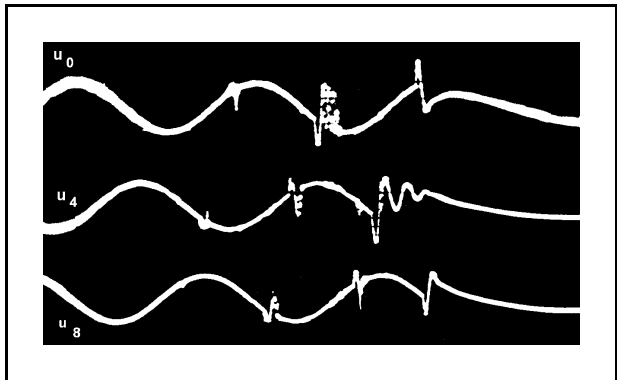
i maksimalne vrednosti faznih prenapona koje su snimljene na izolaciji namotaja visokog napona transformatora, odnosno autotransformatora. U konfiguracijama 2K1 i 2K2 blok transformatori su bili opterećeni transformatorima sopstvene potrošnje, u konfiguracijama 2K6 i 2K7 autotransformator 400 kV/115 kV/31,5 kV je bio opterećen reaktorom 50 Mvar, a u konfiguracijama 2K3, 2K4 i 2K5 transformatori su bili opterećeni specijalnim induktivnim potrošačima koji se sreću u aluminijumskim kombinatima i željazarama. Na osnovu analize rezultata istraživanja konstatovano je sledeće:

– U 5 istraživanih konfiguracija (2K3, 2K4, 2K5, 2K6 i 2K7) u većini operacija isključenja prekidača dolazilo je do sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu, što se manifestovalo znatnim prenaponima. Uočena su i višestruka ponovna paljenja električnog luka između kontakta prekidača (2K3).

– U konfiguracijama (2K1, 2K2), u kojima su isključivani opterećeni blok transformatori, nije bilo sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu, pa nije ni bilo prenapona, ili su bili neznatni.

Primeru radi, na slici 3 dati su prelazni fazni naponi na 110 kV priključcima transformatora

110 kV/11 kV/10 kV opterećenog induktivnim potrošačima na 11 kV strani pri njegovom isključenju.



Slika 3. Prelazni fazni naponi  $u_0$ ,  $u_4$  i  $u_8$  na 110 kV priključcima transformatora 110 kV/11 kV/10 kV pri njegovom isključenju malouljnim prekidačem 123 kV kada je opterećen induktivnim potrošačima na 11 kV strani

### 3.3 Isključenja reaktora

Istraživanja prelaznih faznih napona pri isključenju reaktora su izvršena u dve konfiguracije [2, 5].

Tabela 2.

Prenaponi pri isključenju transformatora (autotransformatora) opterećenih induktivnim potrošačima

Konfiguracija	Transformator (autotransformator) opterećen induktivnim potrošačem	Prekidač koji isključuje	Broj isključenja prekidača (n)	Maksimalna izmerena vrednost faznih prenapona na namotajima visokog napona transformatora $U_{max}$ (p.u.)
2K1	400 kV/24 kV, 400 MVA sa transformatorom sopstvene potrošnje 24 kV/6,3 kV	420 kV; malouljni	19	1,00
2K2	235 kV/15,75 kV, 240 MVA sa transformatorom sopstvene potrošnje 15,75 kV/6,3 kV	245 kV; malouljni	5	1,20
2K3	110 kV/11 kV/10 kV, 60 MVA sa induktivnim potrošačima na 11 kV	123 kV; malouljni	11	2,80
2K4	35 kV/22,5 kV/12,5 kV, 36 MVA sa induktivnim potrošačima na 12,5 kV	38 kV; malouljni	74	1,90
2K5	110 kV/20 kV, 40 MVA sa induktivnim potrošačima na 20 kV	123 kV; pneumatski	9	3,70
2K6	400 kV/115 kV/31,5 kV sa reaktorom 50 Mvar na 31,5 kV	420 kV; malouljni	11	2,10
2K7	400 kV/115 kV/31,5 kV sa reaktorom 50 Mvar na 31,5 kV	123 kV; malouljni	10	1,69

Prenaponi pri isključenju reaktora

Konfiguracija	Reaktor na 31,5 kV strani autotransformatora 400 kV/115 kV/31,5 kV 300 MVA	Prekidač koji isključuje	Broj isključenja prekidača (n)	Maksimalna izmerena vrednost faznih prenapona na priključcima reaktora $U_{max}$ (p.u.)
3K1	50 Mvar	36 kV, vakuumski	38	2,70
3K2	50 Mvar	38 kV, malouljni	17	2,25

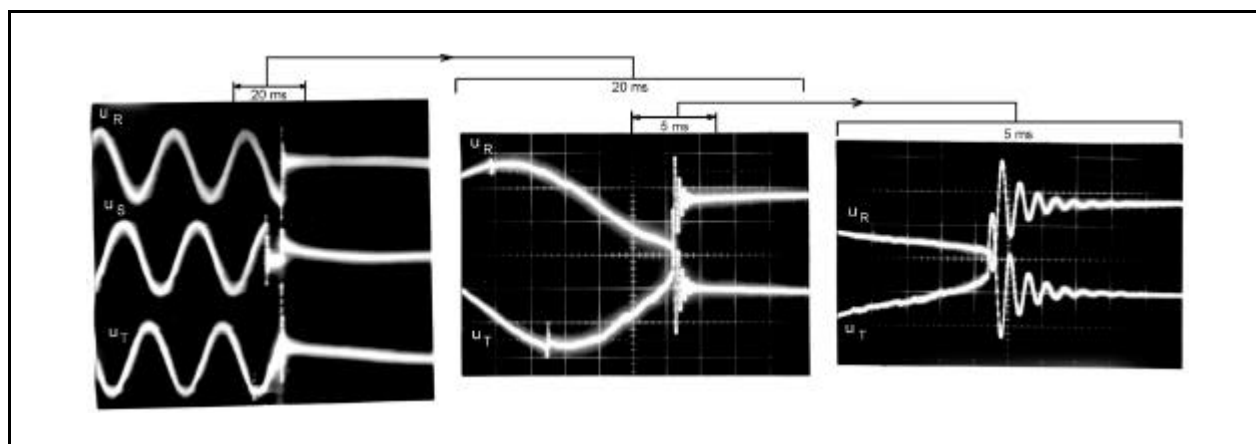
Reaktor 50 Mvar je isključivan na 31,5 kV strani autotransformatora 400 kV/115 kV/31,5 kV, 300 MVA u jednom slučaju vakuumskim, a u drugom slučaju malouljnim prekidačem. U oba slučaja u većini operacija isključenja dolazilo je do sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu. Najviši izmereni prenapon pri isključenju malouljnog prekidača je 2,25 p.u., a pri isključenju vakuumskog prekidača 2,70 p.u. (tabela 3). Pri isključenju vakuumskog prekidača javljala su se višestruka ponovna paljenja električnog luka, pa time i viši prenaponi.

### 3.4 Isključenja neopterećenih ili slabo opterećenih visokonaponskih motora

Izvršen je veliki broj istraživanja prelaznih faznih napona pri isključenjima neopterećenih i slabo opterećenih visokonaponskih motora u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom [7, 9, 12]. To su uglavnom mreže 6 kV fabrika, površinskih kopova, sopstvene potrošnje termoelektrana itd. Istraživanja su izvršena na 41 motoru i izvršeno je 437 operacija isključenja sklopnih aparata. Snaga visokonaponskih motora je od 160 kW do 6 500 kW. Sklopni aparati sa kojima su isključivani motori su maloulj-

ni prekidači, prekidači i kontaktori sa magnetnim oduvavanjem luka, kao i vakuumski prekidači i kontaktori. U tabeli 4 dati su osnovni podaci o visokonaponskim motorima, zatim o tome sa kojim sklopnim aparatima su isključivani, o broju izvedenih operacija isključenja sklopnih aparata i maksimalnim vrednostima faznih prenapona na ulazu u kablovske odvođe motora. Isključenja motora su vršena i u toku njihovog zaleta, odnosno nekoliko desetina milisekundi do nekoliko sekundi posle njihovog uključenja sklopnim aparatom. Analiza rezultata istraživanja ukazala je na sledeće:

- U toku većeg broja operacija isključenja sklopnih aparata dolazilo je do pojave sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu, pa time i do pojave prenapona.
- Visina prenapona zavisi od vrste i tipa sklopnog aparata, ali i od karakteristika motora i mreže u kojoj se motor nalazi.
- Visoki prenaponi se javljaju pri isključenju motora u zaletu. Pretpostavlja se da je razlog sečenje struje pri većim vrednostima.
- Viši od ostalih su prenaponi koji se javljaju pri isključenju motora starim tipovima malouljnih prekidača.



Slika 4. Prelazni fazni naponi  $u_R$ ,  $u_S$  i  $u_T$  na ulazu u kablovski odvod 6 kV motora 500 kW pri njegovom isključenju malouljnim prekidačem koje je usledilo 470 ms posle uključenja



Prenaponi pri isključenju neopterećenih ili slabo opterećenih visokonaponskih motora

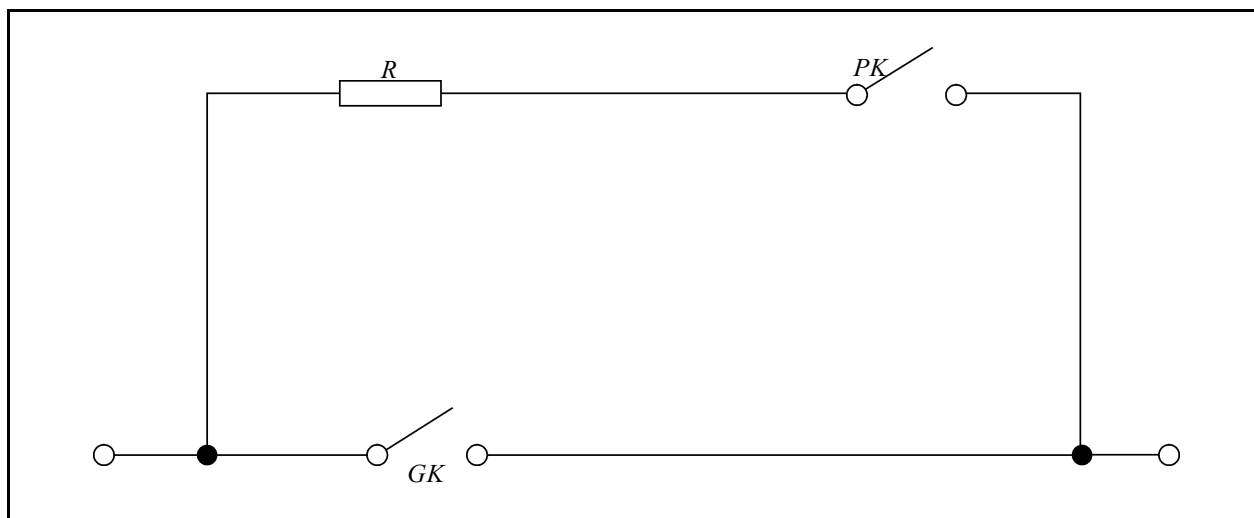
Broj ispitivanih 6 kV motora	Snaga motora (kW)	Sklopni aparat koji isključuje motor	Maksimalna vrednost faznih prenapona ( $U_{max}$ ) na ulazu u kablovski odvod motora i broj sklopnih operacija (n)			
			Isključenja neopterećenih i slabo opterećenih motora		Isključenja motora u zaletu	
			(n)	$U_{max}$ (p.u.)	(n)	$U_{max}$ (p.u.)
23	160-6 500	12 kV; malouljni	87	1,00-2,60	93	1,48-4,65
5	200-500	7,2 kV; kontaktor sa magnetnim oduvanjem luka	29	1,00	18	1,60-2,20
3	630-2 350	7,2 kV; prekidač sa magnetnim oduvanjem luka	28	1,00	16	1,55-2,50
1	2 000	12 kV; vakuumski prekidač	14	1,40	8	1,75
9	260-1 260	7,2 kV; vakuumski kontaktor	104	1,00-1,45	40	1,00-1,85

Primera radi, na slici 4 dati su prelazni fazni naponi na ulazu u kablovski odvod 6 kV motora 500 kW pri njegovom isključenju, koje je usledilo neposredno posle uključenja.

#### 4. MERE I SREDSTVA ZA OGRANIČENJE PRENAPONA PRI PREKIDANJU MALIH INDUKTIVNIH STRUJA

Prenaponi pri prekidanju malih induktivnih struja se praktično ne mogu izbeći, ali se može uticati na njihovu visinu, strminu i učestanost. Osnovna mera za njihovo sniženje je izbor kvalitetnih

sklopnih aparata, to jest onih kod kojih pri isključenju nema pojave sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu ili je nivo sečne struje mali. Za prekidanje malih induktivnih struja pogodni su prekidači kod kojih su u svakoj fazi, paralelno sa glavnim kontaktom (GK), priključeni na red otpornik (R) i pomoćni kontakt (PK) (slika 5). Vrednost otpornosti otpornika je od nekoliko  $\Omega$  do nekoliko desetina  $k\Omega$ , u zavisnosti od toga kolike struje prekidač prekida i koliko je potrebno prigušenje prenapona. Prvo se isključuju glavni kontakti, struja u kolu koje se isključuje se smanjuje zbog prisustva otpornosti R i onda se isključuju pomoćni kontakti preki-



Slika 5. Jedan pol prekidača za prekidanje malih induktivnih struja

dajući malu struju. Umesto otpornika i pomoćnih kontakata, mogu se koristiti nelinearni otpornici ili metaloksidni odvodnici prenapona priključeni takođe paralelno sa glavnim kontaktima prekidača.

Mera za smanjenje naprezanja izolacije, ako je izvodljivo, je izbegavanje namernih isključenja u konfiguracijama u kojima se prekida mala induktivna struja. To se odnosi na konfiguracije u kojima se isključuju transformatori i autotransformatori, zajedno sa induktivnim potrošačima kao što su reaktori, potrošači u željezarama, aluminijumskim kombinatima i slično.

Odvodnici prenapona su efikasno sredstvo za ograničenje prenapona koji nastaju pri prekidanju malih induktivnih struja. Moraju biti predviđeni za odvođenje energije sklopnog talasa. Potrebno je da se postave između svih priključaka transformatora i autotransformatora i zemlje, a ako je potrebno i na priključke reaktora i visokonaponskih motora. Znatno efikasnija zaštita se postiže metaloksidnim odvodnicima prenapona, osim u mrežama sa izolovanim neutralnom tačkom u kojima zaštita ne isključuje zemljospoj, već ga samo signalise.

Kao sredstvo za ograničenje prenapona mogu da posluže i kondenzatori. Oni efikasno smanjuju strmine prenapona, a kada se radi o prenaponima značajnih strmina snižavaju i njihovu amplitudu. Postavljaju se između priključaka reaktora i zemlje, kao i između priključaka visokonaponskih motora i zemlje. Ovakav vid zaštite je posebno efikasan za zaštitu međuzavojne izolacije namotaja statora motora kada je naprežu veoma strmi prenaponi (generiše ih vrlo često rad vakuumskih sklopnih aparata). Međutim, mora se imati u vidu da prisustvo kondenzatora povećava struju zemljospoja u mrežama sa izolovanim neutralnom tačkom.

Za ograničenje prenapona na izolaciji namotaja statora visokonaponskih motora mogu se, pored odvodnika prenapona i kondenzatora, koristiti RC kola (obično  $100 \Omega$ ,  $0,1-0,2 \mu\text{F}$ ) postavljena između priključaka visokonaponskih motora i zemlje ili na ulazu u kablovske odvođe motora u sklopu prekidača.

U mrežama sa visokonaponskim motorima, kada se pri radu sklopnih aparata očekuju visoki i istovremeno veoma strmi prenaponi, za ograničenje prenapona se, između priključaka visokonaponskih motora i zemlje u paralelnoj vezi postavljaju odvodnici prenapona i kondenzatori.

## 5. ZAKLJUČCI

*Na osnovu analize rezultata eksperimentalnih istraživanja prenapona pri prekidanju malih induktivnih struja, u istraživanim konfiguracijama elektroenergetskog sistema Jugoslavije može se zaključiti sledeće:*

*– Prekidanja malih induktivnih struja mogu da dovedu do znatnih prenapona. Visina prenapona bitno zavisi od karakteristika sklopnog aparata, ali i od konfiguracije mreže i karakteristika induktivnog potrošača (transformator, motor, reaktor). Viši prenaponi se javljaju u mrežama nižih naponskih nivoa.*

*– Transformatori i autotransformatori su u većini istraživanih konfiguracija efikasno zaštićeni odvodnicima prenapona. U konfiguracijama gde se javljaju visoki sklopni prenaponi, a odvodnici nisu predviđeni za odvođenje energije sklopnog talasa, iste treba zameniti odgovarajućim.*

*– Ako se u mreži budu koristili reaktori na tercijerima autotransformatora, bilo bi poželjno štititi njihovu izolaciju od prenapona odvodnicima prenapona predviđenim za ograničenje sklopnih prenapona, postavljenim između priključaka reaktora i zemlje.*

*– Izolaciju prema masi namotaja statora visokonaponskih motora, koji se često uključuju i isključuju starijim tipovima malouljnih prekidača i imaju ispade u zaletu motora, poželjno je štititi od prenapona odvodnicima prenapona, postavljenim između faze i zemlje. Odvodnici prenapona treba da budu predviđeni za odvođenje energije sklopnog talasa. Potrebno ih je postaviti na ulaz kablovskog odvođa motora, ili još bolje, ako je izvodljivo, na priključke motora.*

## 6. LITERATURA

- [1] M. Petković i drugi, MERENJE KOMUTACIONIH PRENAPONA U RAZVODNOM POSTROJENJU ELEKTROLIZE 110 kV/35 kV/1 000 V KOMBINATA ALUMINIJUMA TITOGRAĐ, Izveštaj br. 37 369, Institut „N. Tesla”, Beograd 1973, str. 102.
- [2] P. Vukelja i drugi, ISTRAŽIVANJE KOMUTACIONIH PRENAPONA PRI STAVLJANJU POD NAPON DALEKOVODA 400 kV NIŠ-KRAGUJEVAC, Izveštaj br. 379 V1, Institut „N. Tesla”, Beograd 1979, str. 90.
- [3] Z. Zdravković, P. Vukelja i drugi, NAPONI I STRUJE U PRELAZNYM REŽIMIMA RADA TRANSFORMATORA 400 kV/231 kV/31,5 kV TS 400 kV/220 kV - KOSOVO B, Izveštaj br. 383 V33, Institut „N. Tesla”, Beograd 1983, str. 35.
- [4] Z. Zdravković, P. Vukelja, M. Vučinić, R. Naumov, S. Stevanović, D. Filipović, N. Jokanović, SKLOPNI PRENAPONI U MREŽI 400 kV JUGOSLAVIJE, XI savetovanje o prenosu električne energije u SFRJ, Dubrovnik, 16-18. mart 1988, ref. IV-4, str. 14.
- [5] P. Vukelja, A. Sekso i drugi, SKLOPNI PRENAPONI U TS 400 kV/110 kV „ERNESTINOVO” I NA DALEKOVODU 400 kV ERNESTINOVO-MLADOST, Izveštaj br. 328 618, Institut „N. Tesla”, Beograd, 1986, str. 195.

- [6] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, D. Hrvić, ISTRAŽIVANJE SKLOPNIH PRENAPONA U TS 110 kV/35 kV/1 000 V KOMBINATA ALUMINIJUMA TITOGRAĐ, Izveštaj br. 328 807, Institut „N. Tesla”, Beograd 1988, str. 76.
- [7] P. Vukelja, M. Savić i drugi, PRENAPONI NA RAZVODIMA SREDNJEG NAPONA ZA SOPSTVENE POTREBE TERMOELEKTRANA, POSEBNO NA VISOKONAPONSKIM MOTORIMA PRI RADU PREKIDAČA, I faza, Studija br. 329 002, Institut „N. Tesla”, Beograd 1992, str. 196.
- [8] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, S. Rafailović, L. Radić, ISTRAŽIVANJE PRENAPONA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI 10 kV PRI SKLOPNIM OPERACIJAMA MALOULJNOG I VAKUUMSKOG PREKIDAČA, „Elektrodistribucija”, br. 2, Beograd 1992, str. 87-96.
- [9] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, P. Budišin, PRENAPONI NA IZOLACIJI VISOKONAPONSKIH MOTORA PRI SKLOPNIM OPERACIJAMA, „Elektroprivreda”, br.7-9, Beograd 1992, 391-404.
- [10] Z. Zdravković, P. Vukelja, SWITCHING OVERVOLTAGES AND RISK OF FLASHOVER ON YUGOSLAV 400 kV TRANSMISSION LINES, IEEE Proceedings part - C, Vol.139, No.2, March 1992, pp.141-151.
- [11] P. Vukelja, G. Drobnjak, J. Mrvić, I. Žnidaršić, ISTRAŽIVANJE PRENAPONA PRI UKLJUČENJU I ISKLJUČENJU TRANSFORMATORA 6/0,4 kV U RAZVODU 6 kV TENT-A, Izveštaj br. 319 404, Institut „N.Tesla”, Beograd 1994, str.24.
- [12] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, P. Budišin, EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HIGH VOLTAGE MOTOR SWITCHING SURGES, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.142, No.3, May 1995, pp.233-239.
- [13] Working Group 13.02, INTERRUPTION OF SMALL INDUCTIVE CURRENTS, CIGRE, December 1995, p.231.
- [14] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF OVERVOLTAGES IN „STIKALIŠČE” 110 kV/10 kV TRANSFORMER STATION, 4. konferencija slovenskih elektroenergetikov, Rogaška Slatina, maj 1999, p.7.
- [15] Z. Zdravković, P. Vukelja, R. Naumov, OVERVOLTAGES DURING SWITCHING OF 400 kV, 220 kV AND 110 kV CIRCUIT-BREAKERS IN HIGH VOLTAGE NETWORKS, IPST'99 - International Conference on Power Systems Transients, Budapest, June 20-24, 1999, p.p. 179-184.

---

Rad je primljen u uredništvo 04. 03. 2002. godine

---

Vladimir Strezoski,  
Nenad Katić, Dušan Janjić

# Regulacija napona kao integralni deo distributivnog menadžment sistema

Originalni naučni rad  
UDK: 66; 621.315.615

---

## Rezime:

U ovom radu regulacija napona distributivnih mreža tretirana je kao centralizovana analitička funkcija distributivnog menadžment sistema. Od regulacionih resursa uvažene su obe vrste transformatora - transformatori sa regulacijom pod opterećenjem i transformatori s regulacijom u beznaponskom stanju. Problem regulacije napona dekomponovan je u prostoru i vremenu na osnovu prostiranja regulacionih efekata po dubini distributivne mreže, kao i na osnovu brzine regulacije. Prostorna dekompozicija omogućava rešavanje problema regulacije pojedinačno po napojnim transformatorima, dok vremenska dekompozicija omogućava rešavanje dva nezavisna potproblema - regulacija napona kao deo planiranja pogona i regulacija napona u realnom vremenu. U svakom slučaju, regulacija napona je postavljena kao optimizacioni problem sa ograničenjima. Globalni naponski profil mreže kvantifikovan je preko štete koju trpe električni aparati, pa tako i potrošači na svim naponskim nivoima usled stacionarnih odstupanja napona od odgovarajućih referentnih vrednosti. Opisana šteta je uzeta kao optimizacioni kriterijum problema regulacije napona. Efikasnost takve regulacije napona demonstrirana je na primeru distributivne mreže u Vojvodini.

**Ključne reči:** distributivna mreža, distributivni menadžment sistem, regulacija napona, regulacioni transformatori, gubici

---

## Abstract:

### VOLTAGE CONTROL INTEGRATED IN DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEM

The voltage control in distribution networks is established as a centralized analytical function in this paper. It is integrated in the Distribution Management System. Control devices consist of under-load and off-voltage tap changing transformers. On the basis of areas whose voltages are influenced by these control devices and their action speeds, the voltage control problem is decomposed in space and time. The space decomposition enables a solution of the distribution voltage control problem for medium voltage network of each supply transformer separately. The time decomposition enables a solution in the operation planning mode and the real time mode separately. The voltage control is each time stated as a constrained optimization problem. The network voltage profile quality is quantified by the damage (inconvenience) that electric consumers sustain due to steady state voltage deviations. Therefore, this damage is used as the optimization objective. The effectiveness of the voltage control is demonstrated on a real-life distribution network.

**Key words:** distribution network, distribution management system, voltage control, tap changing transformers, power loss

---

Ovaj rad je u nešto širem obimu objavljen pod naslovom: „Voltage control integrated in distribution management system”, u američkom časopisu Electric Power Systems Research, Vol. 60 (2001), pp. 85-97. ([www.elsevier.com/locate/epsr](http://www.elsevier.com/locate/epsr)).

Prof. dr Vladimir C. Strezoski – Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 21000 Novi Sad, Fruškogorska 11, e: [streza@eunet.yu](mailto:streza@eunet.yu)  
Dr Nenad Katić, – „EPS” JP „Elektrovojvodina” 21000 Novi Sad, Bulevar Oslobođenja 100, e: [katicn@nspoint.net](mailto:katicn@nspoint.net)  
Dušan S. Janjić, „EPS” JP „Elektrodistribucija” 23000 Zrenjanin, Pančevački put 46, e: [dusan.janji@zr.ev.co.yu](mailto:dusan.janji@zr.ev.co.yu)

## 1. UVOD

Svrha i značaj automatizacije distributivnih mreža utvrđeni su još pre dvadeset godina [1]. Osnovnoj ekonomskoj motivaciji za automatizaciju distribucije, pridruženo je i racionalnije iskorišćavanje postojeće opreme i odlaganje investicija u novu opremu distributivnih mreža (DM). Današnja privatizacija elektroprivrede i otvoreno tržište električne energije, kao svetski procesi, podstiču distributivna preduzeća i preduzeća za prodaju električne energije na malo, da distribuiraju i prodaju što više električne energije što boljeg kvaliteta, a da pri tome smanje troškove njene nabavke i isporuke. Iz ovoga proističe nova motivacija za dalje unapređenje automatizacije distributivnih mreža. Prvo takvo unapređenje su SCADA sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition System).

Distributivni menadžment sistemi (DMS) predstavljaju vrlo sofisticirano unapređenje automatizacije distributivnih mreža. DMS se sastoji od SCADA sistema, distributivne baze podataka (sa uključenim grafičkim okruženjem) i sistema energetske funkcije za analizu, upravljanje, planiranje pogona i planiranje razvoja distributivnih mreža [2,3]. Jedan takav DMS se upravo utvrđuje u „EPS” JP „Elektrovovodina”. U tu svrhu, razvijen je sistem od deset energetske funkcije [4,5]: *Proračun tokova snaga*, *Estimacija stanja*, *Proračun pouzdanosti*, *Restauracija napajanja*, *Restauracija širokih područja*, *Rekonfiguracija pod opterećenjem*, *Optimalna rekonfiguracija*, *Proračun kratkih spojeva*, *Relejna zaštita i Regulacija napona*. Funkcije su integrisane nad istom bazom podataka i istim matematičkim modelom DM. *Proračun tokova snaga* je utvrđen korišćenjem već klasične procedure [6]. *Estimacija stanja* je bazična funkcija realnog vremena [4]. Procedura na kojoj se ta funkcija zasniva iskorišćena je i za procenu prognoziranih stanja u modu planiranja pogona DM („off-line estimacija stanja”). *Proračun pouzdanosti* je funkcija koja se koristi za procenu pouzdanosti različitih konfiguracija DM. *Restauracija napajanja*, *Restauracija širokih područja* i *Rekonfiguracija pod opterećenjem* se primenjuju u modu kratkoročnog planiranja pogona (na satnom nivou). *Optimalna rekonfiguracija* je vrlo važna analitička funkcija za planiranje pogona DM na sezonskom nivou. Kriterijumska funkcija odgovarajuće optimizacione procedure su gubici aktivne snage. *Proračun kratkih spojeva* i *Relejna zaštita* su analitičke funkcije za izbor podešenja i koordinacije relejne zaštite. Konačno, *Regulacija napona* je razvijena kao optimizaciona procedura sa ograničenjima.

Regulacija napona je razmotrena u okviru globalnog problema regulacije napona, reaktivnih sna-

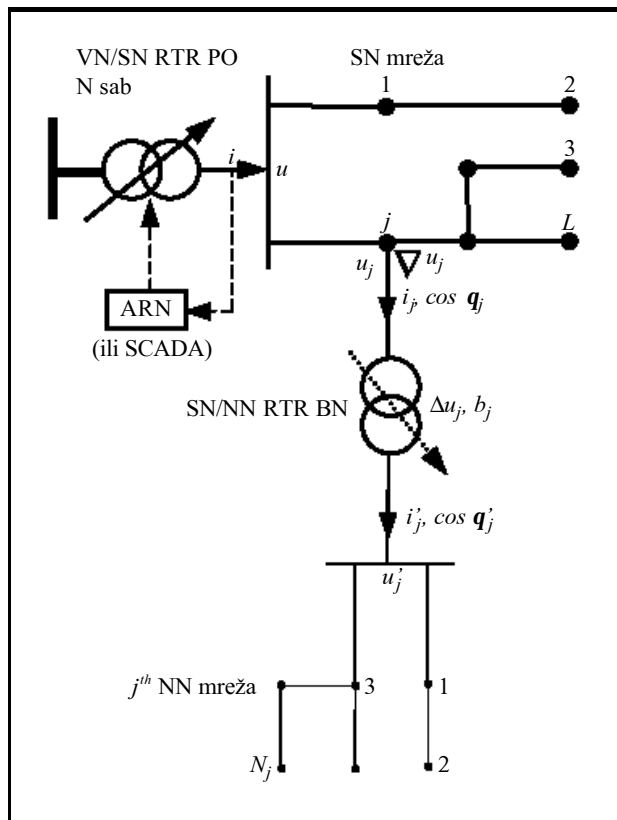
ga i gubitaka aktivne snage, centralizovanih u dispečerskom centru DM [7]. Potreba za centralizacijom funkcije regulacije napona je posebno naglašena u [8,9]. Tamo su korišćena četiri optimizaciona kriterijuma: (I) gubici aktivne snage, (II) ukupna potrošnja aktivne snage DM, (III) broj komandi regulacionim uređajima radi održavanja stanja DM u okvirima tehničkih ograničenja i (IV) prihod distributivnog preduzeća. Gubici energije i vršna snaga su uvedeni kao optimizacioni kriterijumi u [10]. U toj referenci je pokazano da se problemi optimalne regulacije napona transformatorima i regulacije kondenzatorima mogu deкупlovano rešavati. U referenci [11] problem centralizovane regulacije napona i reaktivnih snaga je deкупlovano na tri potproblema: „spora”, „srednje brza” i „brza regulacija”, a za kriterijum optimizacije uzeti su gubici aktivne snage.

Svi napred opisani postupci za regulaciju napona su optimizacione procedure sa naponskim i strujnim ograničenjima. Kada se naponi DM nađu unutar naponskih ograničenja, problem regulacije napona se smatra rešenim.

Princip  $\%^2$  kWh predložen je kao mnogo sofisticiraniji kriterijum za procenu kvaliteta stacionarnih napona DM, nego napred pomenuto održavanje napona unutar tehničkih granica. On je prvo primenjen u studijama planiranja [12]. Taj princip se odnosi na štetu koju potrošači trpe kada im se električna energija isporučuje s naponima koji odstupaju od referentnih vrednosti. Princip  $\%^2$  kWh bio je inkorporiran u problem regulacije napona DM u [5,13,14], a takođe je ključna ideja u ovom članku.

Predložena ideja za regulaciju napona DM prikazana je u drugoj glavi. Dva osnovna aspekta regulacije napona su (I) prostorno-vremenska dekompozicija problema regulacije napona (glava 3) i (II) kvantifikacija kvaliteta napona DM u terminima štete koju potrošači trpe usled odstupanja napona (glava 4). Regulacija napona se sastoji od dve optimizacione procedure sa ograničenjima - prva je za mod planiranja pogona i druga za mod realnog vremena (glava 5). U modu planiranja pogona, problem regulacije napona je postavljen u vidu nove optimizacione procedure zasnovane na rezultatima dobijenim primenom funkcije *Optimalna rekonfiguracija*. Optimizacioni problem se rešava po naponskim podrškama (regulacionim otečepima) „malih” transformatora sa regulacijom u beznaponskom stanju. Rezultati ove procedure uključuju i optimalno podešenje automatskih regulatora napona (ARN) napojnih transformatora u DM u kojima se regulacija napona u realnom vremenu vrši na klasičan način (primenom ARN). Za DM u kojima je primenjen DMS, razvijena je nova procedura za regulaciju napona u realnom vremenu. U ovom slučaju, procedura je za-

snovana na rezultatima primene *Estimacije stanja* u realnom vremenu. Moduli napona sekundara napojnih transformatora su upravljačke varijable takve regulacije. U DM u kojima je primenjen DMS, tom regulacijom se mogu potisnuti ARN. Predložena regulacija napona je verifikovana u glavi 6. Glava 7 sadrži zaključke, a glava 8 tri priloga. U glavi 9 data je literatura.



Slika 1. Radijalna distributivna mreža

## 2. RADIJALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

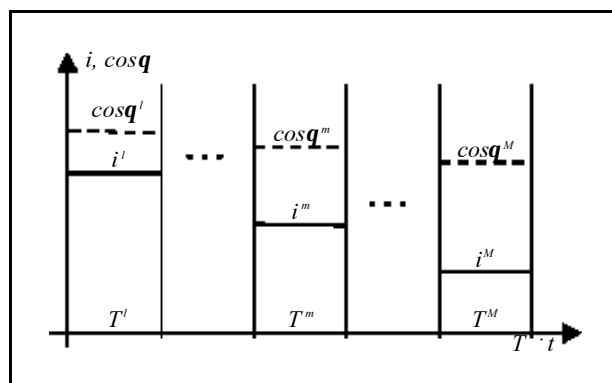
Razmatra se radijalna distributivna mreža prikazana na slici 1. Ona se sastoji od visokonaponskog (VN) čvora (npr. 110 kV) - napojne tačke distributivne mreže, VN/SN napojnog transformatora (npr. 110 kV/21 kV), SN mreže (npr. 20 kV) i više niskonaponskih (NN) mreža (npr. 0,38 kV<sup>1</sup>). Sve veličine na slici 1 izražene su u domenu relativnih (procentnih) vrednosti [15]. Napojni transformator VN/SN je regulacioni transformator sa regulacijom pod opterećenjem (RTRPO) i, načelno, on može biti kontrolisan sa ARN ili direktno SCADA sistemom. Njegov sekundar je izvor (SN mreže). Moduli napona i struje izvora su označeni sa  $u$  i  $i$ , respektivno. SN mreža se sastoji od  $L$  SN potrošača - prikazano većim kružićima. Samo  $j$ -ti potrošač je predsta-

<sup>1</sup>Prelazak sa nominalnog napona 0,38 na 0,4 kV je u toku.

vljen sa svim relevantnim detaljima. On se sastoji od SN/NN distributivnog transformatora i odgovarajuće NN mreže. I ovaj transformator je regulacioni, ali sa regulacijom u beznaponskom stanju (RTRBN). Celokupna potrošnja svih potrošača (npr. domaćinstava) napajanih  $j$ -tom NN mrežom, integrisana na NN strani transformatora, zajedno sa gubicima NN mreže, čine  $j$ -ti sredjenaponski potrošač tretiran sa NN strane. Ova potrošnja, uvećana sa gubicima transformatora, čini  $j$ -ti sredjenaponski potrošač tretiran sa SN strane. Moduli napona i pad napona do SN čvora  $j$  označeni su sa  $u_j$  i  $\nabla u_j$ , respektivno. (Pad napona čvora jednak je sumi padova napona svih sekcija od izvora do tog čvora.) Modul struje i faktor snage na primeru SN/NN transformatora označeni su sa  $i_j$  i  $\cos q_j$ . Njihove relativne vrednosti su jednake (ili vrlo bliske) odgovarajućim vrednostima na sekundarnoj strani:  $i_j = i'_j$  i  $\cos q_j = \cos q'_j$ ,  $j=1,2,\dots,L$ , [15].

Relativne vrednosti pada napona i naponske podrške [13,15–17]  $j$ -tog SN/NN transformatora označene su sa  $\Delta u_j$  i  $b_j$ , respektivno. Modul napona sekundara transformatora je označen sa  $u'_j$ . Sa  $j$ -te NN mreže napaja se  $N_j$  NN potrošača (npr. domaćinstava) - prikazano manjim kružićima. Svaki od njih se sastoji od električnih aparata, koji su priključeni preko kućne instalacije na napojnu tačku gde je smešteno brojište električne energije potrošača.

Potrošnja svakog potrošača (SN, NN) tretira se hronološkim dijagramom potrošnje aktivne i reaktivne snage, ili modula struje i faktora snage, kao i odgovarajućim uređenim dijagramima trajanja potrošnje [16]. Takav jedan dijagram trajanja potrošnje prikazan je na slici 2. On može da se odnosi na godinu, sezonu, mesec, sedmicu ili dan. Dijagram je aproksimovan sa  $M$  diskretnih vrednosti - reprezentativnih stanja, svaka asocirana vremenskom intervalu  $T^m$ ,  $m=1,2,\dots,M$ . Prvo i  $M$ -to reprezentativno stanje odnose se na maksimalnu i minimalnu potrošnju, respektivno. Potrošnja cele SN mreže (VN/SN transformatora), pa i svakog njegovog SN izvoda, za



Slika 2. Uredeni dijagram trajanja potrošnje

period  $T$ , može se predstaviti takvim dijagramom (iskustva sa regulacijom napona koja se prikazuje u ovom radu ukazala su na to da je za prikaz potrošnje u jednoj sezoni dovoljno uzeti od 5 do 7 reprezentativnih stanja).

U izlaganjima koja slede, koristiće se sledeća pretpostavka i definicija koje se odnose na potrošnju:

Pretpostavka 1 - *Potrošnja potrošača (snage, struja) ne zavise od modula napona potrošača* (ova pretpostavka nije nužna, ali se njome znatno pojednostavljaju proračuni.)

Definicija 1 - *Pod „sličnim potrošačima” se podrazumevaju oni koji imaju sledeće osobine: (I) njihovi dijagrami opterećenja (snage i struje) međusobno su proporcionalni, (II) njihovi dijagrami faktora snaga međusobno su jednaki i (III) oni trpe istu štetu za isto odstupanje napona po jedinici potrošnje.*

### 3. DEKOMPOZICIJA PROBLEMA REGULACIJE NAPONA

Bazični resursi za regulaciju napona DM su regulacioni transformatori RTRPO i RTRBN. Dodatni resursi za regulaciju napona su *naponski regulatori* (transformatori sa nominalnim odnosom transformacije 1:1 i regulacijom pod opterećenjem, postavljeni duž SN izvoda), *transformatori za podršku* (slični su prethodnim, ali regulacija napona se vrši u beznaponskom stanju), *baterije kondenzatora, statički VAR sistemi* itd. [18].

Problem regulacije napona DM koji se razmatra u ovom članku postavljen je na radijalnoj mreži prikazanoj na slici 1. Primenom RTRPO, regulacija napona prostire se na prilično velikom prostoru SN mreže, koja se napaja sa tog transformatora. Međutim, distributivni RTRBN ne utiče na napone NN mreža koje se napajaju sa drugih distributivnih transformatora. Takva dispozicija i uticaj regulacionih resursa predstavlja osnovu za *prostornu dekompoziciju* problema regulacije napona radijalnih DM.

S druge strane, brzine regulacionih delovanja obe vrste transformatora radikalno se razlikuju. Regulacija pod opterećenjem RTRPO je „vrlo brza”, sa

stopom minuta. Nasuprot tome, promene regulacionih otepa (naponskih podrški) distributivnih RTRBN, koje se vrše u beznaponskom stanju, su „vrlo spore”. One se uobičajeno izvode na godišnjem nivou. Takve brzine regulacije napona su osnova za *vremensku dekompoziciju* problema regulacije napona radijalnih DM.

Vrlo izražena pozitivna korelacija između obe dekompozicije je očigledna: brzina regulacije raste sa veličinom prostora na kome se oseća delovanje regulacije - tabela 1. Obe dekompozicije se mogu izvesti ako se tretiraju i ostali, napred nabrojani regulacioni resursi. Ako među tim resursima ima i onih čija se dinamika regulacije odvija na dnevnom ili nedeljnom nivou („spora regulacija”), onda u tabeli 1 treba insertovati još jednu vrstu između dve već utvrđene.

Prostorna dekompozicija omogućava rešavanje problema regulacije napona za mrežu svakog napojnog transformatora posebno. Vremenska dekompozicija omogućava rešavanje problema regulacije napona posebno u realnom vremenu i posebno u modu planiranja pogona na sezonskom ili godišnjem nivou.

### 4. GLOBALNA KVANTIFIKACIJA NAPONSKOG PROFILA MREŽE

Svaki potrošač trpi štetu kad se njegovi električni aparati napajaju električnom energijom s naponom različitim od nominalog [12,13]. Ove štete impliciraju štete kod svih potrošača, na svim naponskim nivoima (NN i SN), kad god se napajaju naponom različitim od *referentnog napona*. Zavisnost štete koju trpi ma koji potrošač od napona kojim se napaja, za male promene napona, može se iskazati sledećim izrazom [12,13]:

$$D = C(u-u')^2 E \quad (1)$$

Električna energija i modul napona potrošača u stacionarnom stanju označeni su sa  $E$  (kWh) i  $u$  (%), respektivno; korespondentna šteta je označena sa  $D$  (n.j. - novčane jedinice). Minimalna šteta - „nulta šteta” - odgovara *referentnoj vrednosti*  $u'$  (%).

Tabela 1.

Prostorno-vremenska dekompozicija problema regulacije napona

RESURSI ZA REGULACIJU NAPONA	PROSTORNA DEKOMPOZICIJA (prostor pod uticajem regulacije)	VREMENSKA DEKOMPOZICIJA (brzina regulacije)
Napojni transformator	Veliki prostor - SN mreža	Brza (minuti)
Distributivni transformator	Mali prostor - NN mreža	Vrlo spora (godina, sezona, ...)

Definicija 2 - „Referentni napon” ma kog čvora radijalne mreže je modul napona koji implicira minimalnu ukupnu štetu, koju trpe svi električni aparati koji se direktno ili indirektno napajaju iz tog čvora, a usled napajanja naponima koji su različiti od nominalnog.

Očigledno je da je referentni napon električnih aparata 100 % (nominalni napon). Referentne vrednosti potrošača viših nivoa (NN, SN) su, načelno, veći od 100 % (Prilog 1).

$C$  [n.j./%<sup>2</sup> kWh] u (1) naziva se konstantom štete. Saglasno s Definicijom 1, vrednosti konstanti štete sličnih potrošača međusobno su jednake. (Potreba za poznavanjem njihovih vrednosti diskutovana je u glavi 5.)

Razlika  $(u-u')$  naziva se (stacionarnim) odstupanjem napona. Kvadrat te vrednosti, pomnožen sa energijom potrošača,  $(u-u')^2 E$  [%<sup>2</sup> kWh], nosilac je razmatrane štete.

Šteta koju svi SN potrošači mreže, prikazane na slici 1, trpe u stacionarnom stanju, koje traje vreme  $t$ , može se iskazati izrazom:

$$D = t \sum_{j=1}^L C'_j [u - \nabla u_j - \Delta u_j + b_j - (u'_{SN})'_j]^2 i_j \cos \mathbf{q}_j, \quad C'_j = 3C_j U_{SN}^n I_{SN}^b, \quad (2)$$

Električna energija u stacionarnom stanju iskazana je aproksimativno preko nominalnog napona  $U_{SN}^n$ . Bazna struja na SN nivou označena je sa  $I_{SN}^b$  [15]. Referentni napon  $j$ -tog SN potrošača tretiranog sa NN strane označen je sa  $(u'_{SN})'_j$  (definicija 2 i prilog 1).

Što je šteta (2) manja, to je globalni naponski profil mreže kvalitetniji. Mogućnost da se ta šteta kontroliše (minimizuje), predstavlja osnovu za utvrđivanje *Regulacije napona*, kao jedne od osnovnih centralizovanih analitičkih funkcija DMS.

## 5. REGULACIJA NAPONA

Kako je gore navedeno, prostorna dekompozicija problema regulacije napona DM omogućuje njegovo rešavanje za mrežu svakog napojnog transformatora posebno. Vremenska dekompozicija omogućuje njegovo rešavanje u dva moda posebno - u modu operativnog planiranja i u modu realnog vremena. Rešenje u modu planiranja pogona je opisano sa svim relevantnim detaljima, što omogućuje vrlo jednostavno izvođenje rešenja problema u modu realnog vremena.

### 5.1. Mod planiranja pogona

Podešenje naponskih podrški (položaja naponskih preklopki na odgovarajuće pozicije) distributiv-

nih RTRBN i podešenje parametara ARN RTRPO, u DM u kojima se regulacija napona realizuje na klasičan način, pitanja su koja se obrađuju u modu planiranja pogona. U ovom paragrafu je opisana jedna nova, optimizaciona procedura razvijena za tu svrhu.

U ovom modu se razmatra nastupajući vremenski period  $T$  (npr. jedna sezona). Perspektivna konfiguracija mreže određuje se primenom funkcije *Optimalna rekonfiguracija*. Teoretski, kada su hronološki dijagrami svih distributivnih transformatora poznati (prognozirani), ukupna šteta svih SN potrošača, u celom nastupajućem periodu  $T$ , može se izraziti formulom:

$$D_T = \int_0^T \sum_{j=1}^L C'_j \{u(t) - \nabla u_j(t) - \Delta u_j(t) + b_j - [u'_{SN}(t)]'_j\}^2 \cdot i_j(t) \cos \mathbf{q}_j(t) dt, \quad (3)$$

pri čemu su sve varijable režima zavisne od vremena.

Ukupna šteta zavisi: (I) od vremenski zavisnog napona izvora  $u(t)$  i (II) od vremenski nezavisnih naponskih podrški svih  $L$  distributivnih transformatora. Ukupna šteta treba da se optimizuje (minimizuje) po tim varijablama, respektujući naponska ograničenja. Prognoza potrošnje i sagledana perspektivna konfiguracija SN mreže praćene su značajnim neizvesnostima. Zbog toga, rezultati opisane optimizacije su u istoj meri neizvesni. Konsekvence jednog tako neizvesnog proračuna biće ublažene regulacijom napona u realnom vremenu. Ovakav prilaz dozvoljava da se SN potrošači u modu planiranja pogona tretiraju kao *slični*. U tom slučaju, dijagram trajanja potrošnje  $k$ -tog SN potrošača je proporcionalan sa takvim dijagramom izvora mreže (struje otočnih parametara elemenata DM su zanemarene):

$$\begin{aligned} \dot{i}_k / \sum_{j=1}^L \dot{i}_j &= \dot{i}_k^y / \sum_{j=1}^L \dot{i}_j^y; \quad k = 1, 2, \dots, L; \\ x &= 1, 2, \dots, M; \quad y = 1, 2, \dots, M, \end{aligned} \quad (4)$$

gde se superskripti  $x$  i  $y$  odnose na reprezentativna stanja (slika 2). Ovakav tretman potrošnje omogućuje primenu vrlo jednostavne procedure za procenu perspektivnih stanja SN mreže u modu planiranja pogona. Ta procedura se sastoji od primene „off-line estimacije stanja”. Ona se izvodi korišćenjem prognoziranih opterećenja napojnog transformatora i specificiranih vrednosti napona izvora. Proračunati padovi napona sekcija i čvorova jednaki su za svaki drugi napon izvora (pretpostavka 1).

S obzirom na to da su dijagrami trajanja potrošnje diskretizovani, izrazu (3) može se dati oblik:

$$D_T = \sum_{m=1}^M T^m \sum_{j=1}^L C'_j [u^m - \nabla u_j^m - \Delta u_j^m + b_j - (u'_{SN})^m_j]^2 i_j^m \cos \mathbf{q}_j^m, \quad (5)$$



pri čemu je superskriptom  $m$  označeno reprezentativno stanje dijagrama trajanja potrošnje (slika 2). Sledeći optimizacioni problem, sada se može postaviti:

Optimalna regulacija napona u modu planiranja pogona - *Zadati su: konfiguracija SN mreže, uređeni dijagram trajanja potrošnje izvora SN mreže (prognozirani i aproksimirani sa  $M$  reprezentativnih stanja) i referentni naponi svih SN potrošača (zavisni od režima razmatrane DM) za nastupajući vremenski period  $T$ . Potrebno je izračunati sledeće nepoznate (upravljačke) varijable: (I) skup od  $L$  naponskih podrški distributivnih RTRBN (validnih za ceo nastupajući period  $T$ ) i (II) skup od  $M$  vrednosti napona izvora za  $M$  reprezentativna stanja - „zakon regulacije”. Ovako proračunate varijable treba da impliciraju MINIMALNU UKUPNU ŠTETU svih potrošača, za ceo nastupajući period, uz respektovanje naponskih ograničenja.*

Definicija 3 - *Rešenje postavljenog optimizacionog problema - skup od  $L$  naponskih podrški i skup od  $M$  vrednosti napona izvora (zakon regulacije) - naziva se „optimalnim”.*

Kriterijumska funkcija (5) predstavlja ukupnu štetu svih potrošača (globalni naponski profil- kvalitet napona mreže), u celom nastupajućem periodu  $T$ . Ona treba da se minimizuje po  $(L+M)$  varijabli:  $b_j$ ,  $j=1,2,\dots,L$ , i  $u^m$ ,  $m=1,2,\dots,M$ . Naponske podrške imaju diskretne vrednosti. Modul napona izvora interno je tretiran kao kontinualna varijabla. Zato je postavljeni optimizacioni problem rešen jednom specijalno razvijenom procedurom pretraživanja. Tom procedurom se pretražuje samo radikalno smanjen skup mogućih rešenja.

Neka se, za sada, razmatra SN mreža sa unapred specificiranim naponskim podrškama svih distributivnih transformatora. U takvoj situaciji, dva referentna napona izvora mogu se izračunati za svaka dva različita reprezentativna stanja mreže. Ako se promene specificirane vrednosti naponskih podrški, onda se mogu izračunati dve nove vrednosti napona izvora za ista dva reprezentativna stanja. Razlike između oba para referentnih vrednosti napona izvora se ne menjaju. U tom smislu, sledeći stav je suštinski za utvrđivanje napred pomenute specijalne procedure pretraživanja:

Stav 1 - *Razlika između referentnih vrednosti napona izvora za ma koja dva različita reprezentativna stanja SN mreže, kojom se napajaju slični potrošači, ne zavisi od izabranih naponskih podrški distributivnih transformatora (prilog 3).*

Sada, za zadatih  $M$  reprezentativnih stanja SN mreže i po želji specificiranih vrednosti  $L$  naponskih podrški, kriterijumska funkcija (5) može se parcijalno minimizovati samo po skupu od  $M$  vrednosti na-

pona izvora - referentnim naponima izvora  $u^m$ ,  $m=1,2,\dots,M$ . Ova minimizacija može da se sprovede vrlo jednostavno pošto je kriterijumska funkcija (5) separabilna po  $M$  vrednosti  $u^m$ ,  $m=1,2,\dots,M$ . Saglasno sa izrazom (P7a) u prilogu 1, te vrednosti su:

$$u_{SN}^m = \frac{\sum_{j=1}^L C'_j i_j^m \cos \mathbf{q}_j [\nabla u_j^m + \Delta u_j - b_j + (u_{SN}^m)'_j]}{\sum_{j=1}^L C'_j i_j^m \cos \mathbf{q}_j},$$

$$m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

Ova minimizacija nazvana je *prva parcijalna optimizacija*. Saglasno sa stavom 1, razlika između vrednosti bilo koja dva referentna napona izvora (izvedenih prvom parcijalnom optimizacijom) jednaka je razlici između odgovarajućih optimalnih vrednosti napona izvora (definicija 3).

Definicija 4 - *Skup vrednosti  $(M-1)$  razlika između referentnih napona izvora, za  $M$  reprezentativnih stanja, naziva se „skup konstantnih razlika”:*

$$d^m = u_{SN}^{i1} - u_{SN}^{im}, \quad m = 2, 3, \dots, M. \quad (7)$$

Definicija 5 - *Bilo koji skup od  $M$  vrednosti napona izvora, koji zadovoljava konstantne razlike, naziva se „skup uniformnih napona izvora”.*

Na taj način, optimalni zakon regulacije jeste skup uniformnih napona izvora. Zbog toga, samo skup uniformnih napona izvora treba da se pretraži da bi se došlo do optimalnog rešenja problema regulacije napona u modu planiranja pogona. Bilo koji pojedinačan skup od  $M$  uniformnih napona izvora i, konsekventno, skup od  $(M-1)$  odgovarajućih konstantnih razlika, mogu biti izvedeni gore opisanom prvom parcijalnom optimizacijom, za  $M$  poznatih reprezentativnih stanja i bilo koji skup od  $L$  inicijalno izabranih vrednosti naponskih podrški. Na osnovu izvedenih konstantnih razlika, bilo koji drugi skup uniformnih napona izvora može biti izveden *uniformnim pomeranjem (šiftovanjem)* vrednosti napona, koje pripadaju inicijalno izabranom skupu. Uniformna promena znači da se svih  $M$  uniformnih napona izvora promeni za istu vrednost. Ta vrednost je nazvana *korak pomeranja* -  $\Delta u_{pom}$ .

Za svaki skup uniformnih napona izvora izabranih po želji, nova parcijalna minimizacija kriterijumske funkcije (5) može biti izvedena, sada samo po  $L$  naponskih podrški RTRBN -  $b_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, L$ . Ova minimizacija - *druga parcijalna optimizacija* - može da se sprovede jednostavnim pretraživanjem po naponskim podrškama. Pošto je kriterijumska funkcija (5) separabilna po  $L$  naponskih podrški (pretpostavka 1), ovo pretraživanje može da se izvede u vidu  $L$  nezavisnih pretraživanja prema izrazu (8):

$$D_j = \sum_{m=1}^M T^m C'_j [u^m - \nabla u_j^m - \Delta u_j^m + b_j - (u_{SN}^m)'_j]^2 t_j^m \cos \mathbf{q}_j^m, \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

svaki put po  $b_j(k)$ ,  $k=1, 2, \dots, K$ , koji minimizuje taj izraz. Svako pojedinačno pretraživanje je vrlo jednostavno, pošto regulacioni otepi distributivnih RTRBN najčešće imaju svega nekoliko pozicija ( $K = 3$  ili  $5$ ).

Definicija 6 - *Skup vrednosti  $L$  naponskih podrški izračunatih drugom parcijalnom optimizacijom, za specificirane uniformne napone izvora, naziva se „skup koherentnih naponskih podrški“.*

Sada se procedura za rešenje optimizacionog problema u modu planiranja pogona može zaokružiti. Ona se zasniva na činjenici da se optimalni zakon regulacije napona izvora sastoji od uniformnih napona. Naime, ceo opseg uniformnih napona izvora, koji pripada opsegu tehnički dozvoljenih napona (npr. 95 % - 105 %), može se jednostavno pretražiti koristeći se konstantnim razlikama (7) i dovoljno malim korakom pomeranja  $-\Delta u_{pom}$ . U toku tog pretraživanja, koristeći se drugom parcijalnom optimizacijom, permanentno se izračunavaju odgovarajuće koherentne naponske podrške. Uniformni naponi izvora i odgovarajuće koherentne naponske podrške, koji minimizuju kriterijumsku funkciju (5), čine optimalno rešenje gore postavljenog problema.

Da koraci pomeranja ( $\Delta u_{pom}$ ) konačnih vrednosti zaista postoje, može se jednostavno teorijski pokazati na osnovu forme kriterijuma (5). Taj dokaz je praktično verifikovan u glavi 6.

### Tretman naponskih ograničenja

Gornje i donje tehničke granice napona u SN mrežama propisane su u tehničkim standardima (npr. 105 % i 95 %). U gore opisanoj optimizacionoj proceduri, one treba da se „suze“ da bi se prevenirala njihova moguća prevazilaženja, usled neizvesnosti koje prate proračune sprovedene u modu planiranja pogona.

Pošto se samo naponi NN sabirnica distributivnih transformatora (a ne i naponi po dubini NN mreža) računaju primenom „off-line estimacije stanja“, tretman naponskih ograničenja NN mreža je nešto drugačiji. Samo ti naponi se mogu porediti sa granicama propisanim za NN mreže (npr. 105 % i 95 % ili 90 %). Opseg tih granica se mora takođe suziti usled neizvesnosti koje se unose „off-line estimacijom stanja“. Pored toga, donju granicu treba dodatno podići da bi se uzeli u obzir padovi napona duž NN vodova do najudaljenijih NN potrošača.

Gore opisana optimizaciona procedura za pretraživanje mogućih rešenja treba da se sprovede sa-

mo unutar tako određenih granica za napone. Kada se raspolaze sa  $M$  uniformnih napona izvora, koji pripadaju opsegu koji je definisan takvim granicama za SN mrežu, kao i sa  $L$  koherentnih naponskih podrški, naponi NN sabirnica distributivnih transformatora treba da se provere u odnosu na opisane granice za NN mreže. U slučaju da napon na NN strani bar jednog distributivnog transformatora, u bar jednom reprezentativnom stanju, prevaziđe jednu od granica, vrednost odgovarajuće naponske podrške treba da se promeni, ako je moguće, s ciljem da se modul napona na NN strani transformatora vrati u unutar granica. Očigledno je da kada se desi bar jedna takva promena, vrednost kriterijumske funkcije (5) poraste. Sada treba probati da se ovako porasla vrednost kriterijumske funkcije smanji adekvatnom promenom napona izvora za svih  $M$  reprezentativnih stanja.

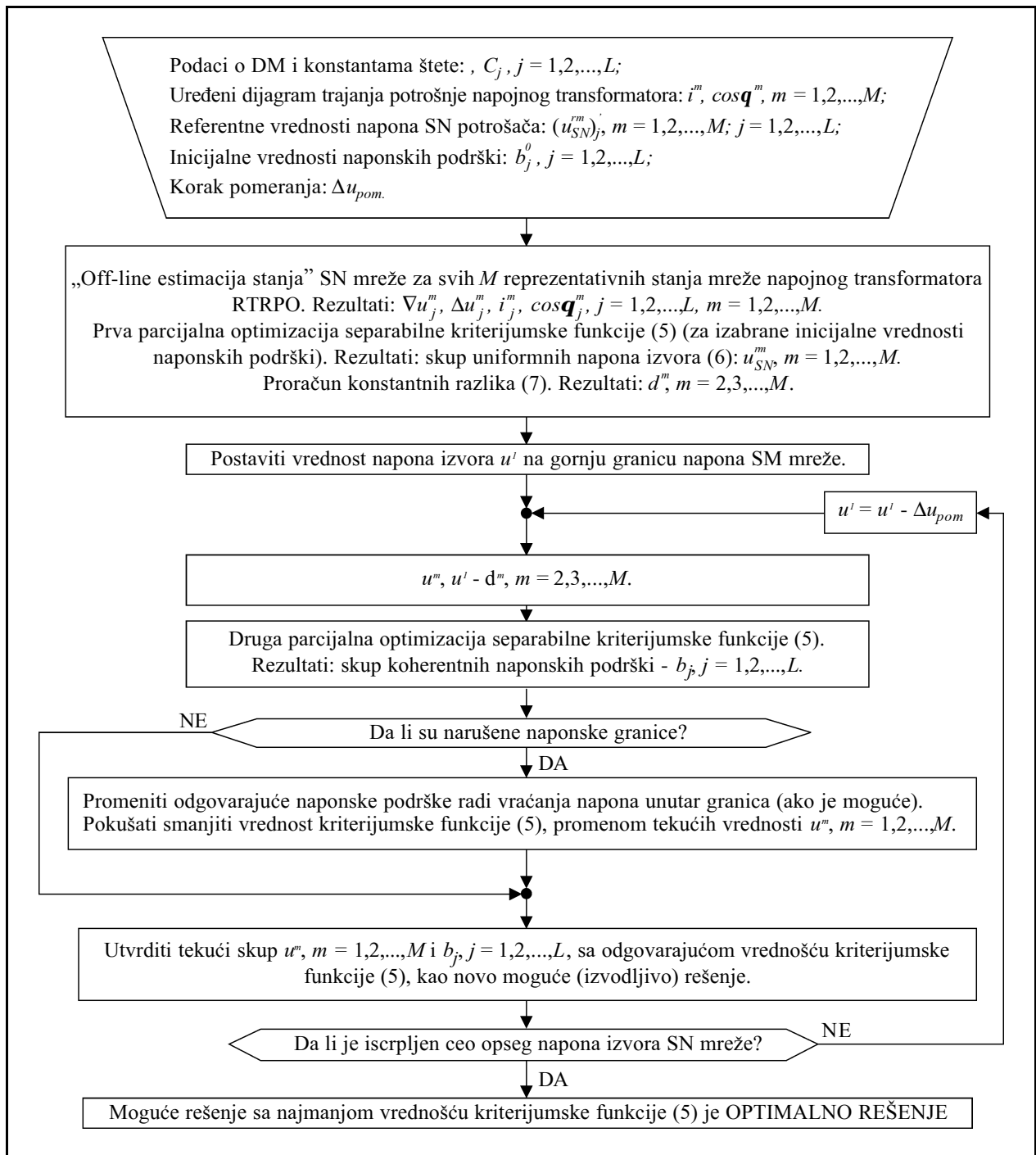
Vrednosti  $L$  naponskih podrški i  $M$  napona izvora, postignute sa ili bez promena naponskih podrški radi uvažavanja tehničkih granica, predstavljaju jedno od *mogućih rešenja* optimizacionog problema regulacije napona sa ograničenjima u modu planiranja pogona. Opisana procedura pretraživanja se nastavlja uz korišćenje konstantnih razlika izvedenih na samom početku. Moguće rešenje kojim se minimizuje kriterijumska funkcija (5) predstavlja *optimalno rešenje* razmatranog optimizacionog problema. Blok-dijagram algoritma te procedure prikazan je na slici 3. Vreme potrebno da se procedura sprovede na jednoj SN DM srednje veličine (pet do deset SN izvoda), koristeći se PC računarnom tipa Pentium II, ne zahteva više od nekoliko sekundi.

Rešenje opisanog optimizacionog problema nije jedinstveno (slika 5). Ova činjenica se može jednostavno objasniti. Neka se razmatra stanje radijalne mreže sa optimalnim naponom izvora i optimalnim naponskim podrškama svih distributivnih transformatora. Takvi naponi i podrške impliciraju odgovarajuće vrednosti napona na NN stranama distributivnih transformatora. Ako se sve naponske podrške povećaju za istu vrednost (npr. za 2,5 %), a napon izvora smanji za istu vrednost (2,5 %), naponi na NN stranama distributivnih transformatora se neće promeniti. Ovo dalje implicira istu (optimalnu) vrednost kriterijumske funkcije (5) u obe situacije. Mada ova vrednost ostaje nepromenjena, gubici snage u SN DM se menjaju. Tako se regulacija napona sa rešenjem sa najmanjim naponskim podrškama i najvećim naponima izvora, kojima se minimizuje kriterijumska funkcija (5), može definitivno utvrditi kao *jedinstveno optimalno rešenje*. Predloženom optimalnom regulacijom napona, posle obezbeđenja najboljeg naponskog profila, na ovaj način se sma-

njuju i gubici u SN mreži. Efekti primene optimalne regulacije napona prikazani su u glavi 6.

Kada je optimizacioni problem regulacije napona u modu planiranja pogona rešen, na raspolaganju su optimalne vrednosti  $L$  naponskih podrški i optimalni zakon regulacije. Optimalne vrednosti naponskih podrški će biti direktno primenjene u mreži (optimalni regulacioni otepci distributivnih RTRBN će

biti podešeni) na početku nastupajućeg vremenskog perioda (npr. sezone), nezavisno od primenjene regulacije u realnom vremenu. Optimalni zakon regulacije će biti direktno primenjen samo u mrežama u kojima se regulacija napona izvodi klasičnim ARN. Ova regulacija (ARN) zasnovana je na principu „kompenzacije pada napona na jedinstvenom vodu” [16,17]. Održavanje napona unutar tehničkih grani-



Slika 3. Blok dijagram optimizacione procedure u modu planiranja pogona

ca je jedinstven kriterijum u klasičnoj regulaciji napona. Kada se primeni ovde opisana optimalna regulacija napona, parametri klasičnih ARN su podešeni na osnovu optimalnog zakona regulacije. Zakon regulacije se sastoji od  $M$  parova vrednosti struja i odgovarajućih napona izvora, za  $M$  reprezentativnih stanja SN mreže. Karakteristiku regulacije ARN treba „fitovati” kroz te parove. Tako, kada je optimalna regulacija napona primenjena, klasična regulacija napona je proširena sa optimizacionim aspektom, kojim su uzeta u obzir i naponska ograničenja. ARN se podešavaju na početku nastupajućeg vremenskog perioda. Ovo podešenje će biti validno za ceo taj period, nezavisno od *aktuelnih* stanja i topologije razmatrane DM koje će se razlikovati u odnosu na stanja i topološke strukture s kojima se operisalo u modu planiranja pogona. Ova činjenica je osnovni nedostatak klasične regulacije napona.

Tom nedostatku treba pridružiti i pretpostavku o sličnosti potrošača pomoću koje je izveden zakon regulacije. Oba nedostatka mogu se značajno ublažiti primenom optimalne regulacije napona u modu realnog vremena, koji se ovde predlaže. U tom modu, regulacija napona se sprovodi uvažavajući aktuelne topološke strukture i stanja DM.

## 5.2. Mod realnog vremena

Optimizacioni problem regulacije napona u realnom vremenu je samo simplifikacija problema iz moda planiranja pogona. On ima „jednu dimenziju” manje. Naime, vrednosti naponskih podrški RTRBN su već izabrane u modu planiranja pogona i postavljene u mreži na početku nastupajućeg perioda (npr. sezone). Ako se naponi SN mreže kontrolišu na klasičan način, primenom ARN na RTRPO, parametri ARN su izabrani i postavljeni u isto vreme.

Razmatranja koja slede odnose se na DM koje su obuhvaćene sa DMS. ARN se mogu potisnuti iz takvih mreža. Neka se razmatra *aktuelno* stanje jedne SN mreže. Njena konfiguracija i stanje su vrlo izvesni. Oni su, manje ili više, različiti od onih s kojima se računalo u modu planiranja pogona. Stanje mreže je određeno primenom funkcije *Estimacija stanja* u realnom vremenu. Vrednost štete koju svi SN potrošači trpe usled odstupanja napona (globalna vrednost kvaliteta napona) može biti izračunata primenom izraza (2). Ta šteta zavisi samo od modula napona izvora  $u$ . Ovaj napon može da se kontroliše napojnim RTRPO. Sledeći optimizacioni problem tako može da se postavi:

*Optimalna regulacija napona u modu realnog vremena - Naći modul napona izvora  $u$ , kojim se minimizuje kriterijumska funkcija (2), respektujući naponska ograničenja u celoj DM.*

Modul napona izvora  $u$ , kojim se minimizuje kriterijumska funkcija (2) - referentni napon izvora  $\{P7a\}$  u prilogu 1} je:

$$u_{SN}^r = \frac{\sum_{j=1}^l C_j' i_j \cos q_j [\nabla u_j + \Delta u_j - b_j + (u_{SN}^r)'_j]}{\sum_{j=1}^l C_j' i_j \cos q_j}, \quad (9)$$

Vrednosti svih veličina stanja i referentnih napona na desnoj strani izraza (9) su poznati, pa može da se odredi vrednost napona izvora. Ona treba da se uporedi sa aktuelnom vrednošću modula napona izvora  $u$ . Ako je razlika tih vrednosti veća od specificirane „mrtve zone”, za vreme veće od specificiranog „vremena zatezanja”, respektujući naponska ograničenja u celoj DM, položaj regulacione sklopke napojnog transformatora treba da se promeni za jednu poziciju u pravcu eliminisanja te razlike. Ova promena se realizuje automatski, koristeći se SCADA sistemom.

### *Tretman naponskih ograničenja*

Isto kao u slučaju moda planiranja pogona, opseg određen gornjom i donjom granicom napona SN i NN mreža treba suziti da bi se prevenirala moguća prevazilaženja granica, izazvana neizvesnostima koje prate rezultate estimacije stanja u realnom vremenu. Ove druge treba još više suziti, da bi se uzeli u obzir padovi napona do najudaljenijih NN potrošača.

Rešenja optimalne regulacije napona u oba opisana moda zasnovana su na poznavanju vrednosti konstanti štete  $C$ . Kada se te vrednosti mogu proceniti, kako je to urađeno u [12], apsolutna vrednost kriterijumske funkcije (5) se takođe može proceniti. U suprotnom slučaju, za rešenje problema optimalne regulacije napona dovoljno je da se znaju samo relativne vrednosti konstanti štete SN potrošača. To je očigledno iz izraza za određivanje referentnih vrednosti izvedenih u prilogu 1.

Vrlo kvalitetna optimalna regulacija može se izvesti čak i ako se ne poznaju vrednosti konstanti štete. To se može učiniti utvrđivanjem jednake vrednosti konstanti štete svih SN potrošača. U tom slučaju, kvadrati odstupanja napona u kriterijumskoj funkciji (5) su ponderisani sa „veličinama” potrošača - strujama potrošača. Tada se optimalnom regulacijom napona obezbeđuje utoliko kvalitetniji napon ukoliko je potrošač veći.

Konačno, predloženom optimalnom regulacijom napona, jedan ili više čvorova se mogu posebno favorizovati, sa aspekta kvaliteta napona u odnosu na ostale čvorove. To se može učiniti specifikacijom relativnih (većih) „vrednosti konstanti štete” samo za izabrane potrošače. Kada se favorizuje samo jedan potrošač, predložena procedura se svodi na re-

gulaciju napona predloženu u [13]. U tom slučaju, regulacijom napona se obezbeđuje konstantan napon u izabranom čvoru.

## 6. VERIFIKACIJA

Svrishodnost predložene optimalne regulacije napona prikazana je na primeru radijalne DM grada Crvenka (Vojvodina) - slika 4. Mreža SN (20 kV) se napaja sa RTRPO (110±12×1,25 % /21/10,5) kV/kV/kV. Transformator je snabdeven sa ARN tipa REG5A [19]. Mreža SN se sastoji od sedam SN izvoda koji napajaju preko osamdeset distributivnih RTRBN (20±2×2,5 % )/0,4 kV/kV.

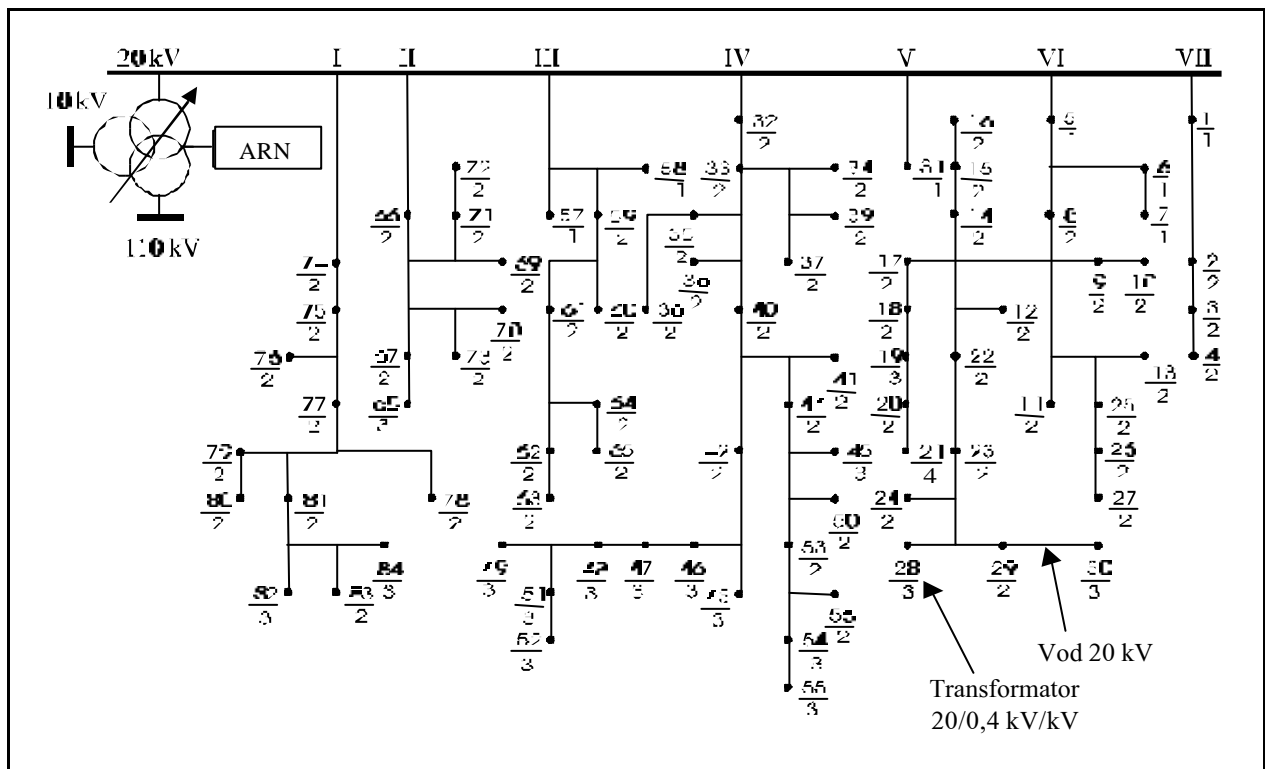
Procedura pretraživanja mogućih rešenja optimalne regulacije napona u modu planiranja pogona demonstrirana je dijagramima *a* i *b* na slici 5. Napon izvora za prvo reprezentativno stanje, stanje maksimalne potrošnje -  $u'$  ( $m=1$ ), nazvan je *vodećim naponom* skupa od  $M$  uniformnih napona izvora. Vrednost vodećeg napona je prikazana na apscisi oba dijagrama. Njegova vrednost je varirana od 105 - 99 %. Ostale ( $M-1$ ) vrednosti napona izvora  $u^m$ , svaka asociirana sa jednim reprezentativnim stanjem,  $m=2,3,\dots,M$ , određuju se na osnovu vrednosti vodećeg napona i poznatih (izračunatih) konstantnih razlika.

Za svaki skup od  $M$  vrednosti napona izvora i primenom druge parcijalne optimizacije, izračuna-

vaju se vrednosti  $L$  koherentnih naponskih podrški i ukupna vrednost kriterijuma štete (konstante štete  $C_j$  se uzimaju jednake jedinici)  $D_T$  (%), prema izrazu (5). Vrednosti ukupne štete prikazane su na ordinatama dijagrama na slici 5.

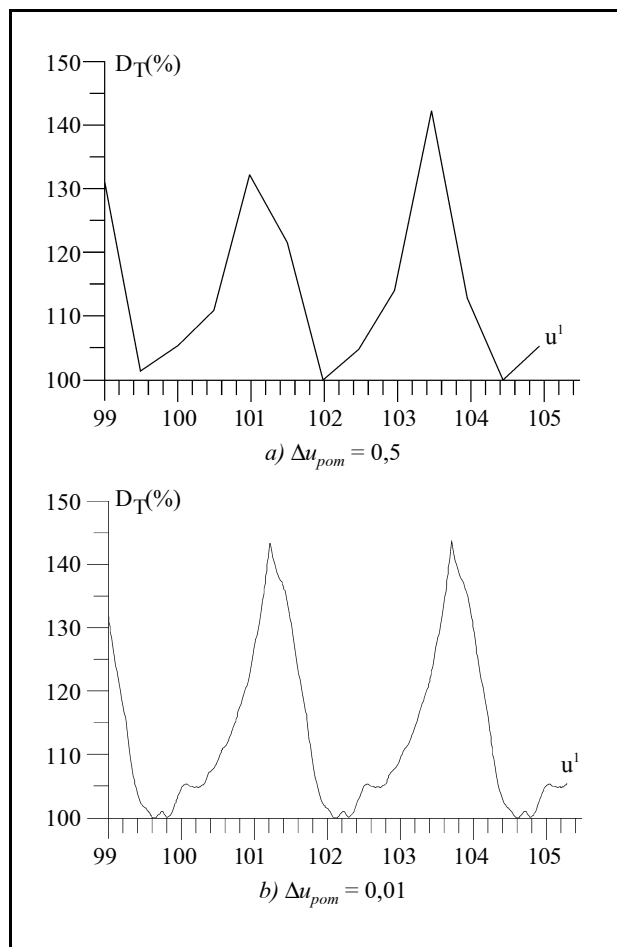
Prelomi dijagrama se pojavljuju isključivo kada je promena vrednosti vodećeg napona (apscisa) praćena promenom vrednosti naponske podrške bar na jednom distributivnom transformatoru, odnosno kada se sa procedurom pretraživanja prelazi sa jednog na drugi skup od  $L$  naponskih podrški. Tako se aktuelni skup naponskih podrški od prethodnog razlikuje za vrednost najmanje jedne naponske podrške.

Brojevi 0,5 i 0,01, pridruženi slikama 5 *a* i *b*, respektivno, predstavljaju vrednosti koraka pomeranja ( $\Delta u_{pom}$ ), korišćene za iscrpljivanje opsega napona utvrđenog na apscisi (105 - 99 %). Korak korišćen za pretraživanje, prikazan na slici 5a, iznosi 0,5 %. Broj naponskih podrški kojima se menjaju vrednosti kod svakog preloma je praktično uvek veći od jedan. To znači da korak nije dovoljno mali da se potpuno iscrpi ceo skup mogućih rešenja kojem pripada optimalno rešenje. Na dijagramu prikazanom na slici 5b taj korak iznosi 0,01 %. Broj naponskih podrški kojima se menjaju vrednosti kod svakog preloma je sada uvek jednak jedan. Situacija je ista i kada se taj korak smanjuje. To znači, korak 0,01 % je dovoljno mali da se iscrpi opisani skup mogućih rešenja.



Slika 4. Primer radijalne distributivne mreže

Ovim činjenicama je dokazano da je opisana procedura pretraživanja moguća.



Slika 5.

Rezultati procedure pretraživanja mogućih rešenja

Na osnovu periodičnosti dijagrama na slici 5, očigledna je već najavljena činjenica da rešenje optimizacionog problema u modu planiranja pogona nije jedinstveno. Taj period je jednak stepenu regulacije distributivnih transformatora izraženom u procentima - cca. 2,5 %. To znači da za nalaženje optimalnog rešenja nije nužno pretražiti ceo opseg napona između donje i gornje granice, već samo deo tog opsega koji iznosi 2,5 %.

Osnovni podaci i rezultati primene optimizacione procedure prikazani su u tabeli 2 - kolona OPT. Zadate struje i odgovarajući faktori snaga u režimima maksimalne i minimalne potrošnje mreže označeni su sa  $I[A]; \cos \varphi^I$  i  $I^M[A]; \cos \varphi^M$ , respektivno. Odgovarajuće optimalne vrednosti napona izvora, koje pripadaju optimalnom zakonu regulacija, označene su sa  $u^I$  i  $u^M$ . Relativna vrednost kriterijuma (5) označena je sa  $D_T$ . Njena optimalna vrednost jednaka je 100 %. Optimalne pozicije regulacionih otepa distributivnih RTRBN označene su na slici 4, odmah ispod brojeva transformatora.

Tabela 2.

Rezultati primene optimizacione procedure

Varijanta	OPT	I	II	III	IV
$I[A]; \cos \varphi^I$	488; 0,9				
$I^M[A]; \cos \varphi^M$	122; 0,8				
$u^I$ (%)	104,6	100,7	105,0	105,0	105,0
$u^M$ (%)	101,3	98,9	105,0	100,0	95,0
$D_T$ (%)	100,0	418,0	566,0	254,0	970,0

Radi verifikacije predložene optimalne regulacije napona izvršena je analiza osetljivosti optimalnog rešenja na promenu upravljačkih varijabli. Naime, regulacija napona je simulirana u četiri varijante, različite od optimalne. U svakoj od njih vršena je samo parcijalna optimizacija. U varijanti I, vrednosti naponskih podrški svih distributivnih RTRBN su specificirane na istu vrednost jednaku +5 %. Optimizacioni problem je rešen samo po naponima izvora (zakon regulacije). Vrednosti napona izvora, koje odgovaraju stanjima maksimalne i minimalne potrošnje prikazane su u vrstama  $u^I$  i  $u^M$ . U preostale tri varijante, II, III i IV, vrednosti napona izvora specificirane su unapred, prikazane su u vrstama  $u^I$  i  $u^M$ , respektivno. Odgovarajuće minimalne vrednosti kriterijuma štete (5), prikazane su u vrsti  $D_T$ . Očigledno je da vrednost štete raste (kvalitet napona opada) u odnosu na optimalnu vrednost (100 %), od 254 % do 970 %, zavisno od varijante.

Efekti optimalne regulacije napona mogu biti verifikovani i na osnovu slike 5. Na njoj su prikazani rezultati sistematski sprovedene procedure pretraživanja skupa mogućih rešenja. Očigledno je da šteta raste za oko 40 %, kada regulacija napona odstupa od optimalne. Takve male varijacije oko optimalnog rešenja potvrđuju kvalitet procedure za rešenje optimizacionog problema regulacije napona u modu planiranja pogona.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je jedna nova, centralizovana funkcija regulacije napona radialnih DM. Ona je svedena na optimizacionu proceduru. Ta funkcija integrisana je u DMS. Regulacija napona je zasnovana na minimizaciji štete koju potrošači električne energije trpe usled stacionarnih odstupanja napona. Što je ta šteta manja, to je globalni kvalitet napona DM veći.

Saglasno sa prostornom dekompozicijom, problem regulacije napona rešavan je za mrežu svakog napojnog transformatora posebno. Saglasno sa vre-

menskom dekompozicijom, optimizaciona procedura sprovodi se u dva moda - mod operativnog planiranja i mod realnog vremena. U prvom slučaju, regulacija napona se zasniva na funkciji Optimalna rekonfiguracija, a u drugom slučaju na funkciji Estimacija stanja.

U ovom radu pokazano je da se šteta koju potrošači trpe usled odstupanja napona može radikalno redukovati (kvalitet napona radikalno povećati), kada se primeni predložena regulacija napona.

Predložena procedura može da se primeni i u DM u kojima se regulacija napona vrši na klasičan način - primenom ARN. U takvim situacijama, klasična regulacija napona je unapređena jednim optimizacionim aspektom - minimizacijom štete koju trpe potrošači usled odstupanja napona.

Kombinovanjem sa relativnim vrednostima konstante štete ili referentnim naponima kod potrošača u modu realnog vremena, predloženi optimizacioni metod je tržišno orijentisan. Snabdevači električne energije mogu da nude i ugovaraju posebne uslove kvaliteta isporuke električne energije. Potrošači kod kojih mogu nastati velike štete usled odstupanja napona, biće spremni da ugovaraju specijalne (više) cene električne energije, kako bi se na njihovim lokacijama u mreži obezbedila manja odstupanja napona i unutar ugovorenih granica. Pored toga, metodom optimalne regulacije napona može se direktno kontrolisati potrošnja (prodaja) električne energije, zavisno od razlike njene nabavne i prodajne cene.

## 8. PRILOZI

### Prilog 1 - Proračun referentnih napona

Ovaj prilog se odnosi na proračun referentnog napona napojne tačke (sabirnice) bilo koje radialne mreže. Mreža se sastoji od  $N$  čvorova (potrošača) sa poznatim stanjima i referentnim naponima. Modul napona, pad napona, referentni napon, modul struje, električna energija i faktor snage čvora  $j, j=1,2,\dots,N$ , označeni su sa  $u_j, \nabla u_j, u_j^r, i_j, E_j$  i  $\cos \mathbf{q}_j$ , respektivno. Moduli napona i struje napojne tačke mreže označeni su sa  $u$  i  $i$ , respektivno. Vrednosti struja i padova napona sekcija (grana), kao i padovi napona čvorova mogu se jednostavno izračunati prema [6], za bilo koju vrednost napona napojne tačke (npr. nominalni napon). Te vrednosti nisu zavisne od napona napojne tačke (pretpostavka 1).

Saglasno s definicijom 2, referentni napon napojne tačke mreže jeste napon koji minimizuje štetu koju trpe svi potrošači u razmatranom stacionarnom stanju i koji se napajaju sa te tačke (1):

$$D_N = \sum_{j=1}^N C_j (u_j - u_j^r)^2 E_j \quad (\text{P1})$$

Kada se napon svakog čvora izrazi pomoću napona napojne tačke i odgovarajućeg pada napona do čvora, a

potrošnja električne energije u čvoru preko odgovarajućeg napona, struje, faktora snage i vremena trajanja razmatranog stacionarnog stanja  $t$ , tada izraz (P1) postaje:

$$D_N = \sum_{j=1}^N C_j (u - \nabla u_j - u_j^r)^2 3U_j \cos \mathbf{q}_j t \quad (\text{P2})$$

Kada se vrednosti napona, koji se nalaze izvan zgrade, aproksimuju nominalnim vrednostima,  $U_j = U^n$ ,  $j=1,2,\dots,N$ , a struje se iskazuju u domenu relativnih vrednosti ( $I^b$  je bazna struja), tada izraz (P2) postaje:

$$D_N = \sum_{j=1}^N C_j^r (u - \nabla u_j - u_j^r)^2 i_j \cos \mathbf{q}_j t, \quad (C_j^r = 3C_j U^n I^b) \quad (\text{P3})$$

Šteta (P3) treba da se minimizuje po naponu napojne tačke  $u$  - referentnom naponu:

$$u^r = \frac{\sum_{j=1}^N C_j^r i_j \cos \mathbf{q}_j (\nabla u_j + u_j^r)}{\sum_{j=1}^N C_j^r i_j \cos \mathbf{q}_j} \quad (\text{P4a})$$

Iz (P4a) je očigledno da je za proračun referentnog napona nužno znati samo relativne vrednosti (međusobne odnose) konstanti štete  $C$ .

Za slične potrošače, kada važi  $\cos \mathbf{q}_j = \cos \mathbf{q}$ ,  $C_j^r = C^r$ ,  $j=1,2,\dots,N$ , izraz (P4a) može se pojednostaviti na sledeći način:

$$u^r = \left[ \frac{\sum_{j=1}^N (u_j^r + \nabla u_j) i_j}{\sum_{j=1}^N i_j} \right] \quad (\text{P4b})$$

Na taj način, referentni napon za napojnu tačku radialne mreže, iz koje se napaja skup potrošača sa poznatim potrošnjama (stanjima) i referentnim naponima, može da se izračuna koristeći se izrazima (P4a) ili (P4b).

Referentni naponi električnih aparata iznose 100 % (nominalna vrednost). Referentni napon za skup električnih aparata (npr. onih u jednom domaćinstvu - NN potrošač) napajanih sa NN mreže, s napojnom tačkom na mestu gde je smešteno brojilo električne energije, teorijski može da se izračuna primenom izraza (P4). Ali, takav proračun praktično nije izvodljiv, s obzirom na ogroman broj NN potrošača i nepoznavanje pojedinačnih dijagrama potrošnje. Zato će ovde biti predloženo jedno aproksimativno, ali praktično moguće rešenje.

Situacija sa SN potrošačima je slična. SN potrošač, tretiran sa NN strane, sastoji se od skupa NN potrošača, priključenih na NN mrežu sekundara distributivnog transformatora. Iako njegov referentni napon ( $u_{SN}^r$ ),  $j=1,2,\dots,L$ , može biti teorijski izračunat primenom izraza (P4), takav jedan proračun takođe nije praktično izvodljiv. Zbog toga se referentni napon određuje empirijski (praktično). To se radi uzimajući u obzir sledeće dve činjenice: (I) referentni napon NN potrošača (SN potrošača tretiranog sa NN strane) koji je pod naponom, ali se nalazi praktično u praznom hodu, iznosi 100 % ; (II) kada se nalazi u stanju maksimalne potrošnje, iznosi 105 % (gornja dozvoljena granica za napon). Tada, referentni na-

pon, za svako stanje koje se nalazi između ova dva granična stanja, može da se izvede interpolacijom.

Kada se SN potrošač tretira sa SN strane distributivnog RTRBN, odgovarajući referentni napon se može izvesti na osnovu vrednosti referentnog napona sa NN strane [15]:

$$(u'_{SN})_j = (u'_{SN})'_j + \Delta u_j - b_j, \quad j=1,2,\dots,L, \quad (P5)$$

pri čemu je sa  $\Delta u_j$  označena relativna vrednost pada napona transformatora, a sa  $b_j$  relativna vrednost njegove naponske podrške. Očigledno je da postoji više vrednosti referentnog napona SN potrošača tretiranog sa SN strane, za jedinstveni referentni napon sa NN strane. Svaka vrednost odgovara jednoj vrednosti naponske podrške (jednom regulacionom otecpu) distributivnog RTRBN.

Opšti izraz (P4) može da se primeni za proračun referentnog napona izvora SN mreže (slika 1):

$$u^r = \sum_{j=1}^L C'_j i_j \cos \mathbf{q}_j [\nabla u_j + (u'_{SN})_j] / \sum_{j=1}^L C'_j i_j \cos \mathbf{q}_j \quad (P6)$$

odnosno, koristeći se sa (P5):

$$u^r = \frac{\sum_{j=1}^L C'_j i_j \cos \mathbf{q}_j [\nabla u_j + \Delta u_j - b_j + (u'_{SN})'_j]}{\sum_{j=1}^L C'_j i_j \cos \mathbf{q}_j}, \quad (P7a)$$

Za slične potrošače, kada važi  $C'_j = C'$ ,  $\cos \mathbf{q}_j = \cos \mathbf{q}$ ,  $j=1,2,\dots,L$ , referentni napon izvora iznosi:

$$u'_{SN} = \left\{ \sum_{j=1}^L [\nabla u_j + \Delta u_j - b_j + (u'_{SN})'_j] i_j \right\} / \sum_{j=1}^L i_j \quad (P7b)$$

## Prilog 2 - Kriterijum optimizacije

U ovom prilogu opisano je izvođenje izraza (2). Ovaj izraz se odnosi na ukupnu štetu koju trpe svi SN potrošači (cele SN mreže) usled odstupanja napona, u stacionarnom stanju trajanja  $t$ . Saglasno sa izrazom (1) ili (P1), ta šteta iznosi:

$$D = \sum_{j=1}^L C_j [u_j - (u'_{SN})_j]^2 E_j \quad (P8)$$

Kada se naponi potrošača  $u_j$  izraze preko napona izvora  $u$  i padova napona čvorova  $\nabla u_j$ ; referentni naponi  $(u'_{SN})_j$  izraze primenom (P5); električne energije potrošača  $E_j$  izraze preko napona aproksimiranih sa nominalnim vrednostima  $U'_{SN}$ , strujama  $i_j$ , faktorima snaga  $\cos \mathbf{q}_j$ ; i vremenom trajanja stacionarnog stanja  $t$ ; sve za  $j=1,2,\dots,L$ ; tada se izraz (P8) može formulisati u obliku (2).

## Prilog 3 - Dokaz Stava 1

Dva različita stacionarna stanja označena su superkriptima  $x$  i  $y$ ,  $x=1,2,\dots,M$ ,  $y=1,2,\dots,M$ ,  $x \neq y$ . Razlika odgovarajućih referentnih napona izvora može se izvesti koristeći se izrazom (P7b):

$$\begin{aligned} u'_{SN}^x - u'_{SN}^y &= \left\{ \sum_{j=1}^L [\nabla u_j^x + \Delta u_j^x - b_j + (u'_{SN})'_j] i_j \right\} / \sum_{j=1}^L i_j^x - \\ &\left\{ \sum_{j=1}^L [\nabla u_j^y + \Delta u_j^y - b_j + (u'_{SN})'_j] i_j^y \right\} / \sum_{j=1}^L i_j^y = \\ &= \left\{ \left[ \sum_{j=1}^L [\nabla u_j^x + \Delta u_j^x + b_j + (u'_{SN})'_j] i_j^x \right] / \sum_{j=1}^L i_j^x - \right. \\ &\left. \left[ \sum_{j=1}^L [\nabla u_j^y + \Delta u_j^y - b_j + (u'_{SN})'_j] i_j^y \right] / \sum_{j=1}^L i_j^y \right\} \\ &= \left\{ \left[ \sum_{j=1}^L b_j i_j^x \right] / \sum_{j=1}^L i_j^x - \left[ \sum_{j=1}^L b_j i_j^y \right] / \sum_{j=1}^L i_j^y \right\}. \quad (P9) \end{aligned}$$

Pošto relacije (4) važe za slične SN potrošače (definicija 1), izraz u poslednjim velikim zagradama u (P9) je nulte vrednosti. To je dokaz stava 1.

## 9. LITERATURA

- [1] D. W. Ross, J. Patton, A. I. Cohen, M. Carson: NEW METHODS FOR EVALUATING DISTRIBUTION AUTOMATION AND CONTROL (DAC) SYSTEMS BENEFITS; IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 6, June 1981, pp. 2978-2986.
- [2] M. Celik: INTEGRATION OF ADVANCED APPLICATIONS FOR DISTRIBUTION AUTOMATION; Panel Session: Distribution Systems Analysis Methods; Proceedings of IEEE WM '99, New York, pp. 366-369.
- [3] I. Roytelman: POWER FLOW, OPTIMIZATION AND FAULT CALCULATION METHODS; PANEL SESSION: DISTRIBUTION SYSTEMS ANALYSIS METHODS; Proceedings of IEEE WM '99, New York, pp. 370-373.
- [4] N. Katić, V. Strezoski: MV NETWORK POWER ANALYSIS BASED ON STATE ESTIMATION; DISTRIBUTECH EUROPE DA/DSM; London, UK, 1998, Track 3 - Operational Management Automation.
- [5] V. Strezoski et al.: SOFTVERSKI PAKET ZA ANALIZU I OPERATIVNO PLANIRANJE DISTRIBUTIVNIH MREŽA; Projekat realizovan za „EPS” JP „Elektrovojvodina”, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad; Novi Sad, Yugoslavia, 1998.
- [6] D. Shirmohammadi et al.: A COMPENSATION-BASED POWER FLOW METHOD FOR WEAKLY MESHED DISTRIBUTION AND TRANSMISSION NETWORKS; IEEE Trans. on PS; Vol. 3, No. 2, May 1988, pp. 753-761.
- [7] J.B.Bunch, R.D.Miller, J.E.Wheeler: DISTRIBUTION SYSTEM INTEGRATED VOLTAGE AND REACTIVE POWER CONTROL; IEEE Trans. on PAS, Vol. 101, No. 2, February 1982, pp. 284-289.
- [8] I.Roytelman, B.K.We, R.L.Lugtu: VOLT/VAR CONTROL ALGORITHM FOR MODERN DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEM; IEEE



- Trans. on PS; Vol. 10, No. 3, August 1995, pp. 1454-1460.
- [9] I. Roytelman, B. K. Wee, R. L. Lugtu, T. M. Kulas, T. Brossart: PILOT PROJECT TO ESTIMATE THE CENTRALIZED VOLT/VAR CONTROL EFFECTIVENESS; IEEE Trans. on PS, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 864-869.
- [10] J. J. Grainger, S. Civanlar: VOLT/VAR CONTROL ON DISTRIBUTION SYSTEMS WITH LATERAL BRANCHES USING SHUNT CAPACITORS AND VOLTAGE REGULATORS, PART I - THE OVERALL PROBLEM; IEEE Trans. on PAS; Vol. 104, No. 11, November 1995, pp. 3278-3283.
- [11] N. D. Hatzargyriou, T. S. Karakatsanis: DISTRIBUTION SYSTEM VOLTAGE AND REACTIVE POWER CONTROL BASED ON PROBABILISTIC LOAD FLOW ANALYSIS; IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.; Vol. 144, No. 4, July 1997, pp. 1454-1460.
- [12] Y. Sacher, G. Le Gal, B. Battaglia: VOLTAGE QUALITY AND REGULATION POLICY IN DISTRIBUTION NETWORKS; R.G.E.; July 1980, pp. 49-63.
- [13] R. Pelissier: LÉS RÉSEAUX D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE (Tome 1); Dunod; Paris, France, 1971.
- [14] V. Strezoski et al.: REGULACIJA NAPONA DISTRIBUTIVNIH MREŽA; Projekat realizovan za „EPS” JP „Elektrovojvodina”, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad; Novi Sad, Jugoslavija, 1992.
- [15] V. Strezoski: A NEW SCALING CONCEPT IN POWER SYSTEM ANALYSIS; IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.; Vol. 143, No. 5, September 1996, pp. 399-406.
- [16] E. Lakervi, E. Holmes: ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK DESIGN; Peter Peregrinus Ltd.; London, UK, 1998.
- [17] T. Gönnen: ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM ENGINEERING; McGraw-Hill Book Company; New York, USA, 1986.
- [18] T. J. E. Miller: REACTIVE POWER CONTROL IN ELECTRIC SYSTEMS; John Wiley and Sons; New York, USA, 1982.
- [19] \*\*\*: ELECTRONIC REGLER REG5A; Gossen GMBH, Erlangen, Germany, 1977.
- [20] V. Strezoski, N. Katić, D. Janjić: VOLTAGE CONTROL INTEGRATED IN DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEMS, Electric Power Systems Research, USA, 60 (2001) 85-97.

---

Rad je primljen u uredništvo 22. 05. 2002. godine

# Analiza formula za procenu gubitaka električne energije

Stručni rad  
UDK: 621.3.017

---

## Rezime:

U radu je izvršena analiza nekih najčešće korišćenih relacija za proračun gubitaka električne energije, baziranih na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka snage. Pokazano je da za tačnije određivanje ovog vremena treba, pored faktora opterećenja, znati i disperziju snage opterećenja. Pored toga, predložena je analitička relacija za modelovanje dijagrama trajanja opterećenja, zasnovana na korišćenju funkcije  $\arctg x$ , koja obuhvata mnogo veći spektar mogućih dijagrama u odnosu na često korišćene paraboličke zakonitosti. Simulacijom velikog broja dijagrama trajanja opterećenja određene su vrednosti ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage, kao i približne vrednosti korišćenjem uprošćenih postupaka. Na osnovu tih rezultata određene su oblasti primene pojedinih uprošćenih relacija, uz uslov da je greška koja se čini njihovom primenom manja od 5 %.

**Ključne reči:** gubici, električna energija, ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka snage, disperzija snage

---

## Abstract:

### ANALYSIS OF EQUATIONS APPLICATION ON ELECTRICAL ENERGY LOSSES ASSESSMENT

The analysis of some frequently used relations for power (electrical energy) losses assessment that are based on equivalent duration time of maximum losses is presented in this paper. It is explained that apart from the load factor, for more precise defining of this time, it is necessary to know the load dispersion. Furthermore, the analytical relation for modelling of the load-duration curve, based on the  $\arctg x$  function, is proposed. The proposed relation includes a wide spectrum of possible load curves as compared to the frequently used parabolic relations. The exact values of the equivalent time are calculated by simulation of a large number of the load duration curves, as well as approximate values by using of simplified methods. According to those results, areas of application of certain simplified relations have been defined, on condition that the error that is caused by their application is less than 5%.

**Key words:** losses, electrical energy, equivalent duration time of maximum losses, load dispersion

---

## 1. UVOD

Gubicima električne snage i energije u mrežama EES-a (elektroenergetskog sistema) dosta dugo se po-

svećuje značajna pažnja [1÷6]. Razlog za to leži u činjenici da gubici energije mogu da iznose desetak, pa i više procenata u odnosu na proizvedenu električnu energiju u EES-u, što znači da imaju važnu ulogu, ka-

ko kod planiranja bilansa energije tako i tokom eksploatacije EES-a. Kod analize gubitaka snage i energije nameće se niz zadataka, od kojih se kao osnovni mogu izdvojiti: tačnost određivanja ukupnih gubitaka, razdvajanje tehničkih od komercijalnih gubitaka, raspodela gubitaka po elementima mreže, lociranje mesta koja predstavljaju „žarišta” gubitaka, analiza uzroka gubitaka, izbor mera za smanjenje gubitaka itd.

Gubici snage i energije mogu se podeliti na dve osnovne kategorije: gubici koji zavise od napona i gubici koji zavise od struje. Pošto su promene napona relativno male, to se može smatrati da su gubici snage koji zavise od napona približno konstantni. Približna stalnost gubitaka snage omogućava veoma jednostavno određivanje gubitaka energije na godišnjem nivou.

Za razliku od gubitaka koji zavise od napona, određivanje godišnjih gubitaka energije koji zavise od struje nije uopšte jednostavno. Naime, gubici koji zavise od struje posledica su opterećivanja elementa mreže, pa je za njihovo tačno određivanje neophodno poznavanje dijagrama opterećenja za svaki element mreže. Jasno je da je ovo veliki zahtev, realno neostvarljiv, s obzirom na to da se merenja snage i energije vrše na određenim mestima u sistemu.

Pošto je nemoguće znati dijagrame opterećenja svakog elementa mreže, to su razvijeni postupci za približno određivanje gubitaka energije. Zavisno od toga koje uticajne veličine uzimaju u obzir, pri izračunavanju gubitaka energije, ovi postupci mogu biti deterministički ili probabilistički. Ovo su, ujedno, i dve osnovne grupe u koje se mogu svrstati postupci, odnosno metode za određivanje gubitaka energije. Pored toga, u okviru svake grupe moguća je podela na odgovarajuće podgrupe. Ilustracije radi, determinističke metode, koje danas nalaze primenu za proračun gubitaka u distributivnim mrežama, mogu se podeliti na: metode koje koriste ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka snage ( $\tau$ -metode), metode bazirane na srednjekvadratnoj struji, metoda ekvivalentne električne otpornosti [1]. Mnogobrojnost ovih metoda je, sa jedne strane, posledica davanja prednosti nekoj od veličina pomoću kojih se određuju gubici, a sa druge strane ona ukazuje na složenost zadatka određivanja gubitaka energije i nemogućnosti njegovog jedinstvenog rešenja.

Od navedenih metoda veliku primenu, naročito za proračun gubitaka u distributivnim mrežama, našle su metode bazirane na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka. One su relativno jednostavne i zahtevaju poznavanje dva podatka za razmatrani vremenski period (najčešće je to godina) do kojih se, uslovno rečeno, dolazi bez velikih poteškoća: maksimalne snage opterećenja i faktora opterećenja. Imajući ovo u vidu, odnosno jednostav-

nost ovih metoda, jasno je da u pojedinim slučajevima one mogu da daju vrednost gubitaka energije sa velikom greškom. Naime, lako se pokazuje da se za iste vrednosti maksimalne snage i faktora opterećenja mogu realizovati različiti dijagrami opterećenja, koji uslovljavaju i različite gubitke energije [4,5]. To je i razlog da postoji mnoštvo relacija koje daju vezu između faktora gubitaka, odnosno ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage i faktora opterećenja, nastalih kao rezultat analize različitih dijagrama opterećenja [1,2,3,4]. Pored navedenog, treba istaći da ova metoda u slučaju zatvorenih mreža daje rezultat sa velikom greškom, a njen nedostatak leži i u činjenici da se ona ne može primeniti za analizu strukture gubitaka.

Za svaki dijagram opterećenja, pored maksimalne snage i faktora opterećenja (a time i srednje snage), od interesa mogu biti odstupanja snage u određenim vremenskim trenucima od srednje snage (matematičkog očekivanja), kao i srednjekvadratna odstupanja, odnosno disperzija. Zbog toga, u ovom radu je razvijen postupak za određivanje ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage koji uvažava disperziju, odnosno „rasturanje” podataka o snagama opterećenja u odnosu na matematičko očekivanje (srednju vrednost snage opterećenja). Pored toga, ukazano je na mogućnost simulacije dijagrama trajanja opterećenja pomoću funkcije  $\arctg x$  i njene primene kod analize gubitaka energije. Rezultati do kojih se dolazi uvažavanjem disperzije upoređivani su sa rezultatima koji se dobijaju korišćenjem pojedinih jednostavnih, često upotrebljivanih formula i ukazano na granice u kojima je opravdana njihova primena.

## 2. KRATAK OSVRT NA NAJČEŠĆE KORIŠĆENE RELACIJE ZA ODREĐIVANJE EKVALENTNOG VREMENA TRAJANJA MAKSIMALNIH GUBITAKA SNAGE

Neke od relacija za ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka snage, koje se veoma često sreću kod izračunavanja godišnjih gubitaka električne energije su [1,3]:

$$\tau = (0,124 + 0,876 m)^2 T, \quad (1)$$

$$\tau = (0,17 m + 0,83 m^2) T, \quad (2)$$

$$\tau = (0,3 m + 0,7 m^2) T, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{m^2 (2 + m^2)}{1 + 2 m} T, \quad (4)$$

$$\tau = m^2 + \frac{1 - m^2}{9} T. \quad (5)$$

U ovim relacijama sa  $T$  je obeleženo vreme od jedne godine ( $T = 8\,760\text{ h}$ , odnosno  $T = 8\,784\text{ h}$  ako je godina prestupna), a sa  $m$  faktor opterećenja. Faktor opterećenja predstavlja odnos srednje  $P_{sr}$  i maksimalne  $P_{max}$  snage opterećenja. Relativno lako se pokazuje da se faktor opterećenja može izračunati i kao odnos ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnog opterećenja  $T_{max}$  i vremena trajanja opterećenja  $T$ . Imajući ovo u vidu, za  $m$  se može pisati:

$$m = \frac{P_{sr}}{P_{max}} = \frac{T_{max}}{T} . \quad (6)$$

Odnos ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage  $\tau$  i vremena  $T$  u relacijama (1)-(5) predstavlja faktor gubitaka  $\mu$  i može se izračunati i kao odnos srednje  $\Delta P_{sr}$  i maksimalne  $\Delta P_{max}$  snage gubitaka:

$$\mu = \frac{\tau}{T} = \frac{\Delta P_{sr}}{\Delta P_{max}} . \quad (7)$$

Kada je određeno ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka snage, za razmatrani vremenski period, gubici energije dobijaju se množenjem tog vremena i vrednosti maksimalne snage gubitaka:

$$\Delta W = \Delta P_{max} \tau . \quad (8)$$

Na osnovu dosadašnjeg izlaganja, može se konstatovati da je određivanje gubitaka električne energije korišćenjem pristupa baziranih na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka snage prilično jednostavno. Jednostavnost se ogleda i u činjenici da je od dijagrama opterećenja potrebno poznavati samo dva podatka ( $m$  i  $P_{max}$ ). Međutim, kako je u uvodu istaknuto, to je ujedno i slabost ovog pristupa, jer različiti dijagrami opterećenja mogu imati iste vrednosti maksimalne snage i faktora opterećenja. Pored toga, kao slabost se može istaći i činjenica da relacije (1)-(5) daju različite vrednosti vremena  $\tau$  za iste vrednosti faktora opterećenja  $m$ .

Zbog toga je u [3] izvršena analiza primene ovih relacija, u zavisnosti od oblika dijagrama opterećenja. Pri tome je, pored maksimalne snage i faktora opterećenja uzeta u obzir i minimalna vrednost snage opterećenja. Uvođenje ovog podatka u analizu omogućilo je znatno realnije sagledavanje uticaja oblika dijagrama opterećenja na vrednost gubitaka energije. Sličan pristup za uvažavanje oblika dijagrama opterećenja izložen je i u [4]. U ovom radu je ukazano i na činjenicu da koeficijent oblika dijagrama opterećenja u kombinaciji sa prethodnim podacima daje dobru informaciju o dijagramu opterećenja, ali i istaknuto da je njegovo određivanje na osnovu raspoloživih podataka skoro nemoguće.

### 3. UVAŽAVANJE OBLIKA DIJAGRAMA TRAJANJA OPTEREĆENJA PRI ODREĐIVANJU GUBITAKA ENERGIJE

Pošto dijagram opterećenja daje informacije o hronološkoj promeni snage potrošača (konzuma), to se njegovim detaljnim uvažavanjem mogu dobiti vrednosti gubitaka energije za koje se može reći da su tačne, ili bar približno tačne. Međutim, detaljno modelovanje dijagrama opterećenja i njegovo uvažavanje kod određivanja gubitaka energije može da dovede do modela koji se teško mogu primeniti u inženjerskoj praksi. Pokazuje se da je pogodnije, umesto stvarnog dijagrama, modelovati dijagram trajanja opterećenja, koji predstavlja dijagram ureden po dužini trajanja opterećenja.

Ako se takav dijagram, dobijen za vremenski period  $T$  podeli na  $n$  intervala, u toku kojih se opterećenje može smatrati konstantnim i uz pretpostavku da je faktor snage konstantan, za gubitke energije u odgovarajućem elementu se dobija:

$$\Delta W = c \sum_{k=1}^n P_k^2 t_k , \quad (9)$$

gde je:

$c$  - odgovarajuća konstanta,  
 $P_k$  - snaga opterećenja u toku  $k$ -tog intervala,  
 $t_k$  - vreme trajanja  $k$ -tog intervala.

Konstanta  $c$  u prethodnoj relaciji predstavlja odnos električne otpornosti razmatranog elementa  $R$ , kvadrata linijskog napona  $U$  koji deluje na krajevima tog elementa i faktora snage ( $c = R/(U \cos\varphi)^2$ ).

Snaga opterećenja u svakom intervalu može se posmatrati kao suma srednje snage  $P_{sr}$  (matematičkog očekivanja) i odgovarajućeg odstupanja  $\delta P$ , tj.:

$$P_k = P_{sr} + \delta P_k = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n P_k t_k + \delta P_k . \quad (10)$$

Pored odstupanja  $\delta P_k$ , dobru informaciju o obliku dijagrama opterećenja može da pruži i disperzija, koja predstavlja matematičko očekivanje kvadrata odstupanja snage opterećenja od srednje snage:

$$\delta_p^2 = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n (\delta P_k)^2 t_k . \quad (11)$$

Pomoću relacija (10) i (11) relacija (9) se svodi na sledeći oblik:

$$\Delta W = c T (P_{sr}^2 + \delta_p^2) , \quad (12)$$

što posle uvažavanja relacije (6) daje:

$$\Delta W = c P_{max}^2 \left[ \frac{T_{max}^2}{T} + T \frac{\delta_p^2}{P_{max}^2} \right] . \quad (13)$$

Upoređivanjem relacija (8) i (13), pri čemu treba imati u vidu da proizvod  $cP_{max}^2$  predstavlja gubitak snage pri maksimalnom opterećenju ( $\Delta P_{max} = cP_{max}^2$ ), lako se konstatuje da je:

$$\tau = \frac{T_{max}^2}{T} + T \frac{\delta_p^2}{P_{max}^2}, \quad (14)$$

odnosno

$$\tau = T \left( m^2 + \frac{\delta_p^2}{P_{max}^2} \right). \quad (15)$$

Relacija (15) pokazuje da ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka snage zavisi kako od faktora opterećenja tako i od disperzije.

### 3.1. Modelovanje dijagrama trajanja opterećenja parabolickim krivama

U slučajevima kada se dijagram trajanja opterećenja aproksimira analitičkim funkcijama oblika:

$$P_1(t) = k_{min} P_{max} + (1 - k_{min}) P_{max} \left( 1 - \frac{t^{k_1}}{T} \right), \quad (16)$$

odnosno

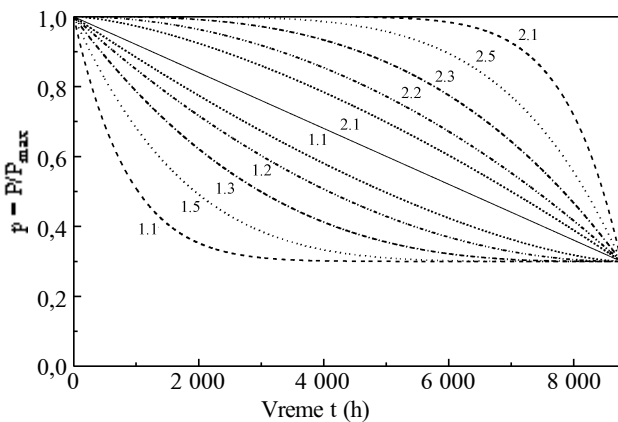
$$P_2(t) = P_{max} - (1 - k_{min}) P_{max} \frac{t^{k_2}}{T}, \quad (17)$$

kao što je urađeno u [1,3], dolazi se do relativno jednostavne relacije za određivanje ekvivalentnog vremena trajanja opterećenja:

$$\tau = \mu T. \quad (18)$$

Faktor gubitaka  $\mu$  za dijagrame trajanja opterećenja datih relacijom (16) je:

$$\mu = k_{min}^2 + 2 \frac{k_{min} (1 - k_{min})}{k_1 + 1} + \frac{(1 - k_{min})^2}{2k_1 + 1}, \quad (19)$$

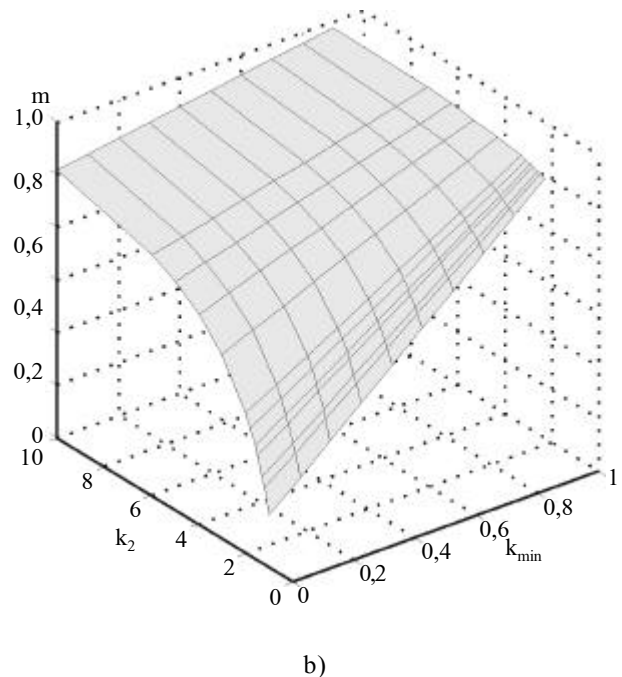
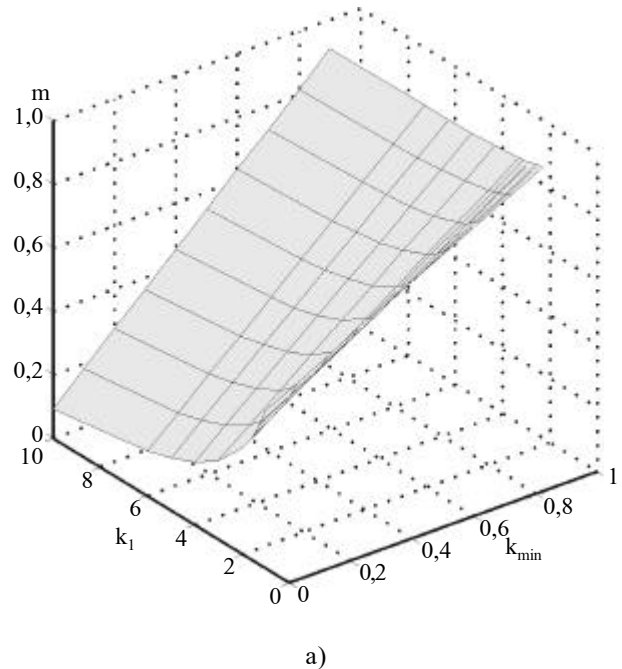


Slika 1. Godišnji dijagram trajanja opterećenja predstavljen parabolickom krivom za  $k_{min}=0,3$  i  $k_1=1,10$ , odnosno  $k_2=1,10$

dok je za dijagrame date relacijom (17)

$$\mu = 1 - 2 \frac{(1 - k_{min})}{k_2 + 1} + \frac{(1 - k_{min})^2}{2k_2 + 1}. \quad (20)$$

U relacijama (16) i (17), odnosno (19) i (20)  $k_{min}$  predstavlja odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja ( $k_{min} = P_{min} / P_{max}$ ), dok su  $k_1$  i  $k_2$  koeficijenti koji određuju strminu, tj. oblik krive trajanja opterećenja.

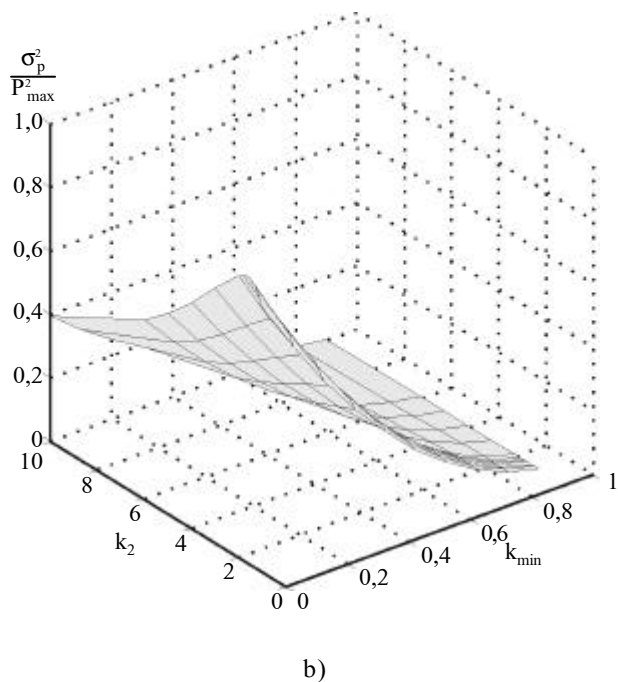
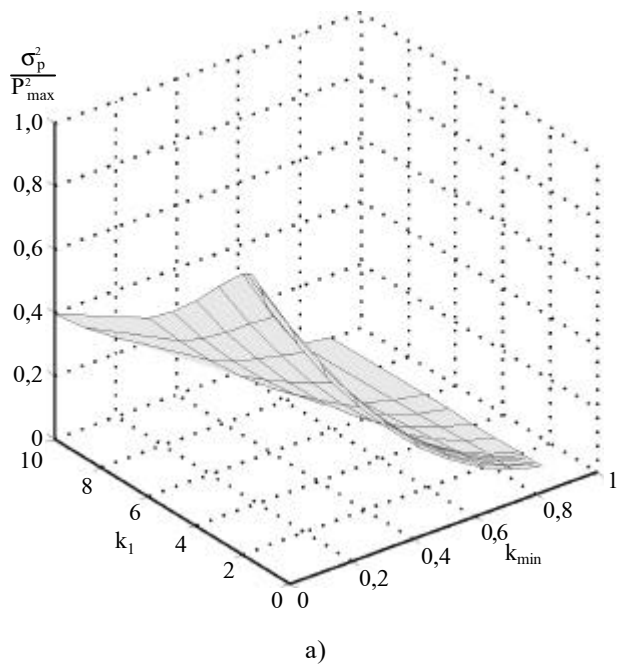


Slika 2. Faktor opterećenja u funkciji  $k_{min}$  i  $k_1$ , odnosno  $k_2$  prema a) relaciji (23), b) relaciji (24)

Za konkretno opterećenje koeficijenti  $k_1$  i  $k_2$  se mogu, prema [1], odrediti pomoću minimalne, srednje i maksimalne vrednosti snage opterećenja:

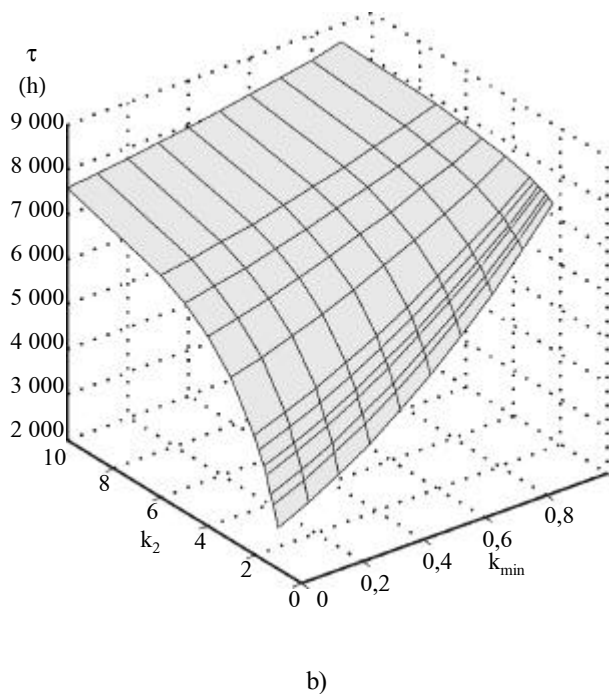
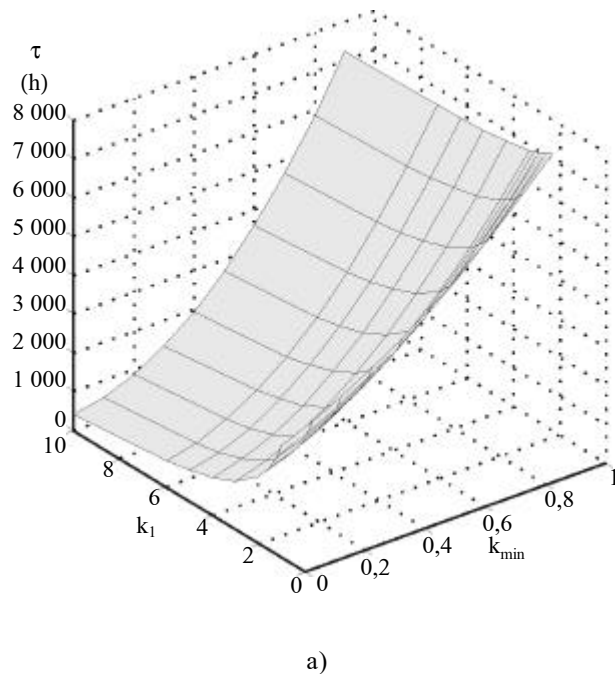
$$k_1 = \frac{P_{max} - P_{sr}}{P_{sr} - P_{min}}, \quad (21)$$

$$k_2 = \frac{P_{sr} - P_{min}}{P_{max} - P_{sr}}. \quad (22)$$



Slika 3. Disperzija u funkciji  $k_{min}$  i  $k_1$ , odnosno  $k_2$ :  
 a) za dijagram trajanja opterećenja dat relacijom (16),  
 b) za dijagram trajanja opterećenja dat relacijom (17)

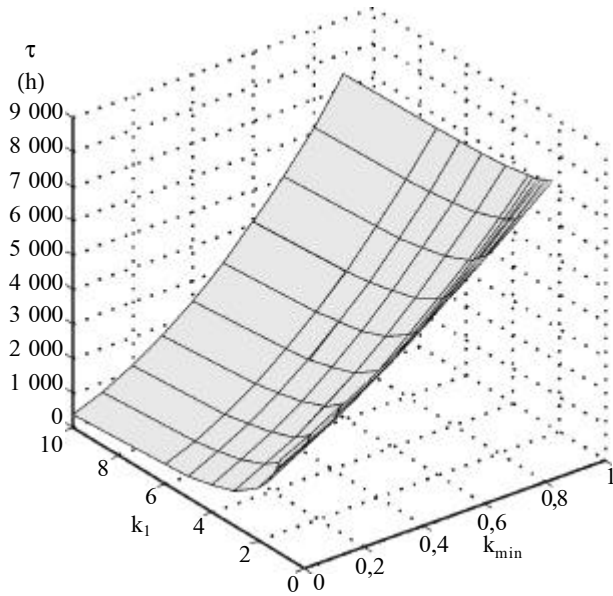
Ilustracije radi, na slici 4 je prikazana familija krivih trajanja opterećenja za  $k_{min}=0,3$  i vrednosti koeficijenata  $k_1$ , odnosno  $k_2$  u opsegu od 1 do 10. Krive 1.1 do 1.10 dobijene su pomoću relacije (16), a krive 2.1 do 2.10 pomoću relacije (17).



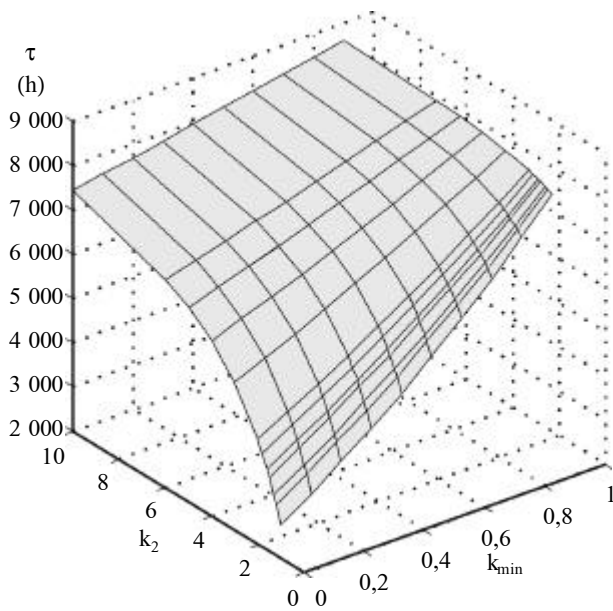
Slika 4. Zavisnost ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage od  $k_{min}$ ,  $k_1$  i  $k_2$  prema formuli (15) za dijagram trajanja dat:  
 a) relacijom (16), b) relacijom (17)

Ovde se, radi celovitosti izlaganja, navodi da je faktor opterećenja za navedene dijagrame:

$$m = k_{min} + \frac{1 - k_{min}}{k_1 + 1}, \quad (23)$$



a)



b)

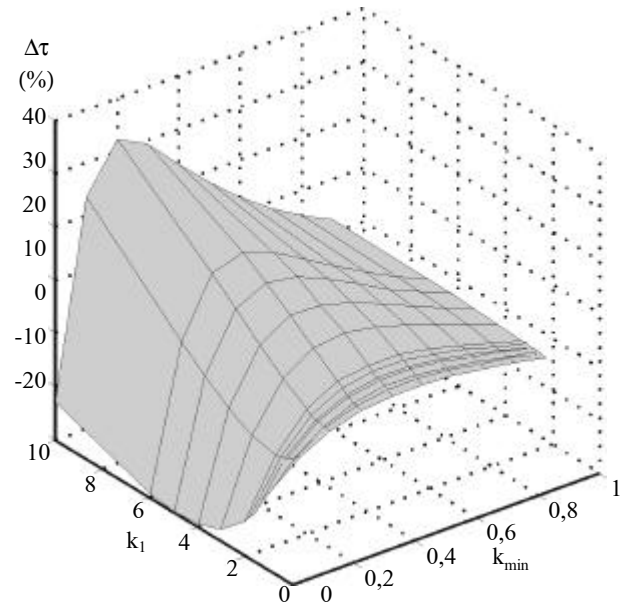
Slika 5. Zavisnost  $\tau$  od  $k_{min}$ ,  $k_1$  i  $k_2$  prema relaciji (1) za dijagram trajanja opterećenja dat: a) relacijom (16), b) relacijom (17)

odnosno

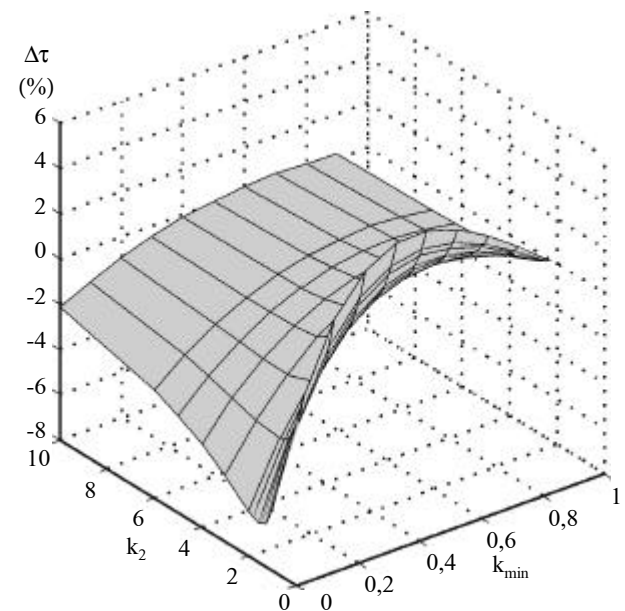
$$m = \frac{k_2 + k_{min}}{k_2 + 1}, \quad (24)$$

dok je disperzija:

$$\sigma_p^2 = (\mu - m^2)P_{max}^2. \quad (25)$$



a)



b)

Slika 6. Procentualna greška koja se čini primenom relacije (1), pri određivanju  $\tau$  za dijagram trajanja opterećenja dat: a) relacijom (16), b) relacijom (17)

Koristeći relacije (23)-(25) na slikama 2 i 3 su prikazane zavisnosti faktora opterećenja i disperzije od  $k_{min}$  i  $k_1$ , odnosno  $k_2$ . Kada su poznate ove zavisnosti moguće je za različite oblike dijagrama trajanja opterećenja ustanoviti promenu ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka za različite odnose minimalne, srednje i maksimalne snage opterećenja, tj. faktora  $k_{min}$ ,  $k_1$  i  $k_2$ . Ova zavisnost, dobijena pomoću relacije (15) prikazana je na slici 4.

Karakteristike prikazane na ovim slikama (slike 2, 3 i 4) mogu se smatrati tačnim, jer su dobijene analizom dijagrama trajanja opterećenja čiji je analitički oblik poznat.

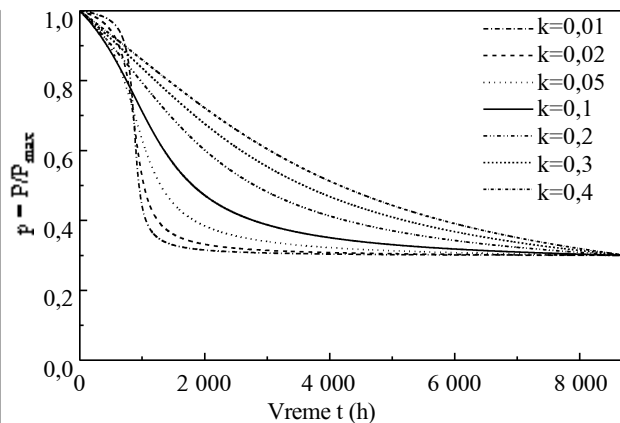
Da bi se ilustrovalo do kakvih grešaka može da dovede primena uprošćenih relacija, ovde je, na slici 5 prikazana zavisnost ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage od  $k_{min}$ ,  $k_1$  i  $k_2$  dobijena korišćenjem relacije (1). Upoređivanjem ovog grafika sa grafikom na slici 4, koji se smatra tačnim, moguće je odrediti kolika se greška čini korišćenjem relacije (1). Karakteristika relativne greške, za razmatrane slučajeve prikazana je na slici 6. Sa ove slike se vidi da, za pojedine vrednosti faktora  $k_{min}$  i  $k_1$ , greška koja se čini upotrebom relacije (1) može da bude i preko 30 %.

### 3.2. Modelovanje dijagrama trajanja opterećenja pomoću funkcije arctgx

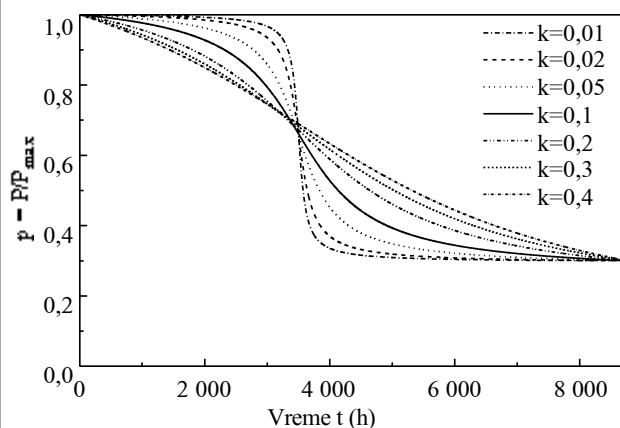
Pored relacija (16) i (17) dijagram trajanja opterećenja se može modelovati i drugim funkcijama. Ovde se samo napominje da je u literaturi dobro poznat slučaj modelovanja pomoću tri prave [7]. Autori ovog rada su, na osnovu velikog broja izvršenih simulacija, konstatovali da se dijagram trajanja opterećenja može dosta dobro aproksimirati analitičkom funkcijom oblika:

$$P(t) = k_{min} P_{max} + (1 - k_{min}) P_{max} \frac{\arctg \frac{1-t_s}{k} - \arctg \frac{t-t_s}{k}}{\arctg \frac{1-t_s}{k} - \arctg \frac{-t_s}{k}} \quad (26)$$

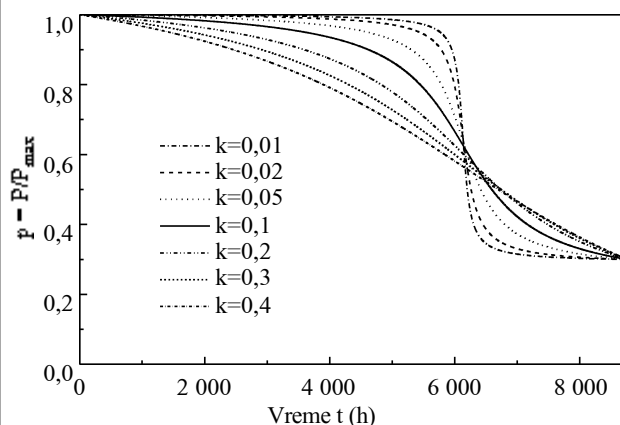
U ovoj relaciji  $k_{min}$  je, kao i kod relacija (16) i (17), odnos minimalne i maksimalne snage, dok su  $t_s$  i  $k$  odgovarajući koeficijenti. Simuliranjem velikog broja različitih dijagrama trajanja opterećenja autori su konstatovali da vrednost koeficijenta  $t_s$  treba birati iz opsega od 0 do 1, a koeficijenta  $k$  od 0 do 0,4. Više ilustracije radi, na slici 7 su prikazani dijagrami trajanja opterećenja, dobijeni pomoću relacije (26), za  $k_{min}=0,3$  i razne vrednosti koeficijenta  $t_s$  i  $k$ .



a)



b)



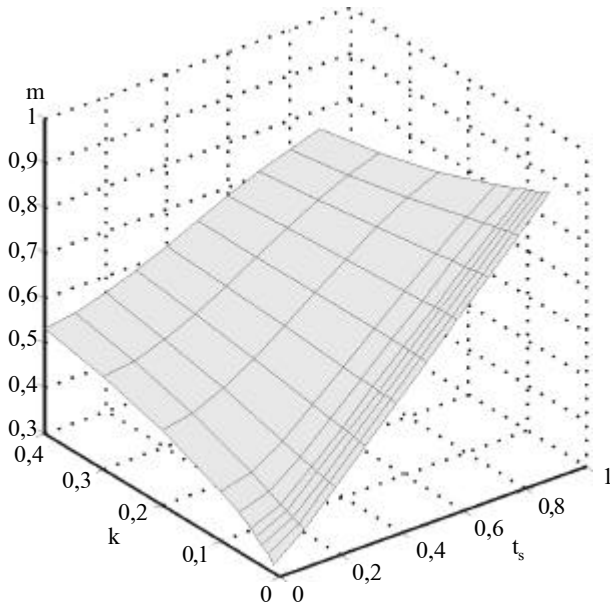
c)

Slika 7. Dijagrami trajanja opterećenja dobijeni pomoću relacije (26) za a)  $k_{min}=0,3$  i  $t_s=0,1$ , b)  $k_{min}=0,3$  i  $t_s=0,4$  i c)  $k_{min}=0,3$  i  $t_s=0,7$

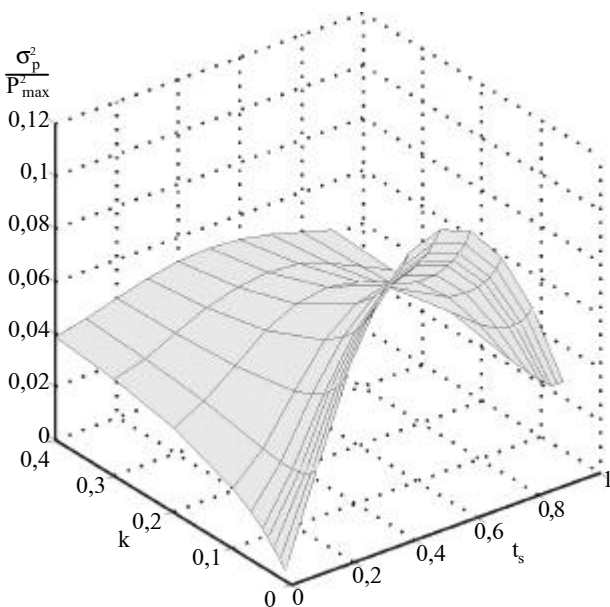
Promena faktora opterećenja sa promenom koeficijenta  $k$  i  $t_s$  pri  $k_{min}=0,3$ , za dijagrame trajanja opterećenja modelovanih relacijom (26), prikazana je na slici 8, dok je na slici 9 prikazana promena dis-



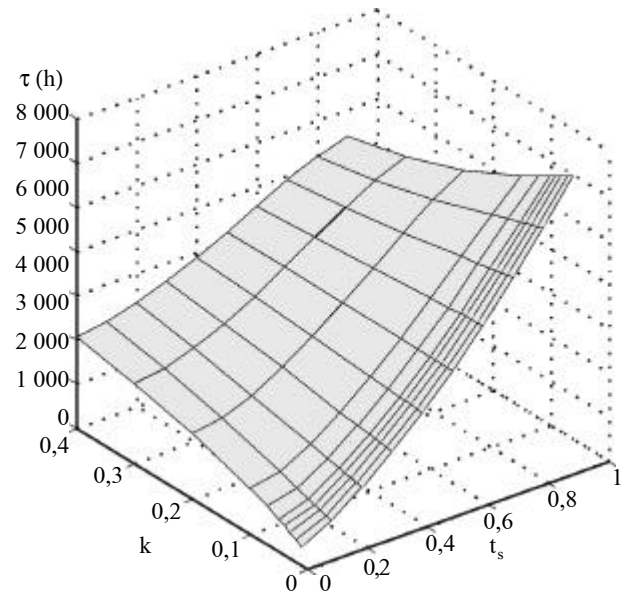
perzije. Pomoću ovih dijagrama može se, korišćenjem relacije (15), sagledati i promena ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage sa promenom koeficijenata  $k$  i  $t_s$ . Ova karakteristika je prikazana na slici 10.



Slika 8. Zavisnost faktora opterećenja  $m$  od  $k$  i  $t_s$  za  $k_{min}=0,3$

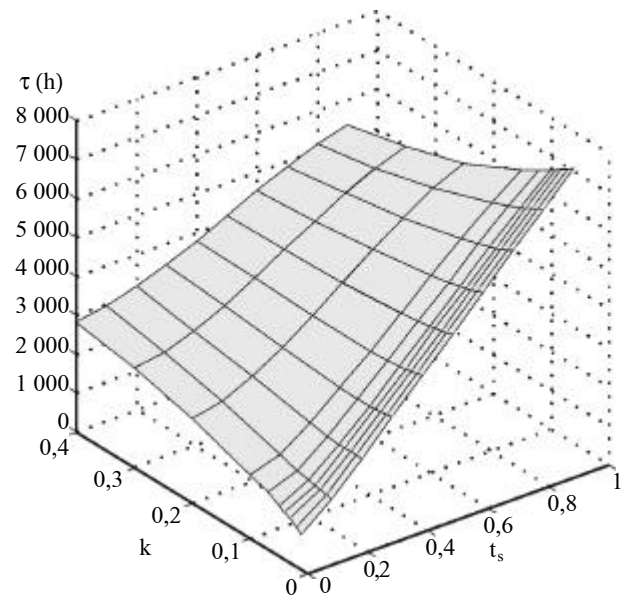


Slika 9. Zavisnost disperzije od  $k$  i  $t_s$  za  $k_{min}=0,3$

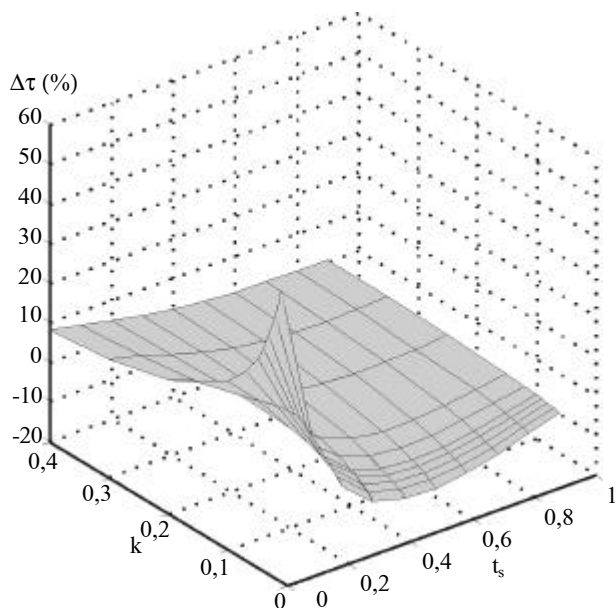


Slika 10. Zavisnost ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage od  $k$  i  $t_s$  dobijena pomoću relacije (15)

Da bi se sagledalo kolika se greška može učiniti korišćenjem uprošćenih relacija, na slici 11 je, za razmatrani dijagram trajanja opterećenja, prikazana zavisnost ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage od  $k$  i  $t_s$  dobijena pomoću relacije (1). Upoređenjem ove karakteristike sa karakteristikom prikazanom na slici 10, koja se može smatrati tačnom, određena je i procentualna greška, čija je zavisnost od koeficijenata  $k$  i  $t_s$  data na slici 12. Sa ove slike se vidi da za pojedine odnose  $k$  i  $t_s$  greška koja se čini upotrebom relacije (1) može da dostigne dosta visoke vrednosti.



Slika 11. Zavisnost  $t$  od  $k$  i  $t_s$  dobijena pomoću relacije (1)

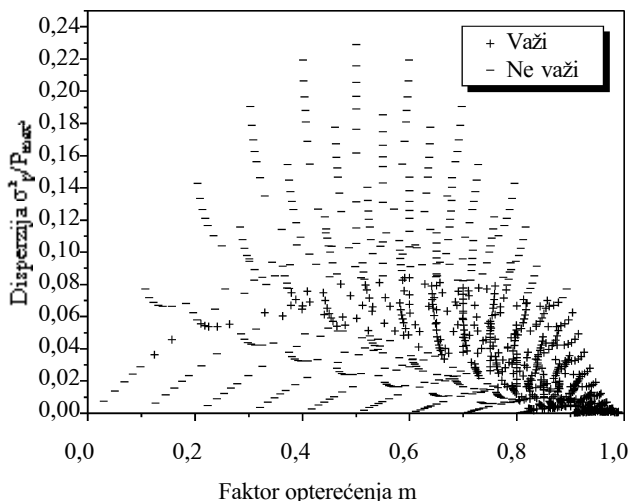


Slika 12. Procentualna greška koja se čini primenom relacije (1)

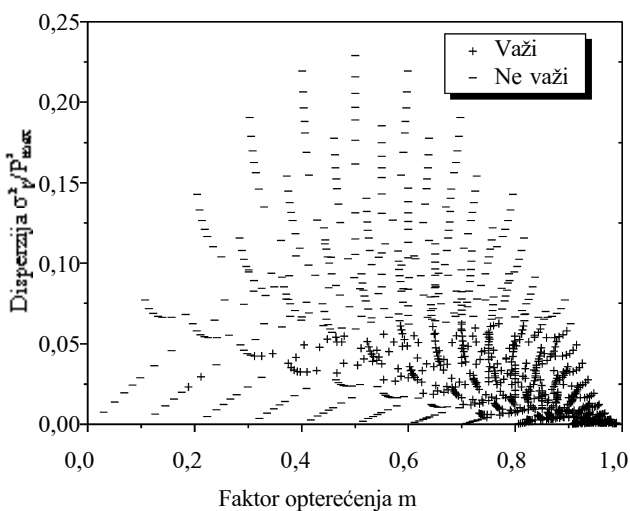
Zbog bolje preglednosti u tabeli 1 su date zavisnosti faktora opterećenja  $m$ , disperzije  $\sigma_p^2 / P_{max}^2$ , tačne vrednosti  $\tau$  i procentualne greške  $\Delta\tau$  % koja se čini upotrebom relacije (1) od  $k$  i  $t_s$  za  $k_{min}=0,3$ , za opterećenje čiji je dijagram trajanja modelovan relacijom (26). U tabeli je osenčan deo gde je greška koja se čini upotrebom relacije (1) u granicama  $\pm 5$  %. Ako se pretpostavi da su ovo granice u kojima je dozvoljeno da se nalazi greška, onda osenčani deo ukazuje na domen primenljivosti relacije (1). Jasno je da se za svaku vrednost odnosa minimalne i maksimalne snage može napraviti ovakva tabela. Ovde su, više ilustracije radi, u tabeli 2 date vrednosti procentualne greške  $\Delta\tau$  %, koja se čini upotrebom relacije (1), u funkciji od  $k$  i  $t_s$  za  $k_{min}=0,6$ . I u ovoj tabeli osenčani deo ukazuje na oblast primenljivosti relacije (1) uz uslov da greška ne bude izvan opsega  $\pm 5$  %.

U tabelama 1 i 2 prikazan je samo deo rezultata do kojih su autori došli simulacijom dijagrama trajanja opterećenja. Inače, simulacije su vršene varirajući odnos minimalne i maksimalne snage opterećenja od 0 do 1, pri čemu su za svaku vrednost  $k_{min}$  menjane vrednosti koeficijenta  $k$  i  $t_s$ . Za svaki dijagram trajanja opterećenja, dobijen na ovaj način, određivana je tačna vrednost ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage, kao i vrednosti do

kojih se dolazi primenom relacija (1)-(5). Iz mnoštva dobijenih vrednosti autori su se odlučili da deo rezultata proračuna prikažu pomoću dijagrama  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$ , tj. da se prikaže zavisnost disperzije relativne snage od faktora opterećenja.



Slika 13. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  i oblast primene relacije (1)



Slika 14. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  i oblast primene relacije (2)

Tabela 1.

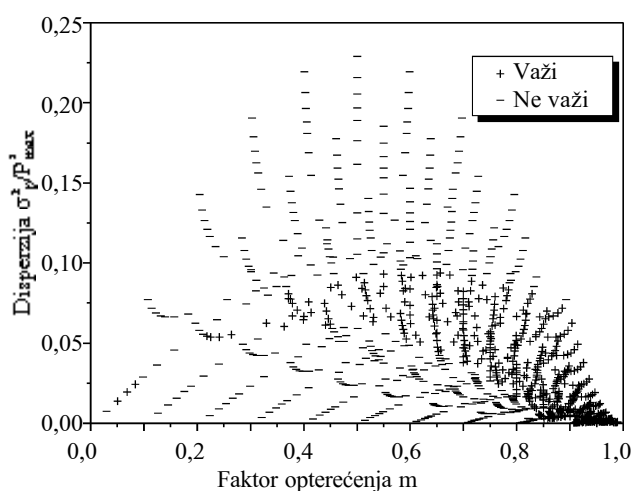
Zavisnost faktora opterećenja  $m$ , disperzije  $\sigma_p^2 / P_{max}^2$  tačne vrednosti  $\tau$  i procentualne greške  $\Delta\tau$  % koja se čini upotrebom relacije (1) od  $k$  i  $t_s$  za  $k_{min}=0,3$

$k_{min}=0,3$		$k$										
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	
$t_s$	0	$m$	0,3207	0,3353	0,3478	0,3589	0,3690	0,3869	0,4098	0,4661	0,5047	0,5330
		$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0037	0,0068	0,0095	0,0119	0,0141	0,0178	0,0223	0,0317	0,0365	0,0391
		(h)	933,4	1044,7	1143,1	1232,8	1315,9	1467,3	1666,7	2180,7	2551,4	2831,2
		%	53,86	46,32	40,82	36,57	33,14	27,94	22,61	13,81	10,04	8,04
	0,1	$m$	0,3751	0,3804	0,3861	0,3919	0,3979	0,4100	0,4279	0,4792	0,5169	0,5445
		$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0378	0,0352	0,0337	0,0329	0,0325	0,0325	0,0335	0,0378	0,0405	0,0418
		(h)	1563,5	1575,9	1600,7	1633,3	1671,2	1756,9	1897,0	2342,7	2694,9	2963,1
		%	14,75	16,23	16,90	17,12	17,04	16,38	14,90	10,58	8,14	6,76
	0,2	$m$	0,4431	0,4464	0,4498	0,4532	0,4568	0,4640	0,4752	0,5110	0,5407	0,5636
		$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0699	0,0653	0,0619	0,0593	0,0572	0,0540	0,0510	0,0470	0,0459	0,0452
		(h)	2333,0	2317,7	2314,5	2318,8	2328,5	2359,4	2424,4	2699,1	2962,5	3178,2
		%	- 1,49	0,265	1,56	2,56	3,35	4,48	5,45	6,04	5,60	5,16
0,3	$m$	0,5119	0,5139	0,5159	0,5180	0,5201	0,5244	0,5310	0,5532	0,5730	0,5889	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0933	0,0876	0,0832	0,0796	0,0766	0,0716	0,0661	0,0560	0,0512	0,0485	
	(h)	3113,1	3080,9	3060,6	3047,7	3040,1	3036,2	3049,5	3171,5	3324,3	3462,8	
	%	- 7,79	- 6,26	- 5,06	- 4,06	- 3,20	- 1,81	- 0,28	2,32	3,24	3,58	
0,4	$m$	0,5809	0,5819	0,5828	0,5838	0,5848	0,5868	0,5900	0,6006	0,6103	0,6184	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,1074	0,1012	0,0963	0,0922	0,0886	0,0827	0,0759	0,0621	0,0550	0,0508	
	(h)	3897,3	3852,1	3818,8	3792,7	3771,8	3741,0	3713,6	3704,1	3744,9	3795,5	
	%	- 9,97	- 8,68	- 7,64	- 6,75	- 5,98	- 4,67	- 3,13	- 0,04	1,48	2,3	
0,5	$m$	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,1122	0,1057	0,1006	0,0964	0,0927	0,0865	0,0792	0,0643	0,0563	0,0517	
	(h)	4683,6	4627,3	4582,8	4545,3	4512,8	4458,5	4394,9	4264,3	4194,7	4153,6	
	%	- 10,07	- 8,98	- 8,09	- 7,34	- 6,67	- 5,53	- 4,17	- 1,23	0,41	1,40	
0,6	$m$	0,7191	0,7181	0,7172	0,7162	0,7152	0,7132	0,7100	0,6994	0,6897	0,6816	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,1074	0,1012	0,0963	0,0922	0,0886	0,0827	0,0759	0,0621	0,0550	0,0508	
	(h)	5470,8	5404,3	5349,1	5300,7	5257,2	5180,0	5080,9	4829,4	4648,3	4514,3	
	%	- 8,99	- 8,07	- 7,33	- 6,69	- 6,14	- 5,19	- 4,05	- 1,56	- 0,08	0,89	
0,7	$m$	0,7881	0,7861	0,7841	0,7820	0,7799	0,7756	0,7690	0,7468	0,7270	0,7111	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0933	0,0876	0,0832	0,0796	0,0766	0,0716	0,0661	0,0560	0,0512	0,0485	
	(h)	6258,1	6181,0	6114,7	6054,8	5999,3	5897,2	5759,0	5375,4	5078,9	4854,1	
	%	- 7,17	- 6,41	- 5,81	- 5,3	- 4,86	- 4,11	- 3,23	- 1,32	- 0,14	0,68	
0,8	$m$	0,8569	0,8536	0,8502	0,8468	0,8432	0,8360	0,8248	0,7890	0,7593	0,7364	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0699	0,0653	0,0619	0,0593	0,0572	0,0540	0,0510	0,0470	0,0459	0,0452	
	(h)	7044,3	6954,7	6874,8	6800,4	6729,6	6595,3	6406,7	5865,9	5453,0	5147,0	
	%	- 4,88	- 4,28	- 3,82	- 3,45	- 3,13	- 2,60	- 2,01	- 0,76	0,05	0,68	
0,9	$m$	0,9249	0,9196	0,9139	0,9081	0,9021	0,8900	0,8721	0,8208	0,7831	0,7555	
	$\frac{\sigma_p^2}{P_{max}^2}$	0,0378	0,0352	0,0337	0,0329	0,0325	0,0325	0,0335	0,0378	0,0405	0,0418	
	(h)	7825,5	7715,5	7612,1	7512,0	7414,0	7224,0	6956,0	6232,3	5727,0	5367,0	
	%	- 2,295	- 1,9	- 1,62	- 1,40	- 1,23	- 0,97	- 0,70	- 0,11	0,36	0,8	

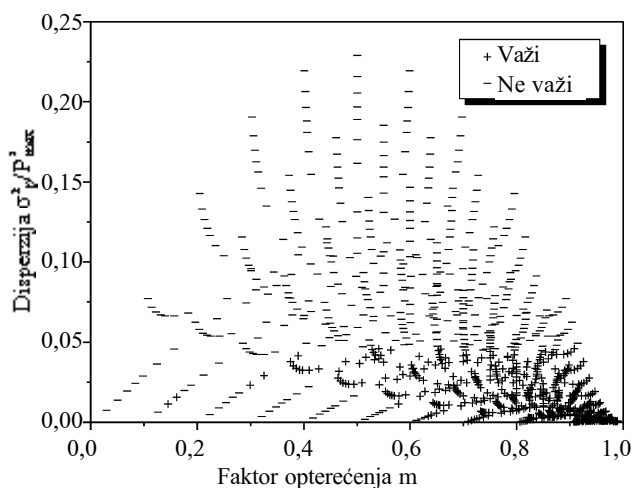
Tabela 2.

Zavisnost procentualne greške  $\Delta\tau$  %, koja se čini upotrebom relacije (1), od  $k$  i  $t_s$  za  $k_{min}=0,6$ .

		$k$									
$k_{min}=0,6$		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4
$t_s$	0	15,98	15,1	14,37	13,75	13,20	12,27	11,17	8,8502	7,53	6,7
	0,1	10,94	11	10,96	10,85	10,70	10,35	9,76	8,08	6,98	6,27
	0,2	6,67	6,93	7,09	7,2	7,26	7,31	7,26	6,69	6,1	5,64
	0,3	3,74	4,06	4,29	4,48	4,62	4,85	5,05	5,21	5,09	4,92
	0,4	1,79	2,11	2,37	2,58	2,75	3,04	3,37	3,93	4,14	4,21
	0,5	0,54	0,86	1,10	1,31	1,5	1,80	2,17	2,92	3,33	3,57
	0,6	-0,17	0,12	0,35	0,55	0,72	1,02	1,38	2,19	2,69	3,04
	0,7	-0,48	-0,22	-0,02	0,16	0,32	0,59	0,92	1,7	2,24	2,63
	0,8	-0,47	-0,26	-0,08	0,07	0,2	0,42	0,71	1,41	1,94	2,35
	0,9	-0,23	-0,06	0,07	0,18	0,28	0,46	0,68	1,3	1,79	2,18



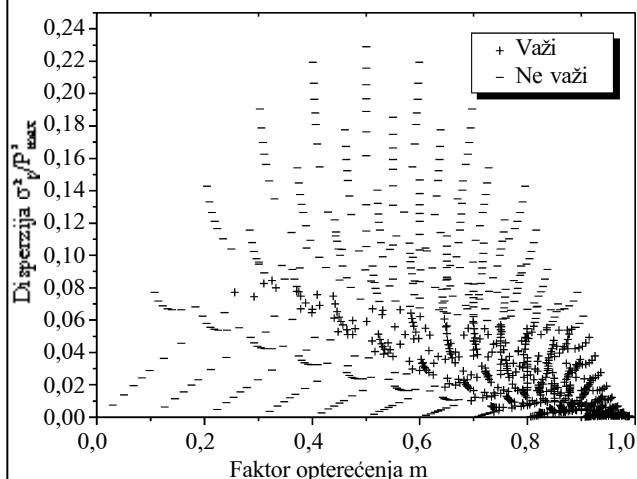
Slika 15. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  i oblast primene relacije (3)



Slika 16. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  i oblast primene relacije (4)

Na slikama 13÷17 prikazane su tačke kojima odgovaraju određene vrednosti faktora opterećenja i

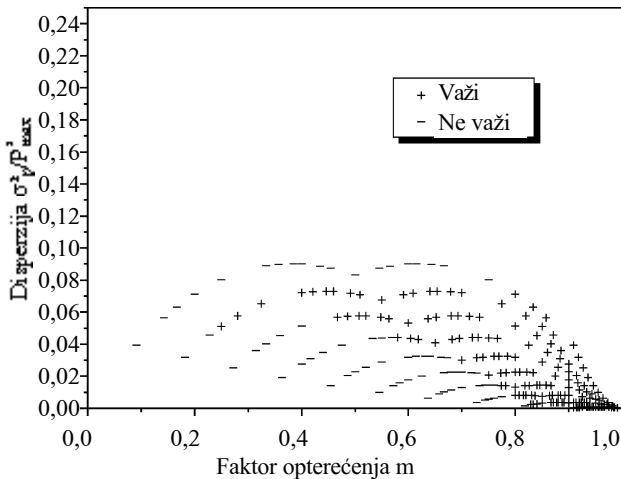
dispersije. Treba primetiti da svakoj tački odgovara jedan dijagram trajanja opterećenja. Na ovim dijagramima pojedine tačke su obeležene sa +. Za ove tačke, odnosno dijagrame trajanja opterećenja kojima one odgovaraju, razlike između tačne vrednosti ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage i vrednosti dobijene primenom odgovarajuće uprošćene formule su manje od 5 % (nalaze se u granicama  $\pm 5$  %). Ako se kao prihvatljive vrednosti za inženjersku praksu (koje se dobijaju primenom uprošćenih formula) odaberu one čija greška nije veća od 5 % onda tačke obeležene sa + na slikama 13÷17 određuju oblast primene svake od uprošćenih relacija (1)÷(5).



Slika 17. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  i oblast primene relacije (5)

Na osnovu ovog može se konstatovati da je primena uprošćenih relacija (1), (3) i (5) opravdana kada je dispersija, tj. odnos  $\sigma_p^2 / P_{max}^2$  manji od 0,08, što se i vidi sa slika 13, 15 i 17. Sa slika 14 i 16 se vidi da u slučajevima kada je odnos  $\sigma_p^2 / P_{max}^2$  manji od 0,05 zadovoljavajuće rezultate daju i relacije (2) i (4). S

obzirom na činjenicu da se u inženjerskoj praksi mnogo više koristi faktor opterećenja, kao i da je za izračunavanje disperzije snage potrebno poznavati ceo dijagram opterećenja, to je poželjno odrediti mogućnost primene uprošćenih relacija u zavisnosti od vrednosti faktora opterećenja. Na osnovu izvršene analize rezultata, prikazanih na slikama 13÷17 autori konstatuju da je za vrednosti faktora opterećenja iznad 0,8 opravdana primena bilo koje od navedenih uprošćenih relacija, dok je za vrednosti  $m$  u opsegu  $0,6 < m < 0,8$  moguća primena relacija (1) i (3).



Slika 18. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  za dijagrame opterećenja date relacijama (16) i (17) i oblast primene relacije (1)

Na slici 18 su prikazane tačke kojima odgovaraju određene vrednosti faktora opterećenja i disperzije kada se dijagrami trajanja opterećenja modeluju parabolčkim krivama i istaknuta oblast primene relacije (1), pod uslovom da greška koja se čini njenom primenom ne bude veća od 5%. Međutim, ovde treba primetiti da parabolčke funkcije daju dijagrame trajanja opterećenja čija je disperzija mala, pa zbog toga većina uprošćenih relacija daje zadovoljavajuće rezultate. Sa slika 13÷18 lako se može konstatovati da relacija (26) daje mnogo veći spektar oblika dijagrama trajanja opterećenja u poređenju sa relacijama (16) i (17). To znači da su i zaključci do kojih se dolazi analizom ove relacije opštiji i da u sebi praktično sadrže zaključke koji slede iz relacija (16) i (17).

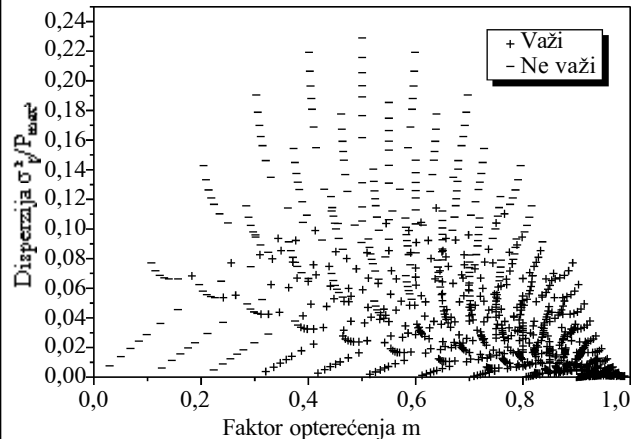
Pored toga, treba primetiti da parabolčke krive omogućavaju egzaktno određivanje ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka. Pomoću relacija (18)÷(24) lako se pokazuje da je u slučajevima kada je  $m \leq \frac{1+k_{min}}{2}$  ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka:

$$\tau = \frac{2mk_{min} - 2m^2k_{min} - k_{min} + m}{2 - m - k_{min}} T, \quad (27)$$

dok je za  $m \geq \frac{1+k_{min}}{2}$ :

$$\tau = \frac{k_{min}^2 - 2mk_{min} - mk_{min}^2 + 2m^2}{1 + m - 2k_{min}} T, \quad (28)$$

Jedini uslov koji se postavlja za primenu relacija (27) i (28) je da se, pored faktora opterećenja, poznaje i odnos minimalne i maksimalne snage.



Slika 19. Zavisnost  $\sigma_p^2 / P_{max}^2 = f(m)$  za dijagrame opterećenja date relacijom (26) i oblast primene relacija (27) i (28)

U kojoj meri je moguća primena relacija (27) i (28) kada se simulacija dijagrama trajanja opterećenja vrši pomoću relacije (26) može se sagledati na slici 19. Vidi se da ove relacije obuhvataju veliki broj dijagrama trajanja opterećenja, pa se može konstatovati da je primena relacija (27) i (28) opravdana u skoro svim slučajevima koje se sreću u praksi, uz uslov da je, pored faktora opterećenja, poznat i odnos minimalne i maksimalne snage.

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da za tačnije određivanje ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage treba, pored faktora opterećenja, poznavati i disperziju, koja sadrži informaciju o odstupanju snage opterećenja od njene srednje vrednosti. Pored toga, ukazano je na to da je za modelovanje dijagrama trajanja opterećenja pogodno koristiti relaciju baziranu na korišćenju funkcije arctgx.

Analizom širokog spektra dijagrama trajanja opterećenja, određene su vrednosti ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage (sa uvažavanjem disperzije) i vrednosti koje se dobijaju primenom uprošćenih relacija. Na osnovu toga, utvrđene su i oblasti primene pojedinih uprošćenih relacija. Relacije koje su u radu obeležene brojevima (1), (5) treba koristiti kada je faktor opterećenja iznad 0,8, dok za njegove vrednosti između 0,6 i 0,8 treba kori-

stiti relacije (1) i (3). Kada je faktor opterećenja ispod 0,6 svaka od navedenih relacija (1) i (5) daje zadovoljavajuće rezultate u određenom veoma uskom opsegu disperzije snage. Sa praktične strane, ovo ukazuje na to da treba izbegavati korišćenje relacija (1) i (5), kada je faktor opterećenja ispod 0,6 i gubitke električne energije računati na neki drugi način. U slučajevima kada je pored faktora opterećenja, poznat i odnos minimalne i maksimalne snage opravdana je primena relacija (27) i (28).

## 5. LITERATURA

- [1] Воротницкий В. Э., Железко Ю. С., Казанцев В. Н., Пекслис В. Г., Файбисович Д. Л., ПОТЕРИ ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ, Энерго-атомиздат, Москва, 1983.
- [2] Зельцбург Л. М., Карнова Э. Л., О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОДОВЫХ НАГРУЗИЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРО ЭНЕРГИЙ Электричество, No 11, стр. 49-52, 1985.
- [3] Kostić M., OCENA TAČNOSTI I IZBOR FORMULA ZA PRORAČUN GUBITAKA U ELEKTRIČNIM MREŽAMA, „Elektroprivreda” br. 1, str. 65-75, 2000.
- [4] Turković M., Minić S., Radović G., Turković E., UVAŽAVANJE KONFIGURACIJE DIJAGRAMA OPTEREĆENJA PRI PRORAČUNU GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Etran, Bukovička Banja, 4-7. jun 2001.
- [5] Арзаманцев Д. А., Липес А. В., СНИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, Высш. шк., Москва, 1989.
- [6] Железко Ю. С., ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, Электричество, No 2, стр 19-22, 1975.
- [7] Čalović M., Sarić A., EKSPLOATACIJA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, Veopres, Beograd, 1999.

---

Rad je primljen u uredništvo 10. 02. 2002. godine

# Postupak za proračun i analizu ukupnih marginalnih efekata kompenzacije reaktivnih snaga

Originalni naučni rad  
UDK: 621.3.016.25

---

*Rezime:*

*U radu se predlaže postupak za proračun i analizu ukupnih marginalnih efekata kompenzacije reaktivnih snaga u električnim mrežama elektroenergetskog sistema. Novost je u činjenici da su parcijalni i ukupni marginalni efekti izraženi u funkciji jediničnih ekonomskih troškova ( $T_{1ec}$ ) i relativnih vrednosti gustine struje ( $J/J_{ec}$ ) elemenata mreže.*

**Ključne reči:** *marginalni efekti kompenzacije, ekonomski presek voda, ekonomska gustina struje, smanjenje gubitaka snage, oslobađanje kapaciteta*

---

*Abstract:*

*A METHOD FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF TOTAL MARGINAL EFFECTS OF REACTIVE POWER COMPENSATION*

*A new method for calculation and analysis of total marginal effects of reactive power compensation in the electric power system, is presented in this paper. The novelty is in the fact that partial and total marginal effects are expressive as functions of unit economic cost ( $T_{1ec}$ ) and current density relative values ( $J/J_{ec}$ ).*

**Key words:** *marginal effect of compensation, economic conductor area, economic current density, power losses decreasing, release power system capacity*

---

## 1. UVOD

Kada određeni potrošač sprovede kompenzaciju reaktivne energije tako da (prirodnu) vrednost faktora snage  $\cos\varphi = 0,80$  poveća na vrednost  $\cos\varphi = 0,95$  (ili vrednost  $\tan\varphi = 0,60$  smanji na  $\tan\varphi = 0,33$ ), u distributivnoj trafostanici i napojnom vodu višeg napona se vrednost reaktivnih opterećenja smanji tek za koji procenat. Odgovarajuća smanjenja reaktivnih opterećenja u distributivnoj mreži sledećeg naponskog nivoa se mere delovima procenta, dok u prenosnoj mreži ove promene iznose tek neki deo promila. Radi se o tzv. marginalnim promenama reaktivnih opterećenja.

Navedena (marginalna) smanjenja reaktivnih opterećenja dovode do odgovarajućih smanjenja u gubicima snage i do rasterećenja mreže i oslobađanja kapaciteta elemenata elektroenergetskog sistema za nove potrošače. Radi se o tzv. marginalnim efektima kompenzacije reaktivnih snaga. Za datu mrežu i elektroenergetski sistem (EES), pomenuti marginalni efekti su veći [1–4]:

- što su opterećenja i odgovarajući gubici snage ( $P_{Cu}$ ) veći i
- što su vrednosti faktora snage ( $\cos\varphi$ ) u EES manje.

---

*Dr Miloje Kostić, dipl. ing. – Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11000 Beograd, Koste Glavinića 8a*

Očigledno je da su troškovi prenosa reaktivnih opterećenja do posmatranog potrošača jednaki po vrednosti tako definisanim marginalnim efektima kompenzacije, i na osnovu njih bi trebalo određivati cenu reaktivne energije u tarifnom sistemu.

Metode i postupci za proračun marginalnih efekata kompenzacije se široko izlažu u literaturi, npr. [1–4], ali se najčešće posebno vrši proračun efekata:

- 1) po osnovu smanjenja gubitaka snage i energije,
- 2) po osnovu oslobađanja elemenata EES za nove potrošače i
- 3) po osnovu povećanja napona u mreži.

Pri utvrđivanju ukupnih efekata se uzima u obzir samo jedan od efekata koji je dominantan u razmatranom slučaju, npr. po osnovu oslobađanja kapaciteta, ili se aritmetički saberu efekti po sve tri osnove [1]. Po pravilu to nije tačno, jer se kompenzacijom, u cilju oslobađanja kapaciteta smanjuju i gubici snage koji odgovaraju prvobitnom opterećenju, ali je to smanjenje manje u odnosu na slučaj kad nije bilo priključka novih potrošača. Efekti po osnovu povećanja napona u mreži se takođe mogu kvantifikovati pomoću efekata pod (1) i (2), na osnovu razmatranja u [4]. Dalji doprinos bi mogao biti u ideji da se marginalni efekti po osnovu smanjenja gubitaka snage izraze preko troškova za gubitke snage i energije pri ekonomskim gustinama struje, a da se marginalni efekti po osnovu oslobađanja preseka voda izraze preko troškova mreže pri ekonomskom preseku voda, kada su obe vrste navedenih baznih troškova iste po vrednosti.

## 2. UKUPNI MARGINALNI EFEKTI KOMPENZACIJE REAKTIVNIH SNAGA

U radovima [1–4] dati su izrazi za proračun marginalnih efekata kompenzacije reaktivnih snaga, i to:

1. po osnovu smanjenja gubitaka snage

$$dP_{CuQ} / dQ_C = 2tgj \cdot P_{CuP} \quad (1a)$$

$$dP_{Cu} Q / dQ_C = 2sinj \cdot cosj P_{Cu} \quad (1b)$$

2. po osnovu oslobađanja kapaciteta mreže i elemenata EES

$$dS / dQ_C = sinj \quad (2a)$$

$$dP / dQ = tgj \quad (2b)$$

gde su relativni gubici snage  $p_{CuP} = P_{CuP} / P$  i  $p_{Cu} = (P_{CuP} + P_{CuQ}) / P$ .

U [4] su dati izrazi koji omogućavaju da se efekti po osnovu povećanja napona izraze preko do-

datnih efekata po osnovu (1) i (2), pošto porast napona u mreži ( $DU_C$ ) dovodi:

- do smanjenja marginalnih gubitaka snage za iznos

$$\frac{dP_{DU_C}}{dQ_C} = [2(x/r) \cdot P_{CuP}] P_{Cu} \quad (3)$$

- i do povećanja marginalnih kapaciteta EES za iznos

$$\frac{dS_{DU_C}}{dQ_C} = (x/r)(1/cosj) \cdot P_{cup} (kVA/k var) \quad (4)$$

Ukupni (totalni) marginalni efekti po osnovu smanjenja gubitaka snage se moraju izraziti, na osnovu izraza (1) i (3), kao

$$\left. \frac{dP_{CuQ}}{dQ_C} \right|_T = 2tgj \cdot P_{CuP} (1 + K_U) \quad (5)$$

a ukupni marginalni efekti po osnovu oslobađanja kapaciteta EES, na osnovu izraza (2) i (4), kao

$$\left. \frac{dS_{Q_C}}{dQ_C} \right|_T = sinj \cdot (1 + K_U) \quad (6)$$

gde se koeficijent  $K_U$ , koji kvantifikuje efekte po osnovu povećanja napona, izračunava po izrazu

$$K_U = \frac{2(x/r) \cdot P_{CuP}}{2 \cdot sinj \cdot cosj} \quad (7)$$

U slučaju da je uticaj povećanja napona mali ( $K_U \approx 0$ ), izrazi (5) i (6) se svode na izraze (1) i (2) koji su poznati u literaturi. Za kablovske mreže su vrednosti koeficijentata  $K_U$  male ( $\leq 0,05$ ), zbog niskih vrednosti  $P_{CuP}$  i odnosa  $x/r$ , ali su vrednosti  $K_U > 0,5$  kada su u pitanju vazdušne mreže većih vrednosti karakteristika  $x/r$ ,  $P_{CuP}$ .

## 3. EKONOMSKI PRESECI, EKONOMSKE GUSTINE STRUJA I TROŠKOVI

Ekonomski presek voda ( $A_{ec}$ ), koji odgovara ekonomskoj gustini struje  $J_C = I / A_{ec}$  je ona vrednost preseka za koju su svedeni godišnji (i ukupni) troškovi za izgradnju i eksploataciju najmanji. Pogodno ih je razdeliti na dve vrste troškova:

- troškove za gubitke energije u vodu ( $T_{Wcu}$ ) i
- sve ostale troškove (investicionog kapitala, amortizacije, investicionog i tekućeg održavanja) -  $T_i$ .

Kada se pretpostavi da su ovi drugi troškovi ( $T_i$ ) direktno proporcionalni preseku voda ( $A$ ), što je približno tačno, onda su, pri ekonomskim vrednostima preseka (time i ekonomskih gustina struja), obe vrste pomenutih troškova jednake po vrednosti i nazivaju se ekonomskim troškovima ( $T_{ec}$ ), tj.:



$$T_{i,ec}=T_{Wcu,ec}=T_{ec} \quad (8)$$

U zavisnosti od relativnih vrednosti gustina struja ( $J/J_{ec}$ ) u vodovima mreže, menjaju se navedeni troškovi:

$$T_i=T_{ec}(A/A_{ec})=T_{ec}(J_{ec}/J) \quad (9)$$

$$T_{Wcu}=T_{ec}(J/J_{ec})^2 \quad (10)$$

kao i njihov odnos:

$$T_{Wcu}/T_i=(J/J_{ec})^3 \quad (11)$$

Ponekad je pogodno navedene troškove svesti na 1 kVA prividne snage (S) koja se prenosi elementima mreže, pa su odgovarajući troškovi po osnovu ulaganja (investicija):

$$T_{ii}=T_i/S \quad (12)$$

Dok su jedinični troškovi koji odgovaraju gubicima snage u mreži

$$T_{1Wcu}=T_{Wcu}/S=T_{1W} \cdot P_{Cu}P/S=T_{1W} \cdot P_{Cu} \cdot \cos \mathbf{j} \quad (13)$$

gde je  $P_{Cu}=P_{Cu}/P$ -relativno učešće gubitaka u prenetoj aktivnoj snazi, a veličina

$$T_{1W} \text{ (USD/kW)}=N_I(\text{god}) \cdot T(\text{h/god}) \cdot C_I \text{ (USD/kWh)} \quad (14)$$

predstavlja troškove za gubitke energije po 1 kW (maksimalnih) gubitaka snage u vodu (mreži) u posmatranom periodu otplate sredstava za kompenzaciju kojom se eliminišu navedeni gubici. U slučaju ugradnje kondenzatora za kompenzaciju, najčešće se uzima da rok otplate treba da bude  $N_I=5$  godina [1].

Pri ekonomskoj vrednosti gustine struje u vodi ( $J_{ec}$ ), jedinični troškovi definisani izrazima (12) i (13) su jednaki po vrednosti, i nazivaju se jediničnim ekonomskim troškovima ( $T_{1ec}$ ):

$$T_{ii,ec}=T_{1Wcu,ec}=P_{Cu,ec} \cdot \cos \mathbf{j} \cdot T_{1W}=T_{1ec} \quad (15)$$

kako je

$$P_{Cu}=P_{Cu,ec}(J/J_{ec})^2 \quad (16)$$

to je:

$$P_{Cu} \cdot T_{1W}=(T_{1ec}/\cos \mathbf{j})(J/J_{ec})^2 \quad (17)$$

Analogno izrazima (9) i (10), i na osnovu izraza (15) i (16), utvrđuje se zavisnost navedenih jediničnih troškova od relativnih gustina struja ( $J/J_{ec}$ ):

$$T_{ii}=T_{1ec}(J_{ec}/J) \quad (18)$$

$$T_{1Wcu}=T_{1ec}(J/J_{ec})^2 \quad (19)$$

kao i njihov odnos

$$T_{1Wcu}/T_{ii}=(J/J_{ec})^3 \quad (20)$$

#### 4. MARGINALNI EKONOMSKI EFEKTI POVEĆANJA FAKTORA SNAGE

Ekonomska korist koju potrošač ima od sprovođenja kompenzacije reaktivne energije se određuje na osnovu:

1. Smanjenja ili potpunog eliminisanja troškova za reaktivnu energiju i

2. Dodatne koristi koja nastaje zbog smanjenja reaktivnih opterećenja u mreži potrošača, ili distributivnih preduzeća.

Isplativost kompenzacije se utvrđuje na osnovu ukupnog ekonomskog efekta koji se obično određuje na godišnjem nivou, tj. kao razlika

– Godišnjeg iznosa ekonomske koristi po navedenim osnovama 1 i 2, i

– Godišnjih troškova za ugradnju kompenzacije (često se uzima da su oni 20 % ukupnih investicionih troškova za kompenzaciju [1]).

Kompenzacija je isplativa ukoliko je ta razlika pozitivna.

Godišnja korist od smanjenja troškova za reaktivnu energiju se određuje relativno lako za konkretnog potrošača na osnovu uvida u račun za električnu energiju. Dodatna korist, koja se javlja zbog smanjenja reaktivnih opterećenja u mreži potrošača je utoliko veća što su vodovi duži i ukoliko su kondenzatori postavljeni bliže samih potrošača (motora i slično) sa reaktivnim opterećenjima. Takav vid kompenzacije je, po pravilu, nešto skuplji pa to poskupljenje mora biti pokriveno iz dodatne koristi u najnepovoljnijem slučaju. Iz navedene koristi se moraju pokriti troškovi kompenzacije u celosti, ukoliko se reaktivna energija ne plaća ( $\cos \mathbf{j} \geq 0,95$ ).

Dodatni efekti koji su posledica smanjenja reaktivnih opterećenja u određenoj mreži mogu doneti različitu ekonomsku korist, u zavisnosti od toga čemu prvenstveno služe, tj. od cilja zbog kojeg se vrši kompenzacija. Detaljnije će se analizirati dva karakteristična (i česta) slučaja:

1. Smanjenje opterećenja donosi korist samo po osnovu smanjenja gubitaka snage, tj. ne koristi se za priključak novih potrošača.

2. Smanjenje opterećenja (i oslobođeni prenosni kapaciteti) se u potpunosti koriste za priključak novih potrošača, tj. do nivoa prividnih opterećenja  $S_2=S_1=\text{const}$ .

Interesantno je zapaziti da se marginalni efekti smanjuju kako se kompenzacijom smanjuje fazni ugao ( $\mathbf{j}$ ) između struje i napona, odnosno povećava faktor snage ( $\cos \mathbf{j}$ ). To važi kako za marginalne efekte po osnovu oslobađanja kapaciteta mreže (izrazi 1 i 5), tako i za marginalne efekte po osnovu smanjenja gubitaka (izrazi 2 i 6). Očigledno je da se granica isplativosti povećanja faktora snage mora utvrditi na osnovu marginalnih ekonomskih efekata kompenzacije.

#### 4.1. Kompenzacija radi smanjenja gubitaka i jedinični marginalni ekonomski efekti

Često je isplativo sprovesti kompenzaciju reaktivne energije samo u cilju smanjenja gubitaka u mreži. Pri tome, prvo treba utvrditi do kog nivoa vrednosti  $tg \mathbf{j}$  (ili  $\cos \mathbf{j}$ ) je ekonomično ići sa kompenzacijom.

Na osnovu izraza (1a), za marginalne efekte kompenzacije po osnovu smanjenja gubitaka snage, dolazi se do izraza za marginalne efekte u pogledu smanjenja troškova koji odgovaraju pomenutom smanjenju gubitaka ( $dT_{WCu}/dQ$ ):

$$dT_{WCu}/dQ = 2 \cdot tg \mathbf{j} \cdot p_{CuP} \cdot T_{IW} (1+K_u) [\text{USD/kvar}] \quad (21a)$$

ili, ukoliko se može zanemariti vrednost koeficijenta  $K_u=0$ , onda je

$$dT_{WCu}/dQ = 2 \cdot tg \mathbf{j} \cdot p_{CuP} \cdot T_{IW} [\text{USD/kvar}] \quad (21b)$$

gde su:

$p_{CuP} = P_{CuP}/P$  - relativni gubici zbog prenosa aktivne snage ( $P$ ), a veličina

$$T_{IW} (\text{USD/kW}) = N_I (\text{godina}) \cdot T (\text{h/godina}) \cdot C_I (\text{USD/kWh}) \quad (22)$$

predstavlja troškove za gubitke energije po 1 kW maksimalnih gubitaka snage u mreži u posmatranom periodu za koji kondenzatori treba da se otplate (npr.  $N_I=5$  godina).

Tako, npr. u mreži sa relativnim gubicima snage  $p_{CuP}=0,05$  (5 %) i vremenom trajanja maksimalnih gubitaka  $T=3\ 000$  h/godina, uštede u gubicima energije po 1 kW gubitaka snage, pri ceni 0,04 USD/kWh za 5 godina iznose:

$$T_{IW} = 5 \text{ godina} \cdot 3\ 000 \text{ h/godina} \cdot 0,04 \text{ USD/kWh} = 600 \text{ USD/kW}$$

Utvrđivanje nivoa faktora snage do koga je isplativo ići sa kompenzacijom se započinje sa  $\cos \mathbf{j} = 0,95$  i nastavlja sve dok ne postane  $dT_{WCu}/dQ \leq 10$  USD/kvar =  $T_{Ikvar}$  (troškovi po 1 kvar instaliranih kondenzatora):

$$\begin{aligned} - \cos \mathbf{j} = 0,95 \text{ (ili } tg \mathbf{j} = 0,33): dT_{WCu}/dQ &= 2 \cdot 0,33 \cdot 0,05 \cdot 600 = 20 \text{ USD/kvar} \\ - \cos \mathbf{j} = 0,98 \text{ (ili } tg \mathbf{j} = 0,203): dT_{WCu}/dQ &= 2 \cdot 0,203 \cdot 0,05 \cdot 600 = 12 \text{ USD/kvar} \\ - \cos \mathbf{j} = 0,99 \text{ (ili } tg \mathbf{j} = 0,142): dT_{WCu}/dQ &= 2 \cdot 0,142 \cdot 0,05 \cdot 600 = 8,5 \text{ USD/kvar} \end{aligned}$$

Granična vrednost  $tg \mathbf{j}_{gr}$ , do koje je isplativo ulagati u kompenzaciju, u opštem slučaju se određuje pomoću izraza

$$tg \mathbf{j}_{ec} = T_{Ikvar} / (2 \cdot p_{CuP} \cdot T_{IW} (1+K_u)) \quad (23a)$$

ili, ukoliko je  $K_u=0$  (kako je uzeto u prethodnom primeru):

$$tg \mathbf{j}_{ec} = T_{Ikvar} / (2 \cdot p_{CuP} \cdot T_{IW}) \quad (23b)$$

i predstavlja ekonomsku vrednost koeficijenta reaktivne snage  $tg \mathbf{j}_{ec} = tg \mathbf{j}_{gr}$ . Tako je u gornjem primeru, na osnovu izraza (23b),  $tg \mathbf{j}_{ec} = 0,166$ , tj. ekonomski faktor snage je  $\cos \mathbf{j}_{ec} = 0,986$ .

Interesantno je primetiti da se uštede po 1 kvar instaliranih kondenzatora smanjuju kako se povećava dostignuti faktor snage sa kompenzacijom. Tako je i pri dostignutom  $\cos \mathbf{j} = 0,98$  isplativo ulagati u kompenzaciju, jer su 5 - godišnje uštede veće od investicionih troškova po 1 kvar instaliranih kondenzatora. Već pri  $\cos \mathbf{j} = 0,99$  ne isplati se ulagati u dalju kompenzaciju, jer su uštede od 8,5 USD/kvar < 10 USD/kvar instaliranih kondenzatora.

Kako se iznosi  $p_{CuP}$  i  $T_{IW}$  razlikuju za pojedine vrste mreža, to se granične vrednosti faktora snage, do kojih je isplativo ići sa povećanjem njegove vrednosti, utvrđuju u svakom konkretnom slučaju po predloženom postupku.

Na osnovu izraza (1b), utvrđuju se marginalni efekti po osnovu smanjenja gubitaka u obliku:

$$dT_{WCu}/dQ = 2 \cdot p_{Cu} \cdot T_{IW} \cdot \sin \mathbf{j} \cdot \cos \mathbf{j} \quad (24)$$

ili, ako se izraze pomoću vrednosti  $T_{Iec}$ , tako što se izraz (17) uvrsti u izraz (24), dobija se da je

$$dT_{WCu}/dQ = 2 \cdot T_{Iec} \cdot \sin \mathbf{j} \cdot (J/J_{ek})^2 \quad (25)$$

pa se, pri gustini struje ravnoj ekonomskoj, dobija da je:

$$(dT_{WCu}/dQ)_{ec} = 2 \cdot T_{Iec} \cdot \sin \mathbf{j} \quad (26)$$

#### 4.2. Kompenzacija u cilju oslobađanja kapaciteta i odgovarajućih jediničnih marginalnih efekti

Često se kompenzacija reaktivne energije u mreži sprovodi prvenstveno u cilju oslobađanja kapaci-

teta za nove potrošače. Popravkom faktora snage sa prvobitne vrednosti  $\cos \mathbf{j}_1$  na vrednost  $\cos \mathbf{j}_2$  oslobađaju se kapaciteti za priključak novih potrošača sa prividnom snagom do iznosa  $DS$  (kVA) određenog po izrazu (23a) u [4] ili omskih potrošača do vrednosti snage  $DP$  (kW) određene po izrazu (24) u [4]. Značajno je konstatovati da i pored priključka novih potrošača snage  $DS$ , dolazi do smanjenja gubitaka snage-odnosno smanjuje se njihovo učešće u snazi koja se prenosi, tako da ukupni efekti uključuju:

- efekte po osnovu oslobađanja kapaciteta i
- efekte po osnovu smanjenja gubitaka.

#### 4.2.1. Parcijalni efekti po osnovu oslobađanja kapaciteta mreže

Pokazano je da se efekti kompenzacije, izraženi u oslobođenim kVA (ili kW) po 1 kvar priključenih kondenzatora, smanjuju kako sa kompenzacijom raste vrednost  $\cos \mathbf{j}$ . Dostignuti faktor snage  $\cos \mathbf{j} = \cos \mathbf{j}_{gr}$  pri kome navedeni efekti kompenzacije postaju jednaki investicionim troškovima po 1 kvar kompenzacije, predstavlja ekonomsku vrednost ( $\cos \mathbf{j}_{ec}$ ) do koje je još uvek isplativo ulagati u kompenzaciju.

Pošto su, po pravilu, vrednosti  $\cos \mathbf{j}_{ec} \geq 0,95$  ( $\mathbf{j} \leq 18^\circ$ ), to su vrednosti  $\tan \mathbf{j}_{ec} \approx \sin \mathbf{j}_{ec}$ , odnosno odgovarajući marginalni efekti dati izrazima 2a i 2b su približno jednaki:  $(dS/dQ)_{ec} \approx (dP/dQ)_{ec}$ , pa je dovoljno utvrditi samo jednu od tih vrednosti, npr.  $(dS/dQ)_{gr} = \sin \mathbf{j}_{gr}$

Odgovarajući marginalni efekti u uštedi kroz oslobođene kapacitete mreže iznose

$$dT_i/dQ = \sin \mathbf{j} \cdot T_{li} \quad (27)$$

gde  $T_{li}$  (USD/kVA) - predstavlja ukupne (investicione) troškove po 1 kVA prenosnih kapaciteta posmatrane mreže. Iznosi navedenih troškova se kreću u širokim granicama, npr.

$$T_{li} = 20-300 \text{ USD/kVA}$$

u zavisnosti od složenosti, vrste i dužine konkretne mreže. Gornje vrednosti se odnose na dugačke distributivne mreže koje uključuju 1-2 transformacije (sniženja) napona.

Ukoliko je poznat iznos jediničnih troškova  $T_{li}$ , ekonomska vrednost  $\sin \mathbf{j}_{ec}$  (kao reprezenta dostignutog faktora snage) do koje je isplativo ulagati u kompenzaciju, određuje se iz uslova  $dT_i/dQ = T_{1kvar}$  (ceni po 1kvar instalisanih kondenzatora - npr. 10 USD/kvar), tj:

$$\sin \mathbf{j}_{ec} = T_{1kvar}/T_{li} \quad (28)$$

Tako se za različite iznose  $T_{li}$ , utvrđuju različite vrednosti  $\sin \mathbf{j}_{ec}$ -odnosno različite vrednosti ekonomskog faktora snage ( $\cos \mathbf{j}_{ec}$ )

- $\sin \mathbf{j}_{ec} = 0,312$  (ili  $\cos \mathbf{j}_{ec} = 0,95$ ),  
pri  $T_{li} = 32 \text{ USD/kVA}$
- $\sin \mathbf{j}_{ec} = 0,28$  (ili  $\cos \mathbf{j}_{ec} = 0,96$ ),  
pri  $T_{li} = 36 \text{ USD/kVA}$
- $\sin \mathbf{j}_{ec} = 0,24$  (ili  $\cos \mathbf{j}_{ec} = 0,97$ ),  
pri  $T_{li} = 42 \text{ USD/kVA}$
- $\sin \mathbf{j}_{ec} = 0,20$  (ili  $\cos \mathbf{j}_{ec} = 0,98$ ),  
pri  $T_{li} = 50 \text{ USD/kVA}$

Navedeni primer pokazuje da ulaganja u kompenzaciju i iznad faktora snage  $\cos \mathbf{j} = 0,95$  postaju isplativa za distributivna preduzeća ukoliko su kondenzatori instalirani u mreži, tako da rasterećuju delove te mreže za koje su troškovi izgradnje  $T_{li} > 32 \text{ USD/kVA}$ .

Kada se u izraz (27) uvrsti izraz (18) za  $T_{li}$ , dobija se relacija za marginalne ekonomske efekte kompenzacije u funkciji od veličine  $T_{iec}$  tj.

$$dT_i/dQ = T_{iec} \cdot \sin \mathbf{j} \cdot (J_{ec}/J) \quad (29)$$

#### 4.2.2. Parcijalni efekti

po osnovu smanjenja gubitaka

Diferencijalna (ili marginalna) vrednost oslobođenih (novostvorenih) kapaciteta mreže ( $dS$ ), koji se koriste za priključak novih potrošača, je data pomoću izraza (2a). Istovremeno, to znači da relativno smanjenje preseka voda ( $A$ ), koji se koristi za prvobitno opterećenje, iznosi  $dA/A = dS/S = \sin \mathbf{j}$ .

Pošto su, po pretpostavci, gustine struja ostale nepromenjene ( $J = \text{const.}$ ), to su u smanjenom preseku voda ( $A_2 = A_1 - dA$ ) smanjeni i gubici snage.

Naime, relativnom diferencijalnom smanjenju preseka ( $dA/A$ ) vodova mreže, koji se koriste za prvobitnu potrošnju, odgovara marginalno smanjenje gubitaka snage ( $dP_{Cu}/P_{Cu}$ ):

$$\frac{dP_{Cu}}{P_{Cu}} = \frac{dA}{A} \cdot \frac{J^2}{J^2} = \frac{dA}{A} = \frac{dS}{S} = \sin \mathbf{j} \quad (30)$$

ili

$$dP_{Cu} = P_{Cu} \sin \mathbf{j} \quad (30a)$$

Na osnovu izraza  $dS/dQ = \sin \mathbf{j}$  (2a) i  $dP_{Cu} = P_{Cu} (dS/S)$  (30) izvodi se izraz za marginalnu promenu gubitaka snage:

$$\frac{dP_{Cu}}{dQ} = \frac{P_{Cu}}{S} \frac{dS}{dQ} = \frac{P_{Cu}}{S} \cos \mathbf{j} \sin \mathbf{j} = P_{Cu} \cos \mathbf{j} \cdot \sin \mathbf{j} \quad (31)$$

Odgovarajući parcijalni marginalni ekonomski efekti po osnovu smanjena gubitaka su

$$dT_{W_{Cu}}/dQ = P_{Cu} \cdot T_{1W} \cdot (\sin \mathbf{j} \cdot \cos \mathbf{j}) \quad (32)$$

ili, ako se izraz (17) uvrsti u gornji izraz, dobija se da je

$$dT_{WCu}/dQ = T_{1,ek} \cdot \sin j \cdot (J/J_{ec})^2 \quad (33)$$

#### 4.3. Ukupni marginalni efekti od oslobađanja kapaciteta i smanjenja gubitaka

Ukupni jedinični marginalni efekti, koji se mogu realizovati po priključku kondenzatora jedinične snage, jednaki su zbiru navedenih parcijalnih efekata datih sa izrazima (27) i (32):

$$\begin{aligned} dT/dQ &= dT_i/dQ + dT_{WCu}/dQ = \\ &= T_{li} \cdot \sin j + p_{Cu} T_{1W} (\sin j \cdot \cos j) \end{aligned} \quad (34)$$

Na osnovu izraza (29) i (33), utvrđuje se odnos navedenih parcijalnih marginalnih efekata:

$$(dT_{WCu}/dQ)/(dT_i/dQ) = (J/J_{ec})^3 \quad (35)$$

iz kojeg proizilazi da parcijalni marginalni efekti imaju iste vrednosti pri  $J=J_{ec}$ , pa je:

$$(dT_{WCu}/dQ)_{ec} = (dT_i/dQ)_{ec} = T_{1ec} \cdot \sin j \quad (36)$$

Kada se u izraz (34) uvrste izrazi (29) i (33), dobija se pogodan izraz za ukupne marginalne efekte:

$$dT/dQ = T_{1ec} \cdot \sin j (J_{ec}/J + J^2/J_{ec}^2) \quad (37)$$

ili, ako se ukupni efekti izraze preko parcijalnih efekata ( $dT_{WCu}/dQ$ ) ili  $dT_i/dQ$  onda je:

$$dT/dQ = (1 + J^3/J_{ec}^3) dT_i/dQ \quad (38)$$

$$\text{ili} \quad dT/dQ = (1 + J_{ec}^3/J_{ec}^3) dT_{WCu}/dQ \quad (39)$$

Izrazi (37) i (38) važe za slučaj kada se kompenzacija iskoristi za priključak novih potrošača u meri da prividno opterećenje ( $S$ ) i gustina struje ( $J$ ) dostignu prvobitne vrednosti  $S=\text{const.}$  i  $J=\text{const.}$

Pri vrednosti gustine struje ravne ekonomskoj ( $J=J_{ec}$ ), dobija se da je

$$(dT/dQ)_{ec} = 2T_{1ec} \cdot \sin j \quad (40)$$

$$\sin j_{ec} = T_{1kvar} / (2T_{1ec}) \quad (41)$$

pošto je  $(dT/dQ)_{ec} = T_{1kvar}$

Očigledno je da su ukupni marginalni efekti, izračunati po izrazu (34), veći od parcijalnih efekata datih izrazom (27). Navedeno povećanje je dvostru-

ko pri  $J=J_{ec}$  (izrazi 29 i 39). Tako se po izrazu (39), pri  $J=J_{ec}$ , utvrđuje da su ulaganja u kompenzaciju iznad  $\cos \geq 0,95$  isplativa tek pri upola nižim jediničnim troškovima izgradnje mreže ( $T_{li}$ ), u odnosu na primer u 4.2.1., tj:

$\sin j_{ec}=0,312$  (ili  $\cos j_{ec}=0,95$ ), pri  $T_{li}=16$  USD/kVA,  $\sin j_{ec}=0,28$  (ili  $\cos j_{ec}=0,96$ ), pri  $T_{li}=18$  USD/kVA,  $\sin j_{ec}=0,24$  (ili  $\cos j_{ec}=0,97$ ), pri  $T_{li}=21$  USD/kVA,  $\sin j_{ec}=0,20$  (ili  $\cos j_{ec}=0,98$ ), pri  $T_{li}=25$  USD/kVA, pa ulaganja u kompenzaciji iznad faktora snage  $\cos \geq 0,95$  postaju isplativa već za delove mreže čija je kapitalna vrednost  $T_{li} > 16$  USD/kVA.

Kada se uporede izrazi (26) i (39), zaključuje se da se, pri gustini struje jednakoj ekonomskoj vrednosti ostvaruju ukupni marginalni ekonomski efekti koji su jednaki bilo da se efekti kompenzacije koriste:

- samo za smanjenje gubitaka u mreži, ili
- za priključak novih potrošača prividne snage  $DS$ , tako da prividno opterećenje (u kVA) zadrži prvobitnu vrednost, tj. da bude uvek  $S_2=S_1$ , kada su ukupni efekti kompenzacije jednaki zbiru parcijalnih efekata:
  - a) po osnovu oslobađanja kapaciteta mreže za  $DS$  (kVA) i
  - b) smanjenje gubitaka, tj. njihovog relativnog učešća u prenetoj snazi ( $P_1$ ).

Na osnovu prethodnog zaključka i poređenja izraza (37) i (26), izvode se sledeći zaključci:

1. Pri  $J_1 > J_{ec}$ , ekonomska korist je najveća ukoliko se efekti kompenzacije koriste samo za smanjenje gubitaka snage, sve dok ne postane  $J_2=J_{ec}$ , pa je kompenzacija sredstvo za smanjenje gustine struje do ekonomske vrednosti. Ukupni marginalni efekti se određuju pomoću izraza (21).
2. Pri  $J_1 < J_{ec}$ , ekonomska korist je najveća ukoliko se efekti kompenzacije u potpunosti (tj. sve dok se ne postigne  $J_2=J_1$ ) koriste za priključak novih potrošača, i odgovarajući ukupni efekti se određuju pomoću izraza (38) i (39).

Ekonomska gustina struje ( $J_{ec}$ ) se određuje, za datu vrstu provodnika (kabela), u zavisnosti od godišnjeg korišćenja maksimalnih radnih opterećenja  $T_{max}$  (h/god), tj.  $J_{ec}=f(T_{max})$ . Iz tog razloga je pogodno i pri proračunu parcijalnih efekata računati sa gustinama struja koje odgovaraju maksimalnim radnim opterećenjima, ukupnim i aktivnim, posmatranih elemenata mreže

$$J_{max} = I_{max} / A = S_{max} / (\sqrt{3}U \cdot A) \quad (42)$$

$$J_{Pmax} = I_{Pmax} / A = P_{max} / (\sqrt{3}U \cdot A) \quad (43)$$

gde su  $S_{max}$  i  $P_{max}$  - maksimalna prividna i aktivna opterećenja,

$U$  - napon u posmatranoj mreži (električnom kolu) i

$A$  ( $\text{mm}^2$ ) - presek provodnika mreže.

Pri proračunu efekata  $dT_{W_{cu}}/dQ$  po izrazu (21) računa se sa maksimalnom gustinom aktivne struje  $J_{P_{max}}$ , pri čemu se komponenta troškova  $T_{1W}$  određuje na osnovu vremena korišćenja maksimalne aktivne snage  $T=T_{P_{max}}$ , dok se, u svim drugim slučajevima, proračun parcijalnih efekata  $dW_{cu}/dQ$  vrši na osnovu maksimalnih vrednosti gustine struje  $J_{max}$ , određene po izrazu (42).

Iako izgleda da bi proračune parcijalnih efekata  $dT/dQ$  trebalo vršiti na osnovu vrednosti gustina struja koje odgovaraju maksimalnim dozvoljenim opterećenjima, s obzirom na zagrevanje vodova ( $J_{gr}$ ), najčešće je u ovim slučajevima opravdano računati sa maksimalnim gustinama radne struje  $J_{max}$  (izraz 42). Naime, u slučaju  $J_{max} < J_{ec}$ , kompenzacija reaktivnih opterećenja se često provodi u cilju povećanja propusne moći mreža, kada je ova ograničena dozvoljenim padovima napona i pri opterećenjima ( $I_{max}$ ), tj. pri:

$$J = J_{max} \leq J_{max,gr} \quad (44)$$

Time se pokazuje da je za proračun ukupnih efekata  $dT/dQ$ , po izrazima (38) i (39), najlogičnije koristiti maksimalne gustine struja ( $J_{max}$ ) određene pomoću izraza (44).

## 5. ZAKLJUČAK

*Iz predloženog postupka za utvrđivanje i proračun ukupnih marginalnih efekata kompenzacije reaktivnih snaga proizašli su određeni rezultati koji se pojedinačno navode.*

**1.** *U radu se, na osnovu poznatih analitičkih zavisnosti za parcijalne marginalne efekte kompenzacije reaktivnih opterećenja, dokazuje da su, pri ekonomskoj vrednosti gustine struja ( $J_I = J_{ec}$ ):*

- marginalni efekti po osnovu smanjenja gubitaka snage ( $T_{1W_{cu}}$ ) i*
- marginalni efekti po osnovu oslobađanja kapaciteta ( $T_{1,i}$ ) za priključak novih potrošača,*

*do nivoa da gustina struje ostane nepromenjena ( $J_2 = J_{ec}$ ),*

*jednaki po vrednosti, tj.  $T_{1W_{cu}} = T_{1I} = T_{1ec}$  (jediničnim ekonomskim troškovima).*

**2.** *Utvrđeni su i jedinstveni analitički izrazi za proračun ukupnih marginalnih efekata kompenzacije reaktivnih opterećenja u funkciji jediničnih ekonomskih troškova ( $T_{1ec}$ ) i relativnih vrednosti gustine struje opterećenja ( $J/J_{ec}$ ).*

**3.** *Na osnovu novouvedenih zavisnosti*

*– omogućen je jednostavan postupak za utvrđivanje i proračun ukupnih marginalnih efekata kompenzacije reaktivnih opterećenja,*

*– pojednostavljena je analiza promene navedenih efekata u zavisnosti od toga u kojoj se meri oni koriste u cilju smanjenja gubitaka i (ili) za priključak novih potrošača, i*

*– omogućen je egzaktan odgovor na pitanje: kada i do kog nivoa sprovesti kompenzaciju i kako je najbolje iskoristiti da bi efekti bili maksimalni.*

*Navedeni rezultati bi se mogli koristiti: pri izboru strategije kompenzacije reaktivnih opterećenja u elektroenergetskom sistemu kao celini, za utvrđivanje tarifnih stavova za reaktivnu energiju kao i pri projektovanju kompenzacije reaktivnih opterećenja u distributivnim mrežama.*

## 6. LITERATURA

- [1] T. Gönen, ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM ENGINEERING, McGraw - Hill Book Company, 1986, pp 740.
- [2] R. A. Zimmerman, ECONOMIC MERITS OF SECONDARY CAPACITORS, AIEE Trans.Vol. 72, 1953, pp 694-97.
- [3] M. Maxwell, THE ECONOMIC APPLICATION OF CAPACITORS FOR DISTRIBUTION FEDERS, AIEE Trans.Vol. 79, pt. III, August 1960, pp 353-59.
- [4] M. Kostić, EKONOMSKI FAKTOR SNAGE I JEDINIČNI EFEKTI KOMPENZACIJE, Elektroprireda br.1, 2001, str.24-33.

Rad je primljen u uredništvo 21. 03. 2002. godine

# Parametri modela potrošnje na niskom i srednjem naponu kod distributivnih mreža

Originalni naučni rad

UDK: 621.311.1

---

*Rezime:*

U ovom radu su prikazani rezultati eksperimentalnog određivanja karakteristika potrošnje na niskom (0,4 kV) i srednjem (10 kV) naponu distributivnih mreža. Na osnovu rezultata merenja, utvrđeni su parametri modela tipičnih predstavnika termičke potrošnje, osvetljenja i elektromotornih pogona, na niskom naponu, kao i zbirne potrošnje na srednjem naponu. Dobijeni parametri su upoređeni sa onima koji se mogu naći u literaturi. Parametri modela potrošnje određeni su u širokom opsegu napona od 0,8 do 1,1  $U_n$ . Ustanovljeno je da osetljivosti aktivne i reaktivne snage variraju sa promenom napona. Dobijene statičke karakteristike su prikazane u obliku polinoma i aproksimirane eksponencijalnim modelom sa konstantnim koeficijentima.

**Cljučne reči:** modelovanje potrošnje, statičke karakteristike, distributivne mreže

---

*Abstract:*

## LOAD MODEL PARAMETERS ON LOW AND MIDDLE VOLTAGE IN DISTRIBUTION NETWORKS

Results of the experimental load model parameter determination on LV (0,4 kV) and MV (10 kV) of distribution networks are shown in this paper. On the basis of the results, parameters of typical representatives of resistive load, lighting and electrical drives on LV, as well as equivalent load on MV, are determined. The obtained parameters are compared with those which can be found in literature. Load parameters are determined in wide voltage range from 0,8 to 1,1  $U_n$ . It is pointed out that real and reactive power sensitivities on voltage vary with voltage value. Static characteristics are in polynomial form and these are approximated by an exponential model with constant coefficients.

**Key words:** load modeling, static characteristics, distribution networks

---

## 1. UVOD

Uspešna eksploatacija, upravljanje i planiranje distributivnih mreža zahteva tačne proračune napona i tokova snaga. Tačnost rezultata proračuna režima mreže zavisi, pored ostalog, i od tačnosti polaznih podataka o parametrima potrošnje [1].

Zbog toga su se mnogi autori bavili modelovanjem potrošnje i određivanjem konkretnih parametara ovih modela. Iako je broj radova i stručnih knjiga koje se bave ovom problematikom veliki, pokazuje se da je tačno određivanje karakteristika potrošnje praktično nemoguće, imajući u vidu promenljivost sastava potrošnje u vremenu. Pored toga, veliki je broj prijemnika električne energije koje proizvode različiti proizvođači, različitim materijalima i sa određenom pratećom opremom. Tako se dešava da

se i u okviru iste vrste prijemnika imaju različiti parametri potrošnje.

Dakle, modelovanje opterećenja potrošnje je veoma važan, ali i prilično komplikovan posao. Čak i kada bi sastav potrošnje bio poznat, bilo bi nepraktično da se predstavi svaka komponenta potrošnje posebno, pošto postoji mnoštvo komponenti u ukupnom opterećenju sistema. Zbog toga se ukupna potrošnja ekvivalentira [2÷6], ali vrše i značajna pojednostavljenja pri predstavljanju opterećenja [7÷9].

Svi modeli potrošnje se mogu podeliti u dve grupe, statičke i dinamičke, a njihova primena zavisi od konkretnog problema. Statički modeli se koriste za proračun ustaljenih režima, ali i kod dinamičkih pojava ako potrošački čvor sadrži mali udeo elektromotornih pogona. Dinamički modeli se koriste za modelovanje potrošnje koja se većim delom sastoji od asinhronih i sinhronih motora, klimatizera, kao i pri proučavanju prelaznih procesa kod svetiljki, transformatora, naponom kontrolisanih kondenzatora, zaštitnih releja, termostatom upravljanih prijemnika, na primer bojlera i frižidera.

U ovom radu su razmatrani statički modeli u obliku polinoma i eksponencijalne funkcije, u kojima su zanemarene zavisnosti opterećenja od frekvencije. S obzirom, na to da se u literaturi [2, 3, 10÷13], navode parametri ovih modela koji se u velikoj meri razlikuju za pojedine prijemnike električne energije i čvorove distributivne mreže, u ovom radu su oni određeni na osnovu eksperimenata.

Merenja su izvršena na tipičnim predstavnicima potrošnje na niskom naponu (termička potrošnja, osvetljenje, motorni pogon), kao i na 10 kV nivou jedne gradske TS 110/10 kV/kV koji napaja opštu (stambenu) potrošnju.

## 2. NAJČEŠĆE KORIŠĆENI STATIČKI MODELI POTROŠNJE

Statički modeli potrošnje izražavaju karakteristike opterećenja u bilo kom vremenskom trenutku kao algebarske funkcije amplitude napona i frekvencije u tom trenutku. Ovi modeli potrošnje se mogu razvrstati u nekoliko grupa: eksponencijalni, modeli u obliku polinoma, složeni, fazi (fuzzy) logički modeli [11, 13÷15]. Ovdje će biti prikazani samo najčešće korišćeni modeli: eksponencijalni i modeli u obliku polinoma.

Tradicionalno se zavisnost potrošnje od napona i frekvencije predstavlja eksponencijalnim modelom. Pošto se napon mreže obično menja mnogo više nego frekvencija, to se frekvencijska zavisnost može zanemariti i dobijamo statičke naponske karakteristike:

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}}, \quad (1)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}}, \quad (2)$$

gde su:

$P$  i  $Q$  - aktivna i reaktivna snaga pri naponu  $U$ ,  
 $P_n$  i  $Q_n$  - aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri nazivnom naponu,

$k_{pu}$  i  $k_{qu}$  - koeficijenti samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu.

Kada su istovremeno oba eksponenta u modelu potrošnje (1) i (2) jednaka 0, 1, ili 2, radi se o potrošnji tipa konstantne snage, struje, ili impedanse, respektivno.

Koeficijenti samoregulacije,  $k_{pu}$  i  $k_{qu}$ , pokazuju zapravo kolika je relativna promena aktivne i reaktivne snage kod promene napona. Ova konstatacija se može pokazati na primeru aktivne snage korišćenjem razvoja jednačine (1) u Tajlorov red u okolini  $U_n$ . Za male promene napona, treći i viši članovi reda mogu se zanemariti, pa se dobija:

$$\frac{P_n + \Delta P}{P_n} = \left[ \frac{U_n + \Delta U}{U_n} \right]^{k_{pu}} \cong 1 + k_{pu} \left[ \frac{\Delta U}{U_n} \right], \quad (3)$$

$$k_{pu} = \frac{\Delta P / P_n}{\Delta U / U_n}, \quad (4)$$

ili u relativnim jedinicama

$$k_{pu} = \frac{\Delta p}{\Delta u}. \quad (5)$$

Analogne jednačine mogu se izvesti i za koeficijent samoregulacije reaktivne snage po naponu, tako da se koeficijenti  $k_{pu}$  i  $k_{qu}$  u okolini nazivnog napona mogu nazvati parcijalnim izvodima aktivne i reaktivne snage po naponu [4] ili koeficijentima osetljivosti [15].

Model koji se takođe široko koristi da bi se predstavila zavisnost od napona je aproksimacija statičkih naponskih karakteristika polinomima. Najčešće se koriste polinomi drugog reda [3], pošto se smatra da aproksimacija polinomima višeg reda ne doprinosi mnogo tačnijem modelovanju potrošnje, jer se pri određivanju statičkih naponskih karakteristika, kako eksperimentalnim, tako i računskim putem, čini određena greška. Često korišćen model u obliku polinoma je:

$$P = P_n \left[ p_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + p_3 \right], \quad (6)$$

$$Q = Q_n \left[ q_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + q_3 \right]. \quad (7)$$

Uobičajeno je da se ovaj model zove ZIP model, pošto je sastavljen od komponenti opterećenja tipa konstantne impedanse ( $Z$ ), konstantne struje ( $I$ ) i konstantne snage ( $P$ ). Njegovi parametri su koeficijenti  $p_1$  do  $p_3$  i  $q_1$  do  $q_3$  koji definišu proporcionalno učešće svake komponente u ukupnom opterećenju. Ako se radi o potrošnji tipa konstantne impedanse koeficijenti  $p_1=q_1=1$ , dok su svi ostali jednaki nuli. Opterećenje tipa konstantne struje se modeluje kada su  $p_2=q_2=1$ , a konstantne snage  $p_3=q_3=1$ , dok su preostali koeficijenti jednaki nulama.

Kao što je pokazano u (3) na primeru modela (1)-(2), za male promene napona se mogu dobiti linearni modeli potrošnje oblika:

$$P = P_n + \mathbf{a}(U - U_n), \quad (8)$$

$$Q = Q_n + \mathbf{b}(U - U_n), \quad (9)$$

gde su  $\mathbf{a} = k_{pu} P_n / U_n$  i  $\mathbf{b} = k_{qu} Q_n / U_n$ .

### 3. REZULTATI MERENJA

U cilju određivanja parametara modela potrošnje vršena su laboratorijska i terenska merenja. Iz mnoštva prijemnika električne energije koji rade na niskom naponu, za eksperiment su izdvojeni „tipični” predstavnici termičke potrošnje, osvetljenja i elektromotornog pogona čiji su podaci dati u Prilogu. Takođe, su merenjima određene statičke karakteristike potrošnje na 10 kV nivou transformatorske stanice „Niš 13” odakle se napaja stambena potrošnja.

Tokom ovih eksperimenata nije merena frekvencija, jer se ova veličina menja u uskim granicama oko nominalne vrednosti. Zato se smatralo da su sve promene aktivne i reaktivne snage posledica menjanja napona. Svaki eksperiment je ponavljan više puta, a statičke karakteristike su dobijene fitovanjem rezultata polinomima drugog reda po metodi najmanjih kvadrata, jer je utvrđeno da aproksimacija polinomima višeg reda ne doprinosi značajno tačnosti. Ove statičke karakteristike su, potom, aproksimirane eksponencijalnim krivama kod kojih je eksponent jednak parcijalnom izvodu aktivne, odnosno reaktivne snage po naponu za nazivnu vrednost napona.

#### 3.1 Termički prijemnici

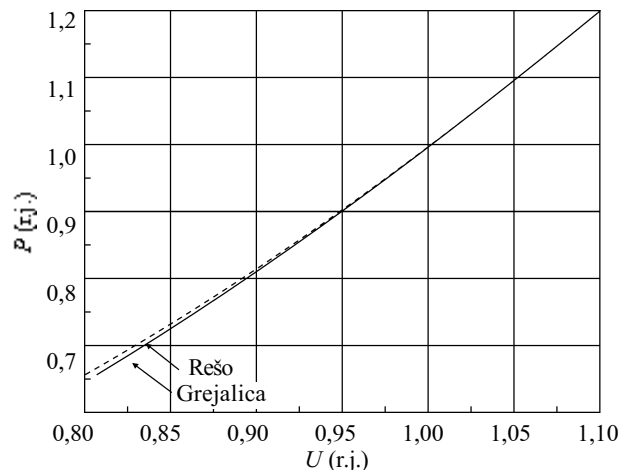
Statičke karakteristike aktivne snage grejalice i rešoa imaju dominantan koeficijent uz kvadratni član, i u opsegu napona  $U \in [0,8 \div 1,1 \text{ r.j.}]$ , oblika su:

$$P = -0,163 + 0,389 \cdot U + 0,771 \cdot U^2, \quad (10)$$

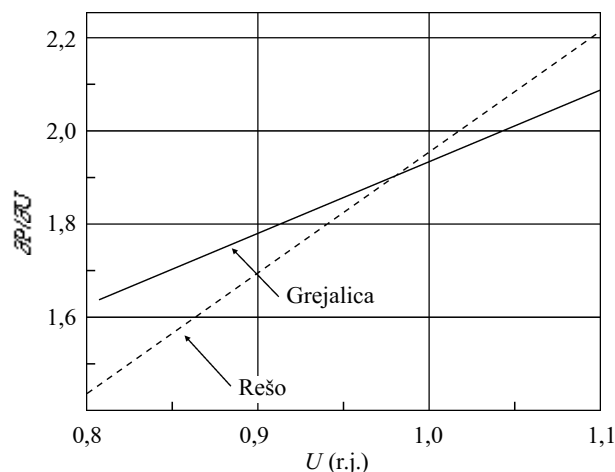
$$P = 0,336 - 0,635 \cdot U + 1,293 \cdot U^2. \quad (11)$$

Na slici 1 su prikazane statičke karakteristike ova dva prijemnika, dok su na slici 2 date osetljivosti

aktivne snage na promenu napona,  $\frac{P}{U} / \frac{P}{U}$ . Pri nazivnom naponu, ovi koeficijenti iznose 1,93 i 1,95, respektivno. U literaturi [3, 10-12] se, za termičke prijemnike, redovno nalazi koeficijent 2, što odgovara potrošnji tipa konstantne impedanse. Međutim, rezultati ovih eksperimenata pokazuju da čak ni termičke prijemnike ne možemo okarakterisati tim tipom.



Slika 1. Statičke karakteristike grejalice i rešoa



Slika 2. Osetljivosti aktivne snage na promenu napona grejalice i rešoa

Kod oba termička prijemnika pomenuta osetljivost se menja sa promenom napona, jer se aktivna otpornost ovih prijemnika menja sa temperaturom. Tako se pri promeni napona od 0,8 do 1,1 r.j. osetljivost aktivne snage menja u intervalu  $1,63 \div 2,07$  za grejalicu i  $1,43 \div 2,21$  za rešo.

Ako se kriva zavisnosti aktivne snage od napona aproksimira, umesto parabolom, eksponencijalnom krivom oblika (1) u kojoj je eksponent jednak osetljivosti aktivne snage na promenu napona pri  $U=U_n$ , greška je manja od 1,25 % na donjoj granici menjanog napona. To znači da se ovakva aproksimacija može izvršiti sa zadovoljavajućom tačnošću.



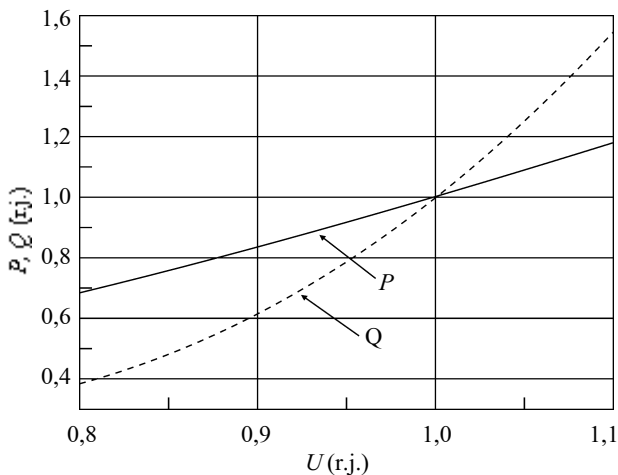
### 3.2 Osvetljenje

Statičke karakteristike potrošnje su takođe izmerene za fluorescentne svetiljke i prikazane su na slici 3. One se mogu aproksimirati polinomima drugog stepena u opsegu napona  $U \in \{0,8 \div 1,1 \text{ r.j.}\}$ :

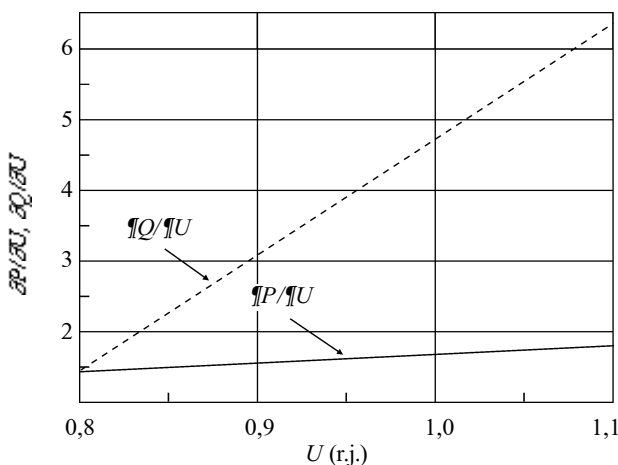
$$P = -0,111 + 0,528 \cdot U + 0,584 \cdot U^2, \quad (12)$$

$$Q = 4,376 - 11,419 \cdot U + 8,045 \cdot U^2. \quad (13)$$

Na osnovu ovih polinoma se određuju osetljivosti aktivne i reaktivne snage po naponu i one iznose, u ukolini nazivnog napona, 1,69 i 4,67, respektivno. Ove vrednosti su bliske podacima navedenim u [2] za ovu vrstu prijemnika. Slika 4 pokazuje da se koeficijent osetljivosti aktivne snage po naponu menja relativno malo, od 1,46 do 1,82 pri promeni napona od 0,8 do 1,1 r.j., jer je zavisnost aktivne snage od napona približno linearna funkcija. Sa druge strane, koeficijent osetljivosti reaktivne snage se menja u širokim granicama, od 1,45 do 6,32 pri istoj promeni napona.



Slika 3. Zavisnost aktivne i reaktivne snage od napona fluorescentnih svetiljki



Slika 4. Osetljivosti aktivne i reaktivne snage na promenu napona fluorescentnih svetiljki

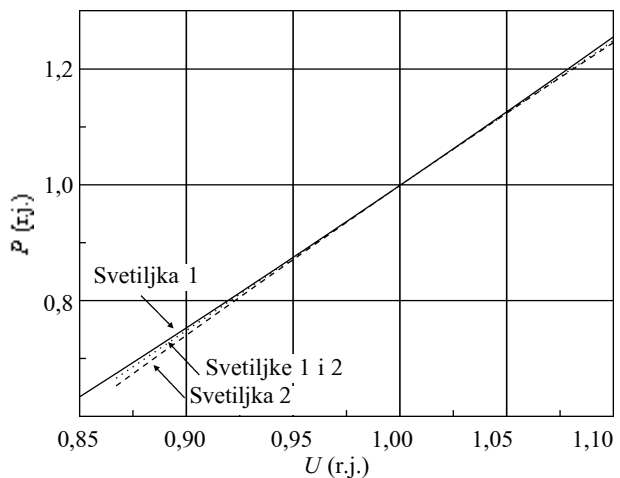
Statičke karakteristike sa slike 3 se mogu aproksimirati eksponencijalnim krivama sa konstantnim eksponentom koji iznosi 1,69, odnosno 4,67. Za aktivnu snagu se na ovaj način dobija praktično ista kriva, uz maksimalno odstupanje od svega 0,09 %. Kod aproksimacije reaktivne snage eksponencijalnom krivom greši se najviše 8,29 % na donjoj granici promene napona, dok je u većem delu posmatranog opsega napona greška manja od jednog procenta. Ovo govori da je, sa inženjerskog stanovišta, ovakva aproksimacija dobra.

Eksperimenti su vršeni i na živinim svetiljkama za spoljašnje osvetljenje, snaga 125 W i 250 W, u daljem tekstu svetiljka 1 i svetiljka 2, respektivno. Eksperiment snimanja statičkih karakteristika je obavljen na svakoj od svetiljki posebno, i pri njihovom zajedničkom radu do donje vrednosti napona pri kojem se gase. U tabeli 1 su date statičke karakteristike ovih svetiljki u obliku polinoma.

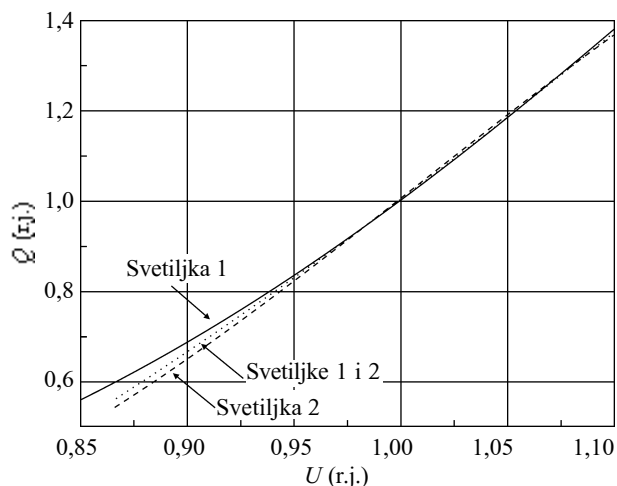
Tabela 1.

Statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage živinih svetiljki za  $U \in \{0,86 \div 1,1 \text{ r.j.}\}$

Tip svetiljke	$P = F_1(U)$	$Q = F_2(U)$
Svetiljka 1	$-0,935 + 1,344 U + 0,589 U^2$	$1,079 - 3,612 U + 3,534 U^2$
Svetiljka 2	$-2,277 + 4,033 U - 0,756 U^2$	$1,192 - 0,804 U + 1,388 U^2$
Svetiljke 1 i 2	$-1,562 + 2,609 U - 0,047 U^2$	$-0,587 - 0,356 U + 1,944 U^2$



Slika 5. Zavisnost aktivne snage od napona za pojedine svetiljke i njihov zajednički rad



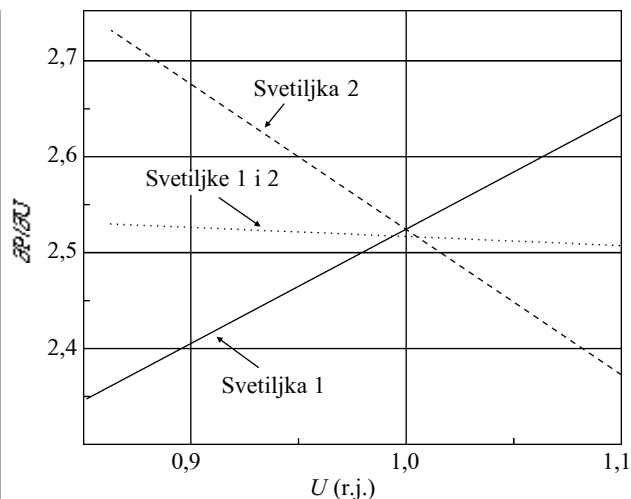
Slika 6. Zavisnost reaktivne snage od napona za pojedine svetiljke i njihov zajednički rad

Koeficijenti statičkih karakteristika aktivne i reaktivne snage, kao i kod fluorescentnih svetiljki, pokazuju da se ovakva vrsta potrošnje ne ponaša niti kao potrošnja tipa konstantne snage, niti kao potrošnja tipa konstantne struje, odnosno impedanse. Kod aktivne potrošnje živinih svetiljki dominira koeficijent uz drugi član nad ostalim koeficijentima, što pokazuje približno linearnu zavisnost ove snage od napona (slika 5). U jednačinama za zavisnost reaktivne snage od napona, koeficijent uz treći član je takođe veliki i krive imaju oblik parabole što se vidi sa slike 6. Poređenjem grafika statičkih karakteristika svetiljki 1 i 2 se uočava da su one međusobno slične.

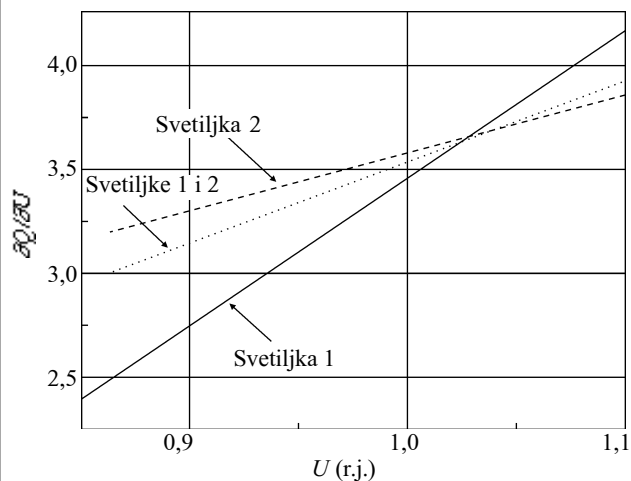
Za statičke karakteristike aktivne snage, koje su približno prave linije, koeficijenti osetljivosti se malo menjaju sa promenom napona (slika 7). Nasuprot tome, za reaktivne snage, koje pri promeni napona daju krive u obliku parabole, osetljivosti se značajno menjaju sa promenom napona, što je prikazano na slici 8.

Osetljivost aktivne snage na promenu napona u okolini nazivnog napona za obe svetiljke iznosi približno 2,52, kao što je navedeno u [10] i znatno je veća od iste veličine za fluorescentne svetiljke. Osetljivost reaktivne snage za živine svetiljke pri nazivnom naponu iznosi 3,45, odnosno 3,58, što je niže od vrednosti za fluorescentne svetiljke.

Faktor snage živinih svetiljki je znatno manji od onog za fluorescentne svetiljke, jer za dve ispitivane svetiljke nije predviđen kondenzator za popravku ovog faktora. On je kod fluorescentnih svetiljki iznosio 0,87 za nazivnu vrednost napona, a ovde je 0,55 i 0,58 za svetiljku 1 i svetiljku 2, respektivno. I kod ovih svetiljki, kao i kod fluorescentnih, faktor snage se poboljšava sa sniženjem napona.



Slika 7. Osetljivost aktivne snage na promenu napona za pojedine svetiljke i njihov zajednički rad



Slika 8. Osetljivost reaktivne snage na promenu napona za pojedine svetiljke i njihov zajednički rad

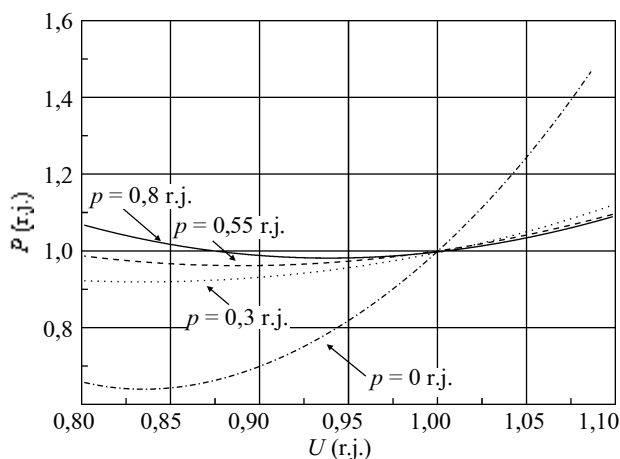
Statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage sa slika 5 i 6 se mogu aproksimirati eksponencijalnim zavisnostima sa konstantnim koeficijentom koji je jednak osetljivosti aktivne, odnosno reaktivne snage na promenu napona za nazivni napon. Pri ovome, greška aproksimacije ne prevazilazi 6 % kod aktivne i 7 % kod reaktivne snage za posmatrane svetiljke, na donjoj granici menjanog napona.

### 3.3 Asinhroni motor

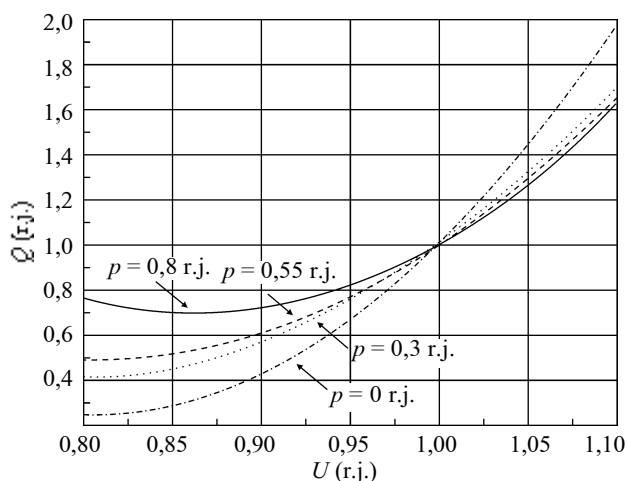
Eksperimenti određivanja statičkih karakteristika potrošnje po naponu su izvršeni na trofaznom asinhronom motoru snage 2,2 kW. Ovaj motor je opterećen generatorom jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom nazivne snage 1,95 kW, koji radi u režimu dinamičke kočnice. Zbog odnosa snaga generatora i motora, motor je radio u toku eksprime-

nata sa opterećenjem manjim od nominalnog, odnosno 0,8; 0,55; 0,3 relativnih jedinica i prazan hod. Rezultati eksperimenata, kada motor radi sa opterećenjem konstantne snage, su prikazani na slikama 9 i 10, i tabelama 2 i 3.

Kao što se vidi sa slika 9 i 10 i tabele 2, postoji velika razlika među statičkim karakteristikama zavisno od relativne snage koju motor razvija na vratilu. Oblik statičkih karakteristika je sličan onima koje su date u monografiji [16] za motore sličnih snaga. Konsekventno, slično se menjaju i osetljivosti aktivne i reaktivne snage sa promenom napona i opterećenja. Pored toga, treba imati u vidu da statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage u velikoj meri zavise od snage motora, to jest od njegovih parametara, kao i tipa opterećenja pogona.



Slika 9. Statičke karakteristike aktivne snage motora pri radu sa opterećenjem konstantne snage  $p$



Slika 10. Statičke karakteristike reaktivne snage motora pri radu sa opterećenjem konstantne snage  $p$

Tabela 2.

Statičke karakteristike motora pri radu sa različitim opterećenjima  $p$  za  $U \in \{0,8 \div 1,1 \text{ r.j.}\}$

$p$	$P = F_1(U)$	$Q = F_2(U)$
0,8	$4,646 - 7,793 \cdot U + 4,148 \cdot U^2$	$13,306 - 29,142 \cdot U + 16,836 \cdot U^2$
0,55	$3,391 - 5,465 \cdot U + 3,075 \cdot U^2$	$9,39 - 22,072 \cdot U + 13,678 \cdot U^2$
0,3	$2,973 - 4,901 \cdot U + 2,928 \cdot U^2$	$9,165 - 22,074 \cdot U + 13,909 \cdot U^2$
0	$9,788 - 21,889 \cdot U + 13,099 \cdot U^2$	$13,285 - 32,356 \cdot U + 20,071 \cdot U^2$

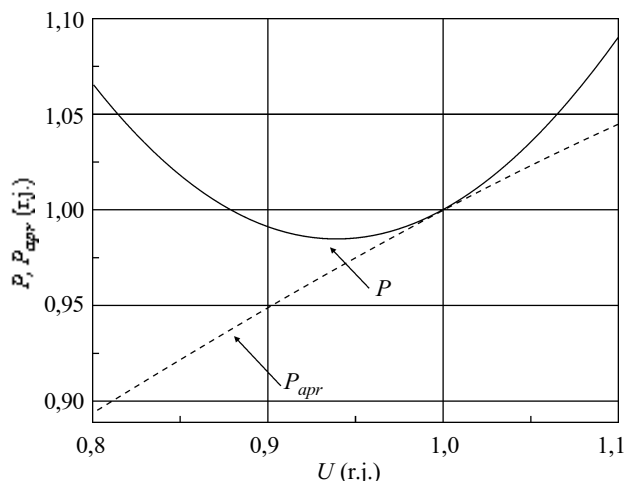
Tabela 3.

Koeficijenti osetljivosti aktivne i reaktivne snage na promenu napona pri radu sa različitim opterećenjem  $p$  za  $U \in \{0,8 \div 1,1 \text{ r.j.}\}$

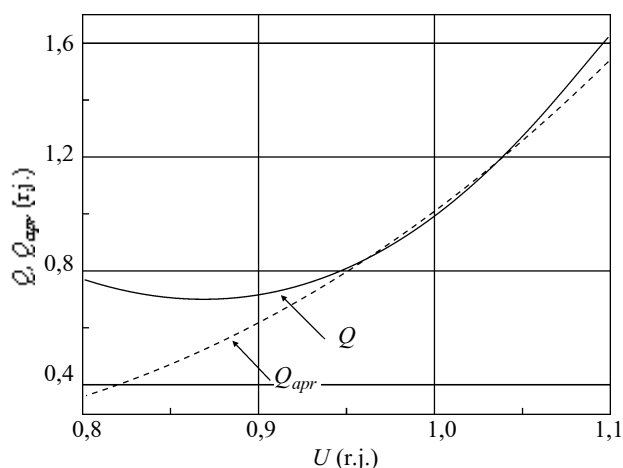
koef. oset.	$P/U$				$Q/U$			
	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9	1,0	1,1
$p/U$ (r.j.)								
0,8	-1,2	-0,3	0,5	1,3	-2,2	1,2	4,5	7,9
0,55	-0,5	0,1	0,7	1,3	-0,2	2,5	5,3	8,0
0,3	-0,2	0,4	0,9	1,5	0,2	2,9	5,7	8,5
0	-0,9	1,7	4,3	6,9	-0,2	3,8	7,8	11,8

Oblik statičkih karakteristika pri radu motora sa opterećenjem konstantne snage zavisi od iznosa gubitaka u motoru. Gubici u praznom hodu motora rastu sa kvadratom napona, dok se za opterećenje tipa konstantne snage gubici u namotajima statora menjaju približno obrnuto proporcionalno sa kvadratom napona [2]. Tako oblik statičkih karakteristika zavisi od dominacije jednih ili drugih gubitaka sa promenom napona. Kako pri praznom hodu dominiraju prvopomenuti gubici, to imamo povećanje aktivne snage približno sa kvadratom napona. Sa povećanjem opterećenja ova zavisnost se menja, tako da je, pri naponu blizu nominalne vrednosti, snaga koju preuzima motor iz mreže minimalna. Ovo u stvari znači da su tada gubici minimalni, a koeficijent iskorišćenja najbolji. Kada motor ne radi sa opterećenjem konstantne snage, dobijaju se različite statičke karakteristike, pogotovu za veća opterećenja, jer je tada veći uticaj gubitaka u namotajima statora i rotora.

Za razliku od termičke potrošnje i osvetljenja, kod motora vrednosti koeficijenata osetljivosti variraju u širokim granicama u zavisnosti od napona, što se vidi iz tabele 3. Zbog toga se statičke karakteristike potrošnje motora ne mogu sa zadovoljavajućom tačnošću aproksimirati eksponencijalnim modelom sa konstantnim koeficijentom. Pokušaj ovakve aproksimacije je učinjen za motor koji radi sa opterećenjem od 0,8 r.j. i prikazan je na slikama 11 i 12. On dovodi do greške i do 54 % relativne snage za krajnje opsege ispitivanog napona.



Slika 11. Merena i aproksimativna eksponencijalna statička karakteristika aktivne snage motora koji radi sa opterećenjem od 0,8 r.j.

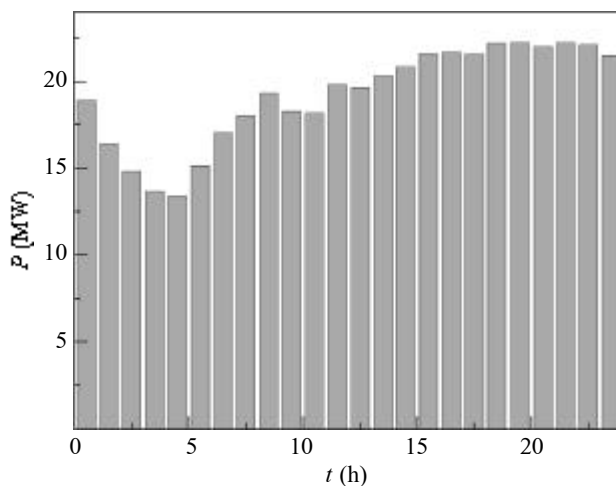


Slika 12. Merena i aproksimativna eksponencijalna statička karakteristika reaktivne snage motora koji radi sa opterećenjem od 0,8 r.j.

### 3.4 Statičke karakteristike potrošnje na 10 kV

U transformatorskoj stanici „Niš 13” su vršena merenja aktivne snage, struje, faktora snage i impedanse pri promenama napona. Izabrani su jedan radni i jedan neradni zimski dan, petak 19. 1. i subota 20. 1. 2001. godine. S obzirom na to da je opterećenje promenljivo u toku dana, eksperimenti promene napojnog napona transformatorom sa promenljivim prenosnim odnosom i snimanja statičkih karakteristika potrošnje su vršeni u intervalima kada su oscilacije potrošnje najmanje. Do ovih intervala se došlo na osnovu izmerenog dnevnog dijagrama potrošnje radnog dana i iskustva radnika JP „Elektrodistribucije - Niš”. Na slici 13 je dat ovaj dnevni dijagram potrošnje u obliku histograma. Po ovom dijagramu jutarnji pik nastaje u intervalu između 8 i 9 sati. Na-

kon toga, između 9 i 11 časova i 15 i 17 časova su periodi kada je potrošnja približno konstantna. Ostatak dana karakterišu male varijacije potrošnje, pa su statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage takođe snimane između 21 i 22 časa. U intervalu od 23 do 5 časova se ima nagli pad opterećenja, sa minimumom između 4 i 5 časova.



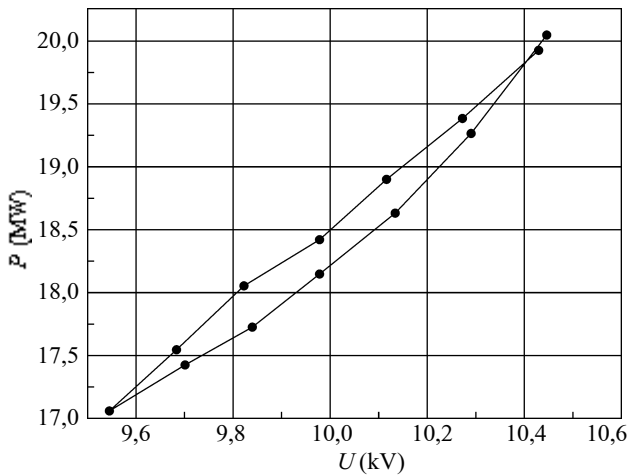
Slika 13. Dnevni dijagram potrošnje radnog dana

Ovaj dijagram potrošnje se dosta razlikuje od tipičnog za stambenu potrošnju u našoj zemlji. Niska cena električne energije je, globalno gledano, doprinela povećanju potrošnje usled masovnog korišćenja električne energije za grejanje stanova i kuvanje, kao i poravnanju ovog dijagrama, tako da nema izraženog večernjeg pika. Odnos aktivne i reaktivne snage je bio veliki u toku čitavog dana, odnosno faktor snage je varirao u uskim granicama oko vrednosti 0,987, što ukazuje na to da se radi o pretežno termičkoj potrošnji.

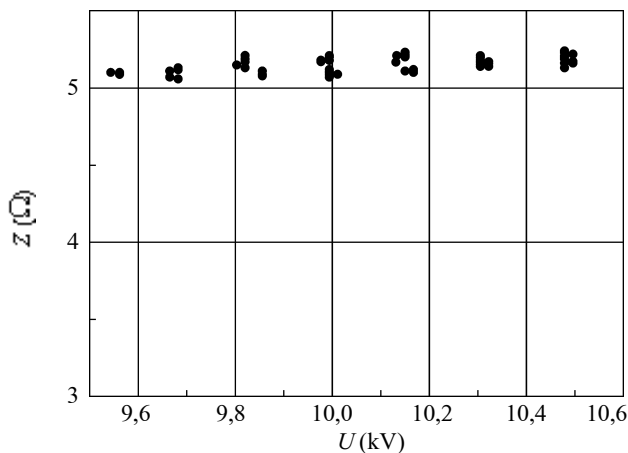
Jedan ciklus merenja promene prenosnog odnosa transformatora je trajao nekoliko minuta, a kriva koja se dobija iz svakog ciklusa merenja ima oblik histerezisa, slika 14. Statička karakteristika potrošnje u određenom delu dana se dobija usrednjavanjem rezultata nekoliko ovakvih merenja.

Za razliku od laboratorijskih merenja kada se napon napajanja mogao podešavati na željenu vrednost u slučaju njegovog kolebanja u toku eksperimenta, ovde je primarni napon, a samim tim i sekundarni napon transformatora, bio posledica trenutne situacije u elektroenergetskom sistemu. Osim toga, opterećenje u toku eksperimenta je variralo, ne samo usled promene napona napajanja, već i zbog uključenja/isključenja prijemnika. Ovakvo „disanje” potrošnje i promena napona se jasno uočava preko merenog modula impedanse na 10 kV nivou koji je prikazan na slici 15 a), odnosno 15 b). Na slici 15 b) je nacrtana i linearna kriva dobijena metodom najmanjih kvadrata, jer

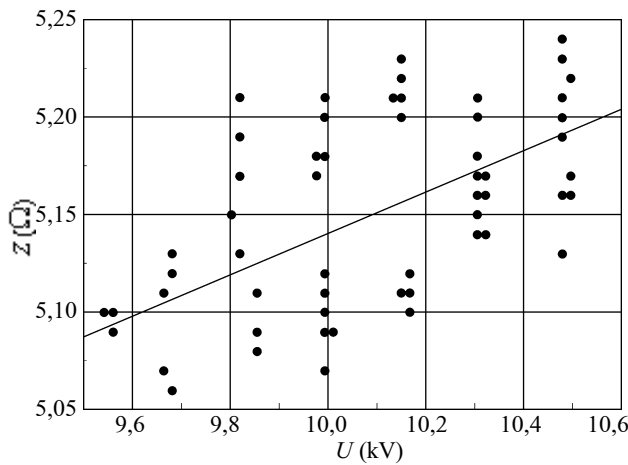
aproximacija polinomom drugog reda ne doprinosi boljem fitovanju rezultata. Sa ove slike se vidi da stambena potrošnja nije tipa konstantne impedanse kako se u velikom broju radova pretpostavlja.



Slika 14. Promena aktivne snage za vreme jednog ciklusa merenja



a)



b)

Slika 15. Rasipanje rezultata modula impedanse i njihovo fitovanje

Osetljivosti aktivne i reaktivne snage po naponu za nazivnu vrednost napona, koje su dobijene u različitim periodima dana, nalaze se u tabeli 4. Vrednosti koeficijenta osetljivosti aktivne snage po naponu iz tabele 4 za radni, odnosno neradni dan, odstupaju manje od 2,4 % od srednjih vrednosti za određeni period dana. To znači da se za pojedini period dana može usvojiti srednja vrednost, a to je:

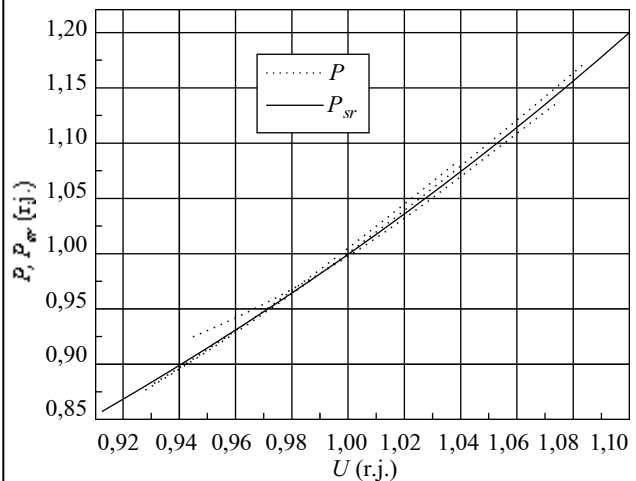
- 1,753 za jutarnji period,
- 1,795 za posle podne,
- 1,817 za uveče.

Štaviše, sve statičke karakteristike aktivne snage po naponu, dobijene u različitim dobima dana i danima u nedelji se mogu usrednjiti jednom statičkom karakteristikom prikazanom na slici 16. Tada je vrednost osetljivosti aktivne snage po naponu  $\left. \frac{dP}{dU} \right|_{U_n} = 1,792$ . Vrednosti ovog koeficijenta dobijene na osnovu merenja odstupaju od srednje vrednosti manje od 4,3 %.

Tabela 4.

Vrednosti koeficijenta osetljivosti aktivne i reaktivne snage na promenu napona

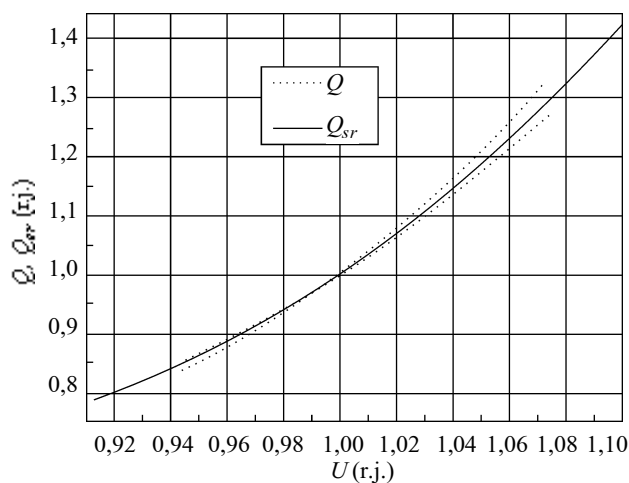
Doba dana	Jutro		Posle podne		Veče	
Dan	Radni dan	Neradni dan	Radni dan	Neradni dan	Radni dan	Neradni dan
$\left. \frac{dP}{dU} \right _{U_n}$	1,716	1,791	1,767	1,812	1,861	1,774
$\left. \frac{dQ}{dU} \right _{U_n}$	3,565	3,616	3,135	3,169	2,962	3,138



Slika 16. Pojedine statičke karakteristike aktivne snage P i srednja karakteristika  $P_{sr}$

Sa ove slike se vidi da su sve statičke karakteristike sličnog oblika, što ukazuje na to da se radi o skoro istom sastavu potrošnje u različitim dobima dana, i danima u nedelji. Potrošnja dela grada koji se napaja iz transformatorske stanice „Niš 13” preko transformatora 110/10 kV/kV je skoro isključivo stambena.

Vrednosti osetljivosti reaktivne snage po naponu za jutarnji period su приметно više od onih za ostale delove dana. Zbog promene sastava prijemnika, i srednja osetljivost aktivne snage na promenu napona za ovaj period se u većoj meri razlikuje od 2, koji odgovara čisto termičkoj potrošnji u okolini nazivnog napona. Srednja vrednost osetljivosti reaktivne snage za jutro, posle podne i večer su 3,59; 3,152 i 3,05, respektivno. Odstupanja od ovih vrednosti su manja od 2,9 % za pojedine delove dana. Na slici 17 su prikazane statičke naponske karakteristike reaktivne snage za različite dane i periode, kao i srednja statička karakteristika. Ova usrednjena kriva ima izvod jednak 3,264 pri nazivnom naponu, dok vrednosti date u tabeli odstupaju manje od 10,8 % od ovog broja. Srednja kriva relativno dobro aproksimira statičke karakteristike u delu od 0,95 do 1 r.j. napona, dajući do 6 % niže osetljivosti. U gornjem delu krive, za napone od 1 do 1,05 r.j., osetljivost srednje krive se razlikuje i do 18 % od onih za pojedine statičke karakteristike. Ovo pokazuje da se sa promenom sastava opterećenja menja prvenstveno nagib statičke karakteristike reaktivne snage, pa se zato u literaturi [11] može naći koeficijent samoregulacije reaktivne snage u širokim granicama, od 1,6÷6.



Slika 17. Pojedine statičke karakteristike reaktivne snage  $Q$  i srednja karakteristika  $Q_{sr}$ .

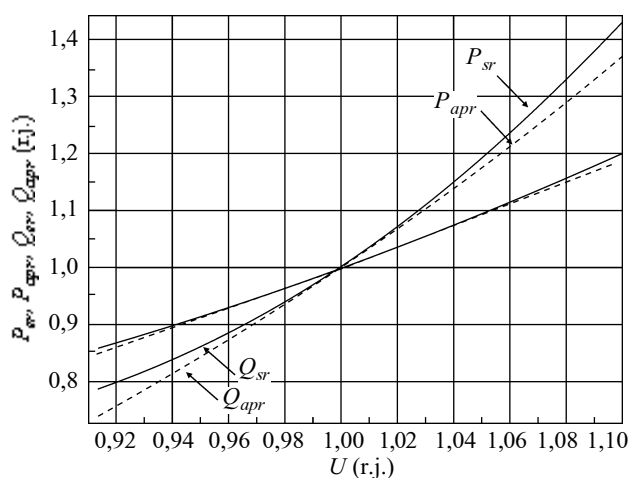
Osetljivosti aktivne i reaktivne snage na promenu napona koje su dobijene merenjem u ovoj transformatorskoj stanici koja napaja stambenu potrošnju, su bliske onim koje su navedene u [11] za ovu klasu zimi, ali se u različitoj literaturi mogu naći sasvim drugačije vrednosti [10, 13]. Ovo ukazuje na to da svako podneblje i u okviru iste kategorije ima različit sastav potrošnje. Zato je neophodno dobiti konkretne statičke karakteristike, a potom ih inkorporirati u dalje proračune i istraživanja.

Srednje statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage po naponu za  $U \in \{0,915 \div 1,1 r.j.\}$  imaju oblik:

$$P = 1,12 + 2,032 \cdot U + 1,912 \cdot U^2, \quad (18)$$

$$Q = 7,486 + 16,27 \cdot U + 9,784 \cdot U^2. \quad (19)$$

Jednom određene srednje statičke karakteristike potrošnje se mogu sa dovoljnom tačnošću, aproksimirati eksponencijalnim krivama, što je prikazano na slici 18. Greška koja se čini ovakvim aproksimacijama iznosi manje od 1,1 % kod aktivne snage, i manje od 6 % kod reaktivne snage, na krajevima ispitivanog naponskog opsega.



Slika 18. Srednje i aproksimirane statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage

#### 4. ZAKLJUČAK

Rezultati izvršenih eksperimenata kojima su određene statičke karakteristike termičke potrošnje, osvetljenja i motora, pokazuju da nijedan od ispitivanih prijemnika ne odgovara tipu konstantne snage, struje ili impedanse. Osetljivosti aktivne i reaktivne snage po naponu u okolini nazivnog napona u nekim slučajevima odstupaju od onih koji se mogu naći u literaturi za istoimene prijemnike, jer zavise od materijala, načina izrade, prateće opreme itd. Takođe, ove osetljivosti se menjaju sa promenom napona, što usložnjava problem i pokazuje da je tačno određivanje statičkih karakteristika prijemnika, čak i u okviru iste kategorije nemoguće, ali je zato neophodna barem njihova procena.

Na osnovu izmerenih statičkih karakteristika na 10 kV nivou transformatorske stanice „Niš 13” se pokazalo da je opterećenje tokom zime pretežno termičko. To je potvrdila i činjenica o faktoru snage bliskom jedinici.

Generalno gledano, statičke karakteristike potrošnje dobijene fitovanjem eksperimentalnih rezultata se mogu aproksimirati eksponencijalnim krivama sa konstantnim eksponentom koji je jednak izvodu karakteristika u okolini nazivnog napona uz grešku manju od 5 % pri promeni napona od 0,9 do 1,1  $U_n$  za termičke prijemnike, osvetljenje i stambenu potrošnju. Ovo nije slučaj kod asinhronog motora i konzumnog područja sa značajnim udelom ovih motora, gde se preporučuju karakteristike u obliku polinoma. Koeficijenti ovih karakteristika u velikoj meri zavise od snage motora i njegovog mehaničkog opterećenja, odnosno tipa pogona.

Pored određivanja i prognoze dnevnog dijagrama opterećenja, dalja istraživanja treba da budu u smislu utvrđivanja statičkih karakteristika potrošnje čvorova distributivne mreže sa industrijskom i trgovačko-administrativnom potrošnjom, i njihove upotrebe u cilju smanjenja gubitaka snage i energije regulacijom napojnog napona.

## 5. PRILOG

### Termički prijemnici:

1. Kvarcna grejalica: tip БДС 2099-85,  $P_n=1,6$  kW,  $U_n=220$  V,  $f_n=50$  Hz, ЕЛВА КВАРЦ - Bugarska,
2. Rešo: tip PR13,  $P_n=700$  W,  $U_n=220$  V,  $f_n=50$  Hz, FVUE FERIZAJ - Uroševac.

### Osvetljenje:

1. Fluorescentne svetiljke tipa FC 40 W, DS 6 500°K,  $U_n=220$  V,  $f_n=50$  Hz, TESLA - Pančevo, po dve u duo spoju koji sadrži dve prigušnice tipa F-40, FEP - Donji Milanovac i kondenzatore KPF 3219 3,5  $\mu$ F $\pm$ 4 % ISKRA - Kranj i KPB 1 213 33 000 pF ISKRA - Kranj.
2. Živine svetiljke
  - HPL-N 125 W, PHILIPS, proizvedeno u Belgiji, na red vezana sa prigušnicom tipa RP-125, ROTOR - Senta,
  - HPL-N 250 W, PHILIPS, proizvedeno u Belgiji, na red vezana sa prigušnicom tipa Z-250, FEP - Donji Milanovac.

### Trofazni asinhroni motor

Tip: ZK90L2,  $P_n=2,2$  kW,  $f_n=50$  Hz,  $\Delta$  380/Y 220 V, 5,2/3 A,  $\cos\phi=0,86$ ,  $n_n=2$  885 min<sup>-1</sup>, SEVER - Subotica.

Mehaničko opterećenje asinhronog motora je generator jednosmerne struje, koji radi u režimu dinamičke kočnice, tipa Z07 022,  $P_n=1,95$  kW,  $U_n=220$  V,  $I_n=12$  A, sa nezavisnom pobudom  $U_p=200$  V,  $I_p=0,61$  A, RADE KONČAR - Zagreb.

## 6. LITERATURA

- [1] D. Stojanović, L. Korunović, ANALIZA UTICAJA TIPA OPTEREĆENJA NA PRORAČUN DISTRIBUTIVNIH MREŽA, Elektroprivreda, br. 1, 2000, str. 52-58.
- [2] Н. Маркушевич, РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, Энергоатомиздат, Москва, 1984.
- [3] Ю. Гуревич, Л. Либова, Е. Хачатурян, УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ, Москва, Энергоиздат, 1981.
- [4] J. Ribeiro, F. Lange, A NEW AGGREGATION METHOD FOR DETERMINING COMPOSITE LOAD CHARACTERISTICS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, August 1982, pp. 2 869-2 875.
- [5] T. Lem R. Alden, COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND AGGREGATE INDUCTION MOTOR RESPONSES, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, November 1994, pp. 1 895-1 900.
- [6] G. Rogers, J. Manno, R. Alden, AN AGGREGATE INDUCTION MOTOR MODEL FOR INDUSTRIAL PLANTS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-10 395, No. 4, April 1984, pp. 683-690.
- [7] G. Richards, REDUCED ORDER MODELS FOR AN INDUCTION MOTOR GROUP DURING BUS TRANSFER, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989, pp. 494-498.
- [8] T. Thiringer, J. Luomi, COMPARISON OF REDUCED-ORDER DYNAMIC MODELS OF INDUCTION MACHINES, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, February 2001, pp. 119-126.
- [9] W. Price, K. Wirgau, A. Murdoch, J. Mitsche, E. Vahedi, M. El-Kady, LOAD MODELING FOR POWER FLOW AND TRANSIENT STABILITY COMPUTER STUDIES, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, February 1988, pp. 180-187.
- [10] C. Concordia, S. Ihara, LOAD REPRESENTATION IN POWER SYSTEM STABILITY STUDIES, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4, April 1982, pp. 969-977.
- [11] P. Kundur, POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL, Mc Graw-Hill, New York, 1994.
- [12] C. Taylor, POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY, Mc Graw-Hill, New York, 1994.
- [13] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, BIBLIOGRAPHY ON LOAD

MODELS FOR POWER FLOW AND DYNAMIC PERFORMANCE SIMULATION, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, February 1995, pp. 523-538.

- [14] A. Sarić, M. Čalović, FUZZY PRISTUP PRORAČUNU TOKOVA SNAGA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, Prvo jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, Zlatibor, 5-8. 10. 1998, R-6.01.

- [15] D. Tasić, UTICAJ STATIČKIH I DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA POTROŠNJE NA POJAVU NAPONSKOG SLOMA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, 1996.

- [16] M. Kostić, UTICAJ NAPONA U MREŽI NA OPTEREĆENJA I RACIONALNU POTROŠNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE, monografija autora, Institut Nikola Tesla, Beograd 1997.

---

Rad je primljen u uredništvo 08. 03. 2002. godine



---

*Dragan Kovačević,  
Slobodan Škundrić, Slobodan Mikičić*

# Merenja električnih složenoperiodičnih veličina

Stručni rad  
UDK: 621.3.018.1; 53.08

---

*Rezime:*

*Merenja električnih veličina za slučaj veoma izobličenih, složenoperiodičnih signala mogu biti, u zavisnosti od primenjene metodologije i/ili tehnološke realizacije, praćena značajnim greškama. U radu je opisan matematički model, realizacija virtuelnog instrumenta i njegova praktična primena za merenja efektivnih vrednosti struje i napona, analize harmonika, analiza snaga i faktora snage kod kompaktnih, štedljivih fluorescentnih svetiljki. Analiza rezultata ukazuje na to da se, u slučaju merenja električnih veličina u prisustvu značajnih harmonijskih izobličenja, pored merne nesigurnosti mora voditi računa i o dinamičkim karakteristikama primenjene merne instrumentacije.*

**Ključne reči:** *merenje faktora snage, složenoperiodični signali, virtuelni instrumenti*

---

*Abstract:*

## *THE ELECTRICAL MEASUREMENT IN NONSINUSOIDAL CONDITIONS*

*On the methodological level, and also in measurement practice, significant errors have been noted in the measurement of electric quantities in distorted periodic systems, depending on the technological realization of the electronic measuring device or system. The paper describes a virtual instrument approach to the measurement of complex periodic electric signals, and particularly the power factor of "power saving" compact fluorescence bulbs. The analysis of the results also indicates that, in processing signals with a high harmonic distortion, it is necessary to pay attention not only to the measurement uncertainties but also to the dynamics of the measuring instruments that are used.*

**Key words:** *Nonsinusoidal conditions, virtual instrument, power factor measurement*

---

## **1. UVOD**

Metrologija, nauka o merenjima, i instrumentacija kojom se ta merenja obavljaju, su osnova prirodnih nauka i svuda prisutni faktor moderne automatske proizvodnje, trgovine, obezbeđenja kvaliteta, saobraćaja, zaštite čoveka i životne i radne sredine, medicinske dijagnostike i tretmana. Merenja su,

istovremeno, i ključni element istraživanja i razvoja u svakoj vrsti praktične delatnosti.

Osnovne karakteristike savremenih merenja su:  
– merenje gotovo svih fizičkih veličina električnim putem; senzori i merni pretvarači su nezaobilazni elementi koji pretvaraju ulaznu fizičku veličinu u pogodan izlazni električni signal.

---

*Dr Dragan Kovačević, dr Slobodan Škundrić, Slobodan Mikičić  
– Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, 11000 Beograd, Koste Glavinića 8a*

- tesno povezivanje metroloških i informacijskih sistema, koje za posledicu ima pojavu novih metoda merenja (inteligentna merenja) i/ili tehnologija (inteligentni pretvarači odnosno virtuelni instrumenti).
- tehnološki prelazak od sredstava merenja (senzori, pretvarači, instrumenti, merni sistemi) sa hardverom kao dominantnim elementom na sredstva merenja kod kojih softver postaje dominantan i ključni resurs razvoja i proizvodnje.

Razvoj sredstava merenja može se sagledati kao niz razvojnih tehnoloških koraka - generacija: analogna, digitalna,  $m^P$ -bazirana („smart“) i inteligentna sredstva merenja. Sredinom poslednje dekade dvadesetog veka došlo je do razvoja posebne klase inteligentnih instrumenata - virtuelni instrumenti (VI)- koji se realizuju kao aplikativni softverski paketi sa funkcijama mernog instrumenta.

Usled naglog razvoja energetske elektronike i elektronski regulisanih napajanja pogona i potrošača, sve veće količine električne energije se prenose i troše u uslovima izobličenih struja i napona. Ovakvo realno stanje nije praćeno, pogotovo u našoj zemlji, odgovarajućim proučavanjem metodologija i tehnologija merenja složenoperiodičnih električnih veličina. Generalni koncepti nastali razvojem savremenih metoda i tehnologija merenja [1] primenjeni su u ovom radu na oblast merenja električnih složenoperiodičnih veličina.

## 2. DEFINICIJA PROBLEMA

Ekstremno velika potrošnja električne energije za grejanje i osvetljenje stambenih i poslovnih zgrada prouzrokuje izobličenja periodičnih i godišnjih dijagrama opterećenja, porast operacionih troškova, uvoz značajnih količina električne energije, kao i veoma ozbiljne poremećaje u pouzdanosti i sigurnosti rada elektroenergetskog sistema Srbije, posebno u zimskim periodima. Detaljne analize [2] pokazuju da bi masovna upotreba „štedljivih“ kompaktnih fluorescentnih svetiljki (KFS), umesto klasičnih sijalica sa užarenim vlaknom, doprinela značajnoj uštedi električne energije. Pri analizi potrošnje reaktivne energije KFS, postavio se problem merenja veoma izobličenih električnih veličina.

Na metodološkom nivou, a i u praktičnim merenjima, uočena su velika odstupanja u tačnosti merenja složeno periodičnih električnih veličina, u zavisnosti od tehnološke realizacije elektronskog mernog uredaja ili sistema. Elektronski instrumenti se konstruišu tako da mere jednu od tri karakteristične veličine naizmeničnog strujnog ili naponskog signala: maksimalnu vrednost (peak detector), srednju vrednost (averaging detector) ili efektivnu vrednost (root mean square

(RMS) detector). Još veću konfuziju, koja često ostaje izvan saznanja korisnika merila, donosi činjenica da se svi ovi instrumenti podešavaju i kalibrišu tako da, u uslovima prostoperiodičnih, „sinusoidalnih“, signala prikazuju efektivnu vrednost (kod instrumenata koji mere maksimalnu vrednost koristi se faktor multiplikacije 0,707, a kod instrumenata koji mere srednju vrednost pri puno talasnom ispravljanju faktor multiplikacije je 1,110) [3]. Upotreba različitih vrsta instrumenata u čisto sinusoidalnim uslovima pokazaće slaganje unutar deklariranih klasa tačnosti, ali će isti ti instrumenti upotrebljeni u uslovima prisustva značajnih harmonijskih izobličenja pokazivati velike međusobne razlike, pa često i rezultate koji nemaju nikakvog fizičkog smisla. Ovaj rad ima za cilj da, između ostalog, upozori na potreban oprez u izboru metodologije, tehnologije, instrumentacije i tumačenju rezultata u predmetnoj oblasti električnih merenja.

Istraživanja metoda merenja ukazuju na to da je, u slučaju periodičnih signala, najadekvatnije meriti pravu efektivnu vrednost  $V_{RMS}$  (True RMS) signala, po definiciji:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} n^2 dt} \quad (1)$$

Metode merenja prave efektivne vrednosti variraju od apsolutnih (efektivna vrednost se meri na osnovu merenja Džulovih gubitaka, odnosno merenja temperature), preko analognih (instrumenti sa kretnim gvoždem, elektrodinamički instrumenti), analogno-digitalnih (True RMS to DC konvertori + A/D konvertori) do čisto digitalnih (kvantifikacija po nivou i vremenu i numeričke operacije u digitalnom domenu, prema jednačini 1).

Merenje snaga u slučaju složenoperiodičnih signala je znatno kompleksnije. Neka su trenutne vrednosti napona  $u$  i struje  $i$ , predstavljene preko razvoja u Furijeov red:

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} U_h \sin(h\omega_0 t + \mathbf{q}_h) \\ i(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \mathbf{j}_h) \end{aligned} \quad (2)$$

gde su:  $h$  red harmonika,  $\omega_0 = 2\pi f$  kružna učestanost, a  $\mathbf{q}_h$  i  $\mathbf{j}_h$  fazni stavovi napona i struje, respektivno.

Polazeći od ovih izraza, aktivna snaga se definiše kao:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos(\mathbf{q}_h - \mathbf{j}_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_{hh} \quad (3)$$

gde je sa  $P_{hh}$  označena aktivna snaga dobijena proizvodom  $h$ -tog harmonika napona i  $h$ -tog harmonika struje.

Prividna snaga je:

$$S = U_{ef} I_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} S_{hk}^2} \quad (4)$$

gde je sa  $S_{hk}$  označena prividna snaga dobijena proizvodom  $h$ -tog harmonika napona i  $k$ -tog harmonika struje.

Standardna definicija faktora snage takode pretpostavlja prostoperiodične vrednosti napona i struje, pa se svodi na  $\cos \varphi$ , odnosno fazni pomeraj struje u odnosu na napon. Definicija faktora snage u uslovi- ma složenoperiodičnih signala postaje kompleksna, a realizacija merenja znatno složenija. U slučaju nesinusnih talasnih oblika, a polazeći od jednačina (3) i (4), faktor snage  $\lambda$  se definiše kao:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} P_{hh}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} S_{hk}^2}} \quad (5)$$

Prethodna analiza ukazuje na to da se, u slučaju merenja složenoperiodičnih električnih veličina, pored greške merenja, mora voditi računa i o dinamici (kvantifikaciji po vremenu) primenjenih elektronskih instrumenata. U cilju što tačnijeg i efikasnijeg merenja električnih veličina, a pre svega faktora snage većeg broja KFS različitih karakteristika i proizvođača, kao i provere mogućnosti primene tehnologije VI u ovoj oblasti, pristupilo se realizaciji jednog VI za merenje složenoperiodičnih električnih veličina.

### 3. REALIZACIJA VIRTUELNOG INSTRUMENTA

Virtuelni instrumenti predstavljaju najnoviju generaciju u razvoju električne merne instrumentacije. Mada još uvek nije usvojena jedinstvena strogo formalna definicija pojma VI, u literaturi [3,4] se

moгу pronaći bliža određenja koja se koncentrišu na dva glavna pristupa:

- hardver opšte namene integrisan sa namenski razvijenim softverom na PC platformi, sačinjava instrument sa definisanim metrološkim karakteristikama koje ne poseduju pojedinačno ni upotrebljeni hardver niti upotrebljeni softver,
- aplikativni softverski paket koji ima izgled i funkcionalna svojstva mernog instrumenta, a u stvari to nije (razlog za uvođenje odrednice virtuelni).

U oba pomenuta određenja podrazumeva se realizacija na nekoj od PC platformi uz korišćenje raspoloživih hardverskih i softverskih računarskih resursa.

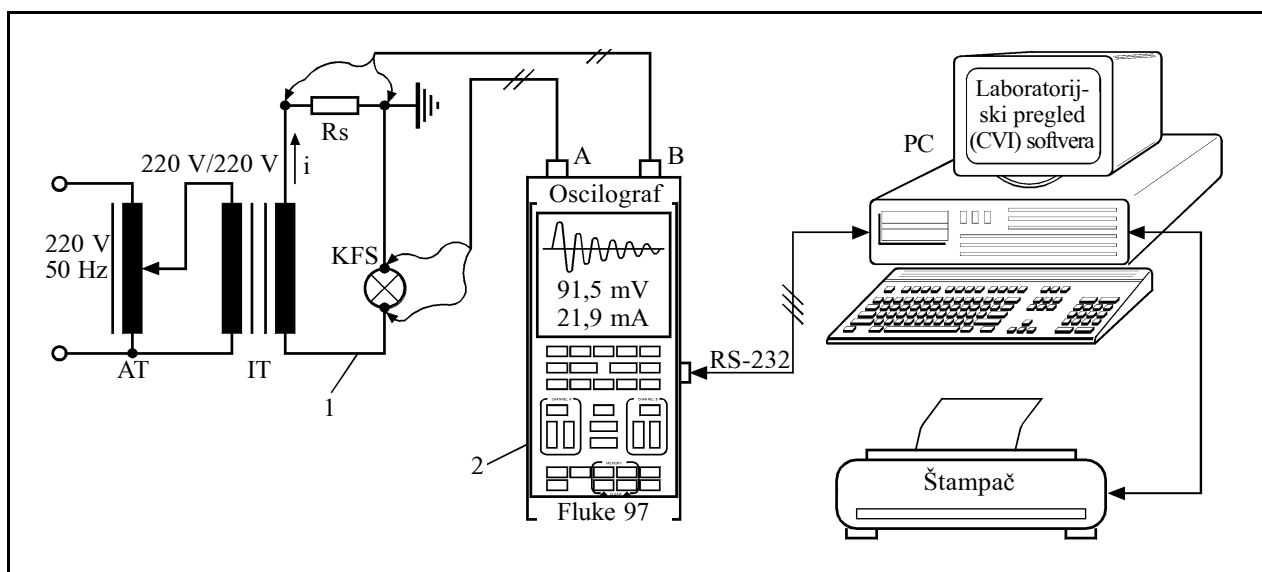
U nastavku rada, opisan je postupak formiranja VI sa osnovnim funkcijama: harmonijska analiza struje i napona, merenje prave efektivne vrednosti, digitalni analizator snage, merenje faktora snage. Postavljen je zahtev za merenje snage u monofaznom sistemu sa jako izobličenim signalima, što je ukazalo na potrebu korišćenja hardvera sa najmanje dvokanalnim mernim ulazima, greškom manjom od  $\pm 0,5 \%$ , i dinamikom u kHz ili MHz području učestanosti. Korišćeni su sledeći hardverski i softverski resursi:

#### HARDVER:

- Scopemeter, 50 MHz, tip FLUKE 97,
- Pentium III PC računar,
- Serijska komunikacija RS232.

#### SOFTVER:

- Programi LabView/CVI u Windows okruženju, sa realizovanim funkcijama:
- Merenje efektivne vrednosti struje i napona,



Slika 1. Realizacija virtuelnog instrumenta: 1- električna šema; 2- standardni instrument; 3- aplikativni softver (VI)

- Harmonijska analiza struje i napona,
- Analizator snage,
- Merenje faktora snage.

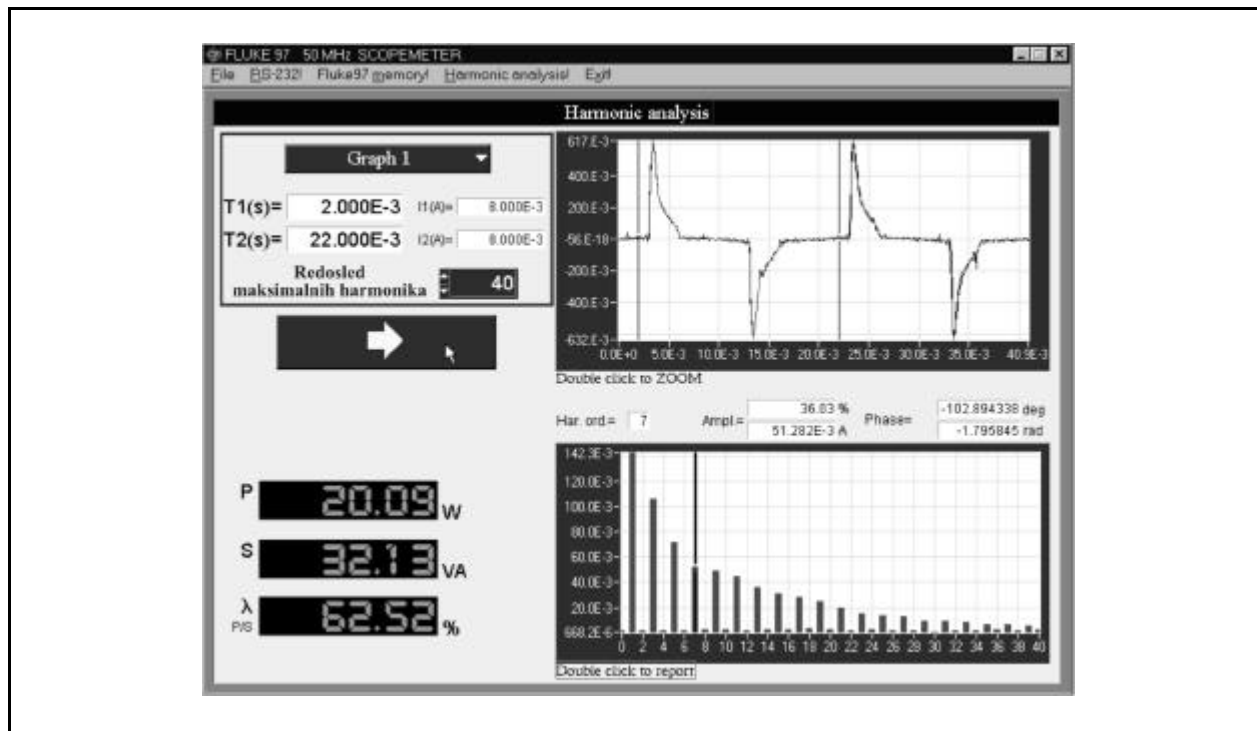
Na slici 1 je prikazana blok šema merenja električnih veličina u jednostavnom rednom strujnom kolu, u kome se iz monofaznog izvora (mreža 220 V, 50 Hz) preko auto (AT) i izolacionog (IT) transformatora napaja KFS, a napon i struja (uz pomoć šanta  $R_s$ ) se mere instrumentom oscilograf (Scopemeter), Fluke 97, na mernim kanalima A i B, respektivno. Da bi se proširile merne mogućnosti i formirao VI sa planiranim funkcijama, instrument Fluke 97 je preko serijske veze RS 232 povezan sa standardnim PC računarom, koji radi pod Windows operativnim sistemom.

Realizacijom VI stvoreni su uslovi da se kvalitetno i efikasno sprovedu merenja električnih veličina u električnom kolu, prikazanom na slici 1, sa KFS kao opterećenjem.

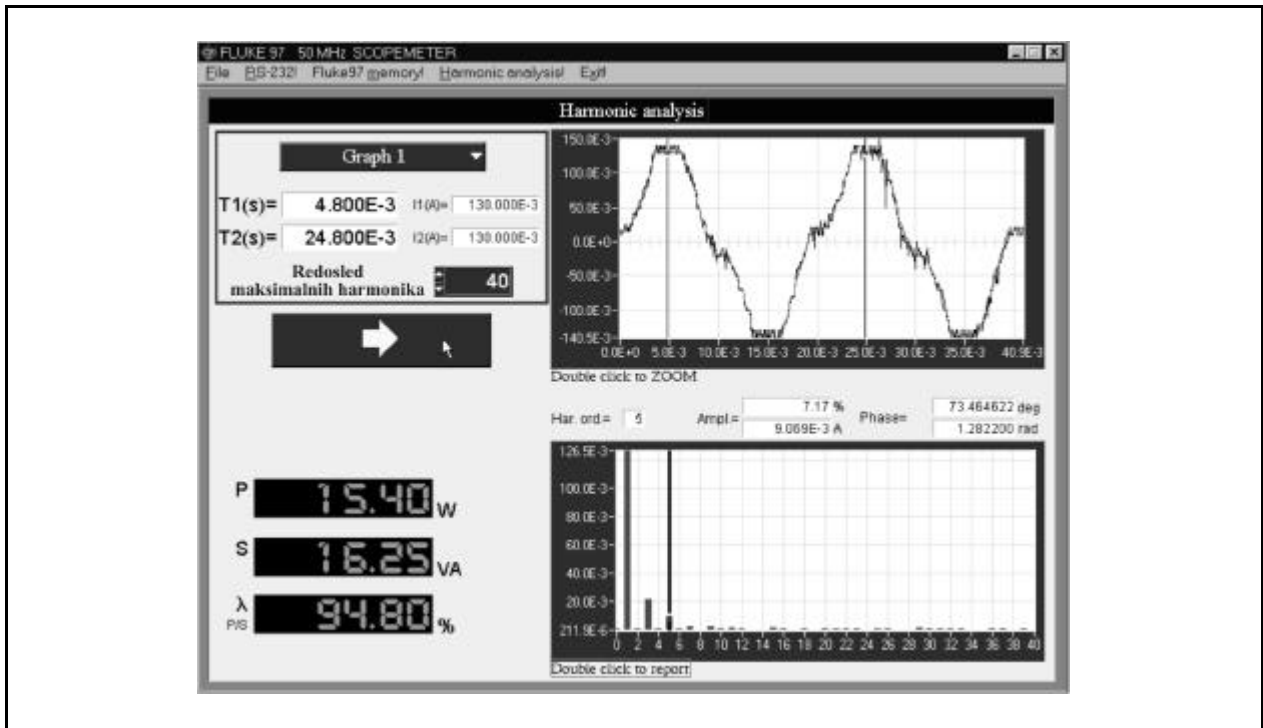
#### 4. MERENJE FAKTORA SNAGE KFS

Za merenje faktora snage postoje brojne metode, kako direktne tako i indirektno. Za direktna merenja u praksi se koriste, sada već tehnološki prevaziđeni, analogni instrumenti sa ukrštenim kalemovima logometarskog tipa, sa elektrodinamičkim ili ferodinamičkim mernim sistemom. Savremeni digitalni merni instrumenti za direktno merenje faktora snage retko se sreću u našoj metrološkoj praksi. Kao

indirektno, koriste se sve praktične metode za merenje napona, struje i faznog pomeraja (aktivne snage) u kolima naizmenične struje. Pri merenju faktora snage, treba voditi računa da njegovo poistovećivanje sa  $\cos \varphi$  (kosinusfimetri) važi samo u specijalnom slučaju uravnoteženih sistema sa strujama i naponima prostoperiodičnog oblika. U slučaju neuravnoteženih sistema, a posebno kada su naponi i struje složenoperiodične funkcije, pojam faznog ugla gubi svoj fizički smisao. Istraživanja ukazuju na to da klasični analogni i digitalni instrumenti često nisu dovoljno prilagođeni merenjima faktora snage u uslovima izraženih nesimetrija sistema i/ili jakih izobličenja mernih signala. Da bi se prevazišla navedena ograničenja klasične instrumentacije, realizovani VI iskorišćen je kao merni sistem za merenje faktora snage KFS. Osnovni interes je bio merenje faktora snage pojedinačnih KFS različitih proizvođača i modela. Pored evidentne uštede u aktivnoj energiji, kod KFS se mora voditi računa i o potrošnji reaktivne energije, čije prekomerno prisustvo u sistemu uzrokuje pojave povećanih gubitaka i nestabilnosti. Prema blok šemi sa slike 1, a uz korišćenje proširenog matematičkog modela opisanog jednačinama od (1) do (5), vršena je harmonijska analiza struja i napona, analiza snaga, a takođe je i meren faktor snage većeg broja KFS. Kao primeri su, na slikama 2 i 3, prikazani rezultati merenja električnih veličina KFS sa malim („lošim”) i velikim („dobrim”) faktorom snage, respektivno.



Slika 2. Rezultati merenja KFS sa malim faktorom snage



Slika 3. Rezultati merenja KFS sa velikim faktorom snage

Na slici 2 se uočava veoma veliko izobličenje struje, sa značajnim sadržajem viših harmonika (na primer: harmonik 7-og reda ima amplitudu oko 36 % u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika), što je praćeno faktorom snage od svega  $\lambda=0,62$ . Na slici 3 su prikazani rezultati merenja kod KFS sa znatno manjim izobličenjem struje (uspešnije rešenje u regulacionom delu energetske elektronike KFS), praćeno znatno manjim sadržajem harmonika i veoma dobrim faktorom snage od  $\lambda=0,95$ . Već je na prvi pogled vidljiva sva privlačnost (tačnost, fleksibilnost, efikasnost) merenja uz pomoć VI u odnosu na uobičajeni pristup merenja faktora snage klasičnom instrumentacijom.

Za razumevanje uticaja dinamike merenja na tačnost određivanja faktora snage daje se sledeća ilustrativna analiza. Za slučajeve sa slika 2 i 3, na osnovu jednačine (5) i realnih rezultata merenja, sračunati su faktori snaga  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ , respektivno, uzimajući u obzir:

- samo prvi harmonik struje i napona ( $\lambda_{1A}$  i  $\lambda_{2A}$ ).
- sve harmonike struje i napona do 5-og reda ( $\lambda_{1B}$  i  $\lambda_{2B}$ ).
- sve izmerene harmonike struje i napona ( $\lambda_{1C}$  i  $\lambda_{2C}$ ).

Pod učinjenim pretpostavkama dobijene su sledeće vrednosti faktora snage:

$$\begin{array}{lll} \lambda_{1A} = 0,95 & \lambda_{1B} = 0,710 & \lambda_{1C} = 0,62 \\ \lambda_{2A} = 0,96 & \lambda_{2B} = 0,954 & \lambda_{2C} = 0,95 \end{array}$$

Uočava se postojanje kvantitativnih razlika dobijenih rezultata, u zavisnosti od reda uračunatih harmonika. Razlike su znatno izraženije kod signala sa većim izobličenjem. Pored kvantitativnih razlika, prethodna analiza ukazuje i na mogućnost izvođenja pogrešnih kvalitativnih zaključaka. Merenje samo prvog harmonika dovodi do pogrešnog zaključka da obe KFS imaju približno jednak, dobar faktor snage! Korektno merenje, uz obračun svih izmerenih viših harmonika, ukazuje na sasvim drugačiji zaključak: KFS sa slike 2 ima loš ( $\lambda=0,62$ ), a KFS sa slike 3 dobar ( $\lambda=0,95$ ) faktor snage.

Takode treba ukazati na činjenicu da kod veoma izobličenih signala (kakav je signal struje na slici 2) udeo harmonika visokog reda (na primer preko 40, što odgovara učestanosti u kHz području) može iznositi i nekoliko procenata, te treba biti oprezan pri tumačenju merne nesigurnosti rezultata merenja.

## 5. ZAKLJUČAK

*U radu je opisan savremen pristup merenju složenoperiodičnih električnih veličina. Ova tema postaje sve aktuelnija s obzirom na nastavak trendova ubrzanog razvoja i primene regulisanih pogona i energetske elektronike. Klasične metodologije i/ili instrumentacije često ne mogu da daju zadovoljavajuće odgovore na realne zahteve merenja u uslovima velikih izobličenja mernih signala. Autori su ukaza-*

li na mogućnosti primene tehnologije VI u ovoj oblasti merenja, koju su aplicirali na analizu električnih veličina KFS. U odnosu na klasične instrumente, VI imaju znatno veći potencijal u pogledu tačnosti, fleksibilnosti i efikasnosti merenja. Rezultati merenja pokazuju velike razlike u faktorima snaga različitih KFS (od 60% do 95%) pa pred KFS treba postaviti zahteve za malom potrošnjom kako aktivne tako i reaktivne energije.

Analize rezultata, takođe ukazuju na to da se u slučaju obrade signala sa velikim harmonijskim izobličenjima (primer sa slike 2) mora voditi računa ne samo o mernoj nesigurnosti, nego i o dinamičkim karakteristikama (inercija kod analognih, odnosno kvantizacija po vremenu kod digitalnih instrumenata) upotrebljenih mernih instrumenata.

---

Rad je primljen u uredništvo 27. 02. 2002. godine

## 6. LITERATURA

- [1] D. Kovačević: INTELIGENTNI MERNI PRETVARAČI SILE NA BAZI TENZOMETARSKIH TRAKA, Doktorska disertacija, Elektronski fakultet Niš, Niš, 1999. godine.
- [2] S. Ružić, Lj. Mačić, Č. Dobrijević: FLUORESCENTNE SVETILJKE - ZNAČAJNA MOGUĆNOST ZA RACIONALIZACIJU POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE, ENYU, Zlatibor, 1999. godine.
- [3] W. Winiacki: VIRTUAL INSTRUMENTS - WHAT DOES IT REALLY MEAN?, Proc. of IMEKO World Congress, Tampere, Finland, 1997. godine.
- [4] D. Kovačević, S. Škundrić, B. Dimitrijević: VIRTUAL ELECTRONIC SCALES, Proc. of IMEKO World Congress, Vienna, Austria, 2000. godine.

# Komercijalna upotreba polihlorovanih bifenila i moguće zagađenje životne sredine

Stručni rad  
UDK: 66; 621.315.615

---

*Rezime:*

*Polihlorovani bifenili su smeša sintetičkih organskih jedinjenja sa istom osnovnom hemijskom strukturom, poznati kao hlorovani ciklični ugljovodonici.*

*Jedinjenja iz grupe polihlorovanih bifenila su više decenija, pod različitim trgovačkim nazivima (piralen, pirohlor, piranol, arohlor i dr.), široko korišćena u različitim oblastima privrede.*

*Sredinom 60-ih godina razvijene naučne metode omogućile su da se utvrdi da se polihlorovani bifenili akumuliraju u prirodi zahvaljujući njihovom izuzetno niskom stepenu biodegradibilnosti. Ovim ispitivanjima polihlorovani bifenili su identifikovani kao potencijalni rizik za životnu sredinu i zdravlje životinja i humane populacije.*

*U ovom radu dat je prikaz komercijalne upotrebe polihlorovanih bifenila i moguća zagađenja životne sredine upotrebom ovih materija.*

**Ključne reči:** *polihlorovani bifenili, upotreba, karakteristike, životna sredina, zagađenje*

---

*Abstract:*

## COMMERCIAL USE OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS AND POSSIBLE POLLUTION OF THE ENVIRONMENT

*Polychlorinated biphenyls are a mixture of synthetic organic compounds with the same basic chemical structure, known as chlorinated cyclic hydrocarbons.*

*This type of polychlorinated biphenyls has been used for several decades, in different branches of industry, under different commercial names.*

*In the mid sixties scientific methods were developed to identify that this kind of chemicals are accumulated in nature, due to their high stability, and potential risk to the environment and human beings.*

*This paper deals with usage of polychlorinated biphenyl's and possible environmental pollution.*

**Key words:** *polychlorinated biphenyls, use, characteristics, environment, pollution*

---

## 1. UVOD

Polihlorovani bifenili (PCB) su sintetičke organske hemijske supstance poznate kao hlorovani ugljovodonici. Hemijska formula PCB je  $C_{12}H_{(10-n)}Cl_n$ , gde je n broj atoma hlora koji se kreće od 1 do 10. Ova klasa jedinjenja uključuje sve komponente sa bifenilnom strukturom (dva povezana benzoeva prstena) koja su podvrgnuta hlorisanju do različitih stepena, a razlikuju se samo po broju i mestu vezivanja atoma hlora za osnovni molekul bifenila. Postoji ukupno 209 mogućih izomera PCB -a, koji nastaju adicijom hlora na osnovni molekul bifenila  $C_{12}H_{10}$ , ali samo 130 se mogu sresti u komercijalnim proizvodima. Komercijalni PCB ulja su uglavnom smeše od 50 ili više izomera [1].

Postoje dve prihvaćene nomenklature za jedinjenja ovog tipa: po jednoj od njih mesto supstitucije hlora u molekulu je označeno brojem ugljenikovog atoma u odnosu na bifenilnu vezu koja se nalazi na prvom atomu ugljenika. Drugi tip nomenklature, preko IUPAC brojeva, obeležava svako jedinjenje ovog tipa brojem od 1 - 209 [3].

## 2. FIZIČKO - HEMIJSKE KARAKTERISTIKE POLIHLOROVANIH BIFENILA

Fizičko-hemijske karakteristike polihlorovanih bifenila su odredile i omogućile njihovu široku komercijalnu primenu. Najvažnije karakteristike, koje uglavnom zavise od udela hlora u molekulu bifenila su: tečno agregatno stanje na sobnoj temperaturi ( $\rho_8 = 1,182 - 1,566 \text{ kg/dm}^3$ ); slaba rastvorljivost u vodi; dobra rastvorljivost u organskim rastvaračima; relativno visoka temperatura paljenja ( $170 - 380 \text{ }^\circ\text{C}$ ), što ih svrstava u red nezapaljivih tečnosti; visoka temperatura ključanja; neeksplozivnost; slaba električna provodljivost, tj visoka dielektrična konstanta; slaba električna probojnost, što im omogućava primenu kao izolacionog fluida u električnim uređajima; velika termička provodljivost; velika termička i hemijska stabilnost, što obezbeđuje primenu u uređajima gde je potreban prenos toplote; niski pritisak pare i druge.

Nažalost, termička i hemijska stabilnost, koja je omogućila tako široku primenu PCB u industriji, čini ih veoma nezgodnim i nepoželjnim zagađivačima u životnoj sredini. PCB su postojani kada se nađu u prirodi, jer su otporni na metabolične procese koji bi ih mogli razgraditi na jednostavnije hemijske komponente. Slaba rastvorljivost u vodi dovodi do akumulacije PCB u masnom tkivu iz-

loženih životinja i ljudi. Za polihlorovane bifenile se zna da izazivaju hronične reproduktivne probleme, gastrodigestivne poremećaje i kožna oštećenja. Takođe, prema Američkoj agenciji za zaštitu životne sredine (EPA), PCB se smatraju verovatno kancerogenim. Znači, pored dobrih osobina, polihlorovane bifenile karakterišu toksičnost i kancerogenost. U organizam mogu dospeti kroz kožu ili oralnim putem i u tom slučaju se talože u masnim tkivima, bez mogućnosti degradacije. Kasnih 1970-tih godina je otkriveno da pri sagorevanju PCB-a na temperaturama od  $500-800 \text{ }^\circ\text{C}$  u prisustvu kiseonika, nastaju polihlorovani dibenzofurani i dibenzodioksini, uključujući izuzetno otrovan tetrahlor dibenzodioksin.

## 3. KLASIFIKACIJA PO KONCENTRACIJAMA POLIHLOROVANIH BIFENILA

Mnoge zemlje su razvile klasifikacione šeme za fluide i materijale koji sadrže PCB. Ovi sistemi su korisni za definisanje prioriteta u menadžmentu PCB, kao i za utvrđivanje postupaka za sigurnu upotrebu i radne uslove. U većini zemalja, uključujući Australiju, Kanadu, Nemačku, Švedsku, Veliku Britaniju i Ameriku, smatraju materije sa sadržajem većim od 50 ppm PCB, kao materije sa graničnim sadržajem za primenu zakonske regulative. U ovim zemljama materijama sa sadržajem PCB većim od 50 ppm, moraju se rukovati po specifičnoj PCB regulativi.

U tabelama 1 i 2 dati su primeri moguće klasifikacije materijala po sadržaju PCB (5).

Tabela 1.  
Klasifikacija na osnovu masenog sadržaja PCB izraženom u ppm

PCB (ppm)	Klasa materijala
>500	„Čisti” PCB materijali
50 – 500	Materije zagađene PCB
5 – 50	Materije regulisano zagađene PCB
<5	Materije nezagađene PCB

Tabela 2.  
Klasifikacija na osnovu masenog sadržaja PCB izraženom u masenim %

Sadržaj PCB (% masti)	Klasa materijala
0,1	Kontrolisano zagađene materije
>0,1	Zagađene materije
>0,5	Zagađene materije



Napomena: Tabela 1 se zasniva na zakonskoj regulativi u Sjedinjenim Američkim Državama, a tabela 2 se zasniva na zakonskoj regulativi u Švedskoj.

#### 4. KOMERCIJALNA UPOTREBA POLIHLOROVANIH BIFENILA

Iako su laboratorijski sintetisani još 1866. godine, polihlorovani bifenili su prvi put proizvedeni u industrijskim razmerama 1929. godine u Monasanto hemijskoj industriji (SAD), pod komercijalnim nazivom „Askarel” (poznati su i drugi trgovački nazivi kao što su: piralen, arohlor, fenohlor, kanehlor i sl.), od kada datira i njihova industrijska upotreba. Jednjenja iz grupe polihlorovanih bifenila su više decenija, pod različitim trgovačkim nazivima, široko korišćena u različitim oblastima privrede: kod proizvodnje izolacionih materijala, adhezivnih sredstava, plastičnih masa, boja, lakova, maziva, ulja za hidraulične uređaje, pesticida, štamparskih boja, radnih fluida za prenos toplote i sl. Između 1926. i 1977. godine široko je bila rasprostranjena proizvodnja opreme koja sadrži polihlorovane bifenile, uglavnom za primenu u stabilnim uslovima. Otporni na plamen i nezavisni od uslova grejanja i transporta, PCB su našli najširu primenu u dielektričnim fluidima.

##### 4.1. Proizvodnja polihlorovanih bifenila

Kao što je napomenuto u uvodu, smeše polihlorovanih bifenila se industrijski proizvode direktnim hlorovanjem bifenila anhidrovanim gasovitim hlorom, uz upotrebu hlorida gvožđa kao katalizatora. U zavisnosti od reakcionih uslova stepen hlorovanja varira od 21- 66 %. Srednji sadržaj hlora se kontroliše reakcionim uslovima u cilju dobijanja proizvoda željenih fizičko-hemijskih osobina. Sirovi proizvodi se dalje prečišćavaju u cilju uklanjanja boje, hlorovodonika i katalizatora, što se postiže dejstvom baza i frakcionom destilacijom. Nečistoća u komercijalnim proizvodima ima oko 0,01 %, a sačinjavaju ih: polihlorovani dioksini i furani (PCD/F), terfenili, nafteni kvaterfenili i dibenzoparadioksini.

Polihlorovani bifenili takođe mogu nastati kao nus proizvodi pri proizvodnji nekih hlorovanih organskih jedinjenja.

##### 4.2. Specifikacija polihlorovanih bifenila

Kao što je već rečeno, polihlorovani bifenili se industrijski proizvode kao složene smeše još od 1929. godine. Većina proizvođača smanjila je ili sasvim prekinula njihovu proizvodnju sedamdesetih godina. Ukupno proizvedena količina PCB (do zabrane njihove proizvodnje) je procenjena na oko 1,5 miliona tona. Najveći proizvođači su bili: Monasanto (SAD), Bajer AB (Nemačka), Kanegfuči (Japan), Prodolek (Francuska).

U Jugoslaviji PCB nije bio proizvođen, već je kao gotov proizvod uvožen uz prateću opremu. Korisnici PCB opreme su Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije”, vojska, PTT i dr.

U tabeli 3 navedeni su veći svetski proizvođači PCB i trgovački nazivi PCB smeša.

Tabela 3.

Veći svetski proizvođači PCB i trgovački nazivi proizvoda

Proizvođač	Zemlja	Trgovački naziv
Monsanto	SAD i GB	Aroclor
Bayer	SR Nemačka	Chlophen
Prodelec	Francuska	Phenoclor i Piralen
Kanegafuchi	Japan	Kaneclor
Mitsubishi-Monsanto	Japan	Santotherm
Caffaro	Italija	Fenclor
Solov	SSSR	
Chemko	Čehoslovačka	

U tabeli 4 data je lista (po abecednom redu) većeg broja trgovačkih naziva i sinonima koji se uobičajeno daju PCB smešama. Trgovački nazivi PCB smeša datih u ovoj tabeli nisu vezani za odgovarajuću primenu date smeše, i ne određuju je.

Tabela 4.  
Trgovački nazivi i sinonimi za PCB smeše

Aeclor (t)	Cloresil	Montar
Adkarel	Chlophen (t)	Nepolin
ALC	Delor (Češka Republika)	Niren
Apirolio (t,c)	Diaclor (t,c)	No-Famol
Aroclor (t,c) (SAD)	Dialor ( c )	No-Flamol (t, c) (SAD)
Aroclor 1016 /t,c)	Disconon ( c )	NoFlamol
Aroclor 1221 (t,c)	Dk (t,c)	Nezapaljiva tečnost
Aroclor 1232 (t,c)	Ducanol	Pheneclor
Aroclor 1242 (t,c)	Duconol ( c )	Phenoclor (t, c) (Francuska)
Aroclor 1254 (t,c)	Dykanol (t,c) (SAD)	Phenochlor
Aroclor 1260 (t,c)	Dyknol	Phenochlor DP6
Aroclor 1262 (t,c)	Eec-18	Plastivar
Aroclor 1268 (t,c)	Electrophenzl T-60	Pzdraul (SAD)
Areclor (t)	Elemex (t,c)	Pzralene (t,c) (Francuska)
Abestol (t,c)	Eucarel	Pyranol (t,c) (SAD)
Arubern	Fenchlor (t,c) (Italija)	Pyrochlor
Asbestol (t,c)	Hexol (Rusija)	Pyroclor (t) (SAD)
ASK	Hivar (c)	Saf - T - Kuhl (t,c)
Askarel (t,c) (SAD)	Hydol (t,c)	Saft-Kuhl
Bakola	Hzdrol	Santotherm (Japan)
Bacola 131 (t,c)	Hyvol	Santotherm FR
Biclor ( c )	Inclor	Santotem
Chlorextol (t)	Inerteen (t,c)	Santovac
Clorinated Diphenyl	Kanechor (KC) (t,c) (Japan)	Santovac 1
Chlorinol (SAD)	Kancelor	Santovac 2
Chlorobiphenyl	Kancelor 400	Siclonyl ( c )
Clophen (t,c) (Nemačka)	Kancelor 500	Solvoll (t,c) (Rusija)
Clophen - A30	Keneclor	Sovol
Clophen - A50	Kennechlor	Sovotol (Rusija)
Clophen - A60	Lerromoll	Therminol (SAD)
Clophen Aporlorio	Magvar	Therminol FR

c - Kondenzator; t - Transformator

Najveći svetski proizvođač Monsanto Korporacija SAD proizvodio je smeše PCB pod nazivom Aroclor. U tabeli 5 prikazana je klasifikacija Aroclora prema vrsti primene koja se bazira na fizičkim svojstvima. Svaki Aroclor označen je sa 4 broja. Za većinu Aroclora prva dva broja ukazuju na 12 ugljenikovitih atoma u bifenilu, dok druga dva broja označavaju maseni procenat hloro u zavisnosti od

reakcionih uslova. Stepen hlorovanja varira od 21-66 %.

Tabela 5.  
Klasifikacija Aroclora prema vrsti primene

Upotreba PCB	Arochlor
Električni kondenzatori	1016, 1221, 1254
Električni transformatori	1242, 1254, 1260
Vakuum pumpe	1248, 1254
Gasne turbine	1221, 1242
Hidraulički fluidi	1232, 1242, 1248, 1254, 1260
Plastifikatori u sintetičkim smolama	1248, 1254, 1260, 1262, 1268
Adhezivi	1221, 1232, 1242, 1248, 1254
Plastifikatori u gumama	1221, 1232, 1242, 1248, 1254, 1268
Sistemi za prenos toplote	1242
Aditivi u smolama	1242, 1254, 1268
Agensi za otprašivanje	1254, 1260
Aditivi za pesticide, mastila, ulja za podmazivanje	1254
Bezugljenični papir za umnožavanje	1242

#### 4.3. Primena polihlorovanih bifenila

PCB su, od početka industrijske proizvodnje, našli veoma široku komercijalnu primenu. Kao što je već napomenuto, pre nego što je njegova upotreba i proizvodnja ograničena PCB se najčešće koristio u: adhezivima; transformatorima; velikim visoko - i nisko - naponskim kondenzatorima; električnim motorima sa tečnim hlađenjem; hidrauličnim sistemima; sistemima za prenos toplote; elektromagnetima; fluorescentnim svetlosnim punjenjima; kablovima punjenim tečnošću; zaptivačima; prekidačima; regulatorima napona; vakuum pumpama; mikrotalasnim pećnicama; elektronskoj opremi itd. Materije sa sadržajem PCB mogu biti razmatrane kroz njihovu primenu u zatvorenim, poluotvorenim i otvorenim sistemima. Na ovaj način je moguće objasniti kako PCB sadržani u ovim materijama mogu dospeti u životnu okolinu. Uglavnom, zatvoreni i poluotvoreni sistemi sadrže PCB ulja ili fluide. PCB u otvorenim sistemima poprimaju oblik osnovne materije u koju su dodati za odgovarajuću primenu, što znači da PCB u otvorenim sistemima mogu biti u različitim materijalima, od boja preko plastike do gume.

#### 4.3.1. Primena u zatvorenim sistemima

Pod zatvorenim sistemima se uglavnom podrazumeva primena PCB ulja kao dielektrika u transformatorima i kondenzatorima, odnosno ona primena gde se PCB nalazi kompletno unutar nekog uređaja. Pod normalnim uslovima, nije moguća ekspozicija životne sredine ili ljudi koji rade sa ovim uređajima. Međutim, moguća je emisija PCB tokom opravke, servisiranja ili konačnog odlaganja opreme, ili kao rezultat oštećenja opreme. Detaljniji primeri su dati u tabeli 6.

Tabela 6.  
Primena PCB u zatvorenim sistemima

Električni transformatori	Transformatori u postrojenjima za proizvodnju energije
Električni kondenzatori	Kondenzatori u distribucionim sistemima postrojenja za proizvodnju energije
	Pokretački kondenzatori za motore u hladnjacima, grejnim sistemima, ventilatorima, fenovima, motorima u bunarima sa vodom itd.
	Kondenzatori u elektronskoj opremi, uključujući televizore i mikrotalasne peći
Punjenja	Svetlosna punjenja
Električni motori	Minimalna upotreba u nekim motorima sa fluidnim hlađenjem
Električni magneti	Minimalna upotreba u nekim separacionim magnetima sa fluidnim hlađenjem

U principu, veoma često je teško odrediti prisustvo PCB u zapečaćenim uređajima, s obzirom na to da je otvaranje uređaja u cilju dobijanja ovih podataka, uglavnom nepravilno. U svakom slučaju, prvi korak u ovom utvrđivanju bi trebalo da bude pozivanje na uputstvo za održavanje uređaja, podatke iz proizvodnje, trgovačke asocijacije ili kompanije koja je proizvela opremu, da bi se pronašle informacije o dielektričnom fluidu koji je sadržan u ispitivanoj opremi. Uređaji bi trebalo da se ispituju često, a najmanje pri minimalnim indikacijama isticanja PCB. To su znaci da oprema treba da bude analitički testirana na PCB i servisirana ili zamenjena. Tabele 7 i 8 daju dodatne podatke za identifikaciju PCB, uključujući zatvorene sisteme u kojima se primenjuju njihove uobičajene lokacije kao i trgovačke nazive PCB smeša.

Tabela 7.

#### Primena PCB po lokacijama

Moguća lokacija*	Uobičajena primena PCB smeše
Električne jedinice	Transformatori Veliki kondenzatori Mali kondenzatori Prekidači Regulatori napona Električni kablovi punjeni tečnim fluidom Prekidači za električna kola Svetlosni balast
Industrijski objekti (uključujući postrojenja za proizvodnju aluminijuma, bakra, čvožđa i čelika, plastike, sintetičkih proizvoda kao i postrojenja za preradu nafte)	Transformatori Veliki kondenzatori Mali kondenzatori Fluidi za prenos toplote Oprema sa hidrauličnim fluidima Regulatori napona Prekidači za električna kola Svetlosno punjenje
Železnički sistemi	Transformatori Veliki kondenzatori Regulatori napona Prekidači za električna kola
Sistemi za podzemnu eksploataciju minerala	Oprema sa hidrauličnim fluidima Zemljani kalemovi
Stambene/ Poslovne zgrade	Mali kondenzatori (veš mašine, fenovima za kosu, neonskim cevima, mašinama za pranje sudova, jedinicama za napajanje strujom itd) Prekidači za električna kola Svetlosno punjenje
Istraživačke laboratorije	Vakuumpumpe Fluorescentno svetlosno punjenje Mali kondenzatori Prekidači za električna kola
Postrojenja za proizvodnju elektronske opreme	Vakuumpumpe Svetlosno punjenje Mali kondenzatori Prekidači za strujna kola
Postrojenja za tretman otpadnih voda	Vakuumpumpe Motori za bunare
Servisne stanice za automobile	Reciklirana ulja
Deponije (uključujući industrijske i komunalne deponije)	Odložena rastavljena oprema Građevinski otpad Iscurana ulja

\* Ispitivanje na PCB mora se redovno vršiti za svaki otvoreni sistem

## Internacionalna klasifikacija Askarela

Naziv izolacione tečnosti	Sastav smeše	Primena
Askarel tip T1 (Piralen T1)	60 % heksahlorbifenila, 40 % trihlorbenzena	Nezapaljiv transformator
Askarel tip T2 (Piralen T2)	45 % heksahlorbifenila,	Nezapaljiv transformator za niske temperature
Askarel tip T3 (Piralen T3)	55 % tri i tetrahlor benzena	Nezapaljivi transformator za niske temperature
Askarel tip T3 (Piralen T3)	100 % trihlorbifenila	Nezapaljiv transformator
Askarel tip C1 (Piralen 1500 i 1501)	30 % dihlorbifenila 70 % trihlorbifenila	Kondenzatori
Askarel tip C1 (Piralen 3010 i 3011)	100 % trihlorbifenila	Kondenzator

Tabela 9.

## Primena delimično zatvorenih sistema punjenih PCB uljima

Primena	Tipična lokacija
Fluidi za prenos toplote	Neorganska i organska hemijska industrija, industrija sintetičkih proizvoda, industrija plastike i industrija za preradu nafte
Hidraulični fluidi	Rudarska oprema, industrija za proizvodnju aluminijuma, bakra, čelika, i gvožđa
Vakuumpumpe	Elektronske opreme, laboratorije, instrumentalna i istraživačka primena, postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda
Prekidači	Električne jedinice
Regulatori napona	Električne jedinice
Električni provodnici punjeni tečnošću	Električne jedinice i generatori (vojni objekti)
Prekidači (punjeni tečnošću) za električna kola	Električne jedinice

## 4.3.2. Delimično zatvoreni sistemi

Delimično zatvoreni sistemi punjeni PCB smešama su oni u kojima PCB ulja nisu direktno izložena okolini, ali se to može povremeno desiti pri njihovoj tipičnoj upotrebi. Takvi tipovi upotrebe takođe mogu dovesti do emisije polihlorovanih bifenila u vazduh ili vodu. Primer delimično zatvorenih sistema su hidraulični sistemi i sistemi za prenos toplote, kao i vakuum pumpe. U tabeli 9 dati su neki primeri upotrebe delimično zatvorenih sistema kao i njihove lokacije.

## 4.3.3. Primena polihlorovanih bifenila ulja u otvorenim sistemima

Pod otvorenim sistemima se podrazumevaju oni u kojima su PCB ulja u direktnom kontaktu sa okolinom, što znači da mogu vrlo lako dospeti u životno okruženje, pa se tako na njih mora naročito obratiti pažnja. Plastifikatori predstavljaju najveću grupu otvorenih sistema sa sadržajem PCB-a i koriste se kod polivinilhlorida (PVC), neoprena i drugih hlorovanih guma. Pored ovih, otvorenim PCB sistemima se smatraju boje i premazi kao premazi za zaštitu od paljenja. U tabeli 10 dati su tipični primeri otvorenih sistema sa sadržajem PCB ulja.

Tabela 10.

## Primena PCB ulja u otvorenim sistemima

Ulja za podmazivanje	Potapajuća ulja za mikroprocesore Kočione obloge Motorna ulja Ulja za podmazivanje kompresora za prirodni gas
Livački voskovi	Modelarski voskovi za livenje uzoraka
Površinski premazi	Boje za površinsku zaštitu brodova Površinski tretman tekstila Bezugljenični papir za kopiranje Površinska zaštita na: nameštaju, zidovima, keramici
Za zaštitu od zaprašivanja	U vezivnim sredstvima U asfaltu Cevima za prirodni gas
U adhezivima	Adhezivi za specijalnu primenu Adhezivi za vodonepropusne obloge za zidove
Plastifikatori	Kao punioci u spojevima betona U polivinilhloridu U gumenim zapašcima: oko ventila i oko vrata i prozora
Mastila	U bojama Mastilo za štampanje
Druge upotrebe	Izolacioni materijali Pesticidi

## 5. ZAGAĐIVANJA ŽIVOTNE SREDINE POLIHLOOROVANIM BIFENILIMA

Sredinom 60-ih godina dvadesetog veka razvijeni naučni metodi omogućili su da se utvrdi da se PCB akumuliraju u prirodi, zahvaljujući njihovom izuzetno niskom stepenu biodegradibilnosti. Ova jedinjenja su otkrivena u svežoj vodi u skoro svim delovima sveta, ali takođe i telima mnogih životinja. Ispitivanjima, PCB su identifikovani kao potencijalni rizik za životnu sredinu i zdravlje životinja i ljudi. Njihovo prisustvo u lancu ishrane su izazvali priličnu uzbunu u to vreme, pa su proizvođači polihlorovanih bifenila u Severnoj Americi, Evropi i Aziji obustavili proizvodnju ovih hemikalija, smatra se sa svim konačno 1980. godine. (Technical Guidelines on wastes comprising or containing PCBs, PCTs i PBBs ; Basel Convention Series-SBC No.97-009).

PCB mogu zagađati životnu sredinu na dva načina poznata pod nazivima: hladno zagađenje, toplo zagađenje.

### 5.1. Hladno zagađenje

Pod hladnim zagađenjem podrazumeva se dejstvo PCB na okolinu u svom izvornom obliku. Ovakvo zagađenje nastaje nekontrolisanim ispuštanjem ili slučajnim curenjem iz uređaja u kojima se nalazi piralen (trgovački naziv za otpadno trafo ulje zagađeno značajnom koncentracijom PCB - često većom i od 500 ppm). Na ovaj način zagađuju se zemljišta, podzemni i nadzemni vodotokovi, kao i vazduh. Pri izlivanju piralena u zemlju, 97 % prosutog piralena se istaloži ili veže za zemlju, a oko 3 % ispari u vazduh. Migracija PCB kroz zemljište (po dubini) je gotovo zanemarljiva. Period poluraspada piralena je oko 10 godina. Preko zemljišta, piralen dospeva u biljke, pa u ostale žive organizme i tako vrši kontaminaciju. Ukoliko se piralen izlije u vodene tokove, 99 % jedinjenja PCB se istaloži (PCB su teži od vode) a 1 % se rastvori sa periodom poluraspada od 10 godina (kao u zemlji). Talog PCB remeti ravnotežno stanje vodenih ekosistema, zagađuje vodene tokove i preko vode dospeva ponovo u organizam živih bića. Ispareni piralen zagađuje i vazduh, ali se pod dejstvom sunčeve svetlosti proces razgradnje odigrava brže.

### 5.2. Toplo zagađenje

Toplo zagađenje nastaje kao posledica termičkog razlaganja PCB pod dejstvom spoljnih činilaca (paljenje, eksplozija i sl.).

Pri termičkom razlaganju piralena, nastaju izuzetno toksični produkti kao što su polihlorovani di-

benzofurani (PCDF) i polihlorovani dibenzodiodoksini (PCDD). Pri takvim uslovima razlaganja pri kojima su temperature sagorevanja niže od 1 200 °C, u otpadnim gasovima se može pojaviti i specifični izomer tetrahlorisanog dibenzodiodoksina (2, 3, 7, 8 TCDD) poznat pod imenom „DIOXIN”. Dioksin je izuzetno otrovna supstanca koja je izazvala već nekoliko katastrofalnih zagađenja u životnoj sredini (Misuri - SAD, Seveso - Italija). Pri sagorevanju piralena, nastaje 75 izomera PCDD i 135 izomera PCDF. Izomeri koji se smatraju da su najtoksičniji za žive organizme, imaju 4 atoma hlora postavljena simetrično u molekulu. Dokazano je da neki PCB imaju insekticidnu i fungicidnu aktivnost, ali oni nisu korišćeni kao pesticidi, već kao dodatak u tehničkim smešama nekih organskih pesticida, u cilju sprečavanja isparljivosti i produžavanja insekticidnog dejstva. U međuvremenu, proizvodnja PCB-a je, zbog saznanja o njihovoj toksičnosti, zabranjena u industrijski razvijenim zemljama. Tokom 1970. godine, u Sjedinjenim Američkim Državama je zakonski zabranjena upotreba PCB-a. Proizvodnja, distribucija i trgovina je zabranjena, međutim, upotreba PCB u postojećoj opremi je odobrena, iz ekonomskih razloga, do roka upotrebe. Primena PCB je obustavljena svuda u svetu. Upravo zbog dozvole upotrebe opreme sa sadržajem PCB do roka upotrebe, jedinjenja PCB se još uvek primenjuju u značajnom broju postrojenja. Zbog opasnosti koje sa sobom nose, u svetu su razvijene i još uvek se upotpunjuju metode upravljanja ovim otpadom, a sve u skladu sa zakonski strogo definisanim procedurama rukovanja. EPA je postavila orijentacione kriterijume za izbor metode za tretman otpada koji sadrži PCB.

Mora se, nažalost, naglasiti da je izloženost okoline PCB vrlo često posledica redistribucije PCB prethodno oslobođenih u prirodi. Redistribucioni kružni proces uključuje isparavanje iz vode u atmosferu, transport kroz vazduh i ispiranje (naročito visokohlorisanih bifenila, koji su vezani za čvrste čestice), i zatim ponovno isparavanje [2].

Svojstvo PCB-ja da se akumuliraju u masnom tkivu izloženih životinja i ljudi [5,7], kao i sama ekspozicija, smatraju se izvorima zdravstvenih problema. Izloženost visokim koncentracijama PCB može da izazove kožne lišajeve, bolove, zapaljenje, iritaciju očiju, pigmentacione promene kože i noktiju, poremećaje funkcije jetre i imunog sistema, iritaciju respiratornog trakta, glavobolje, depresije, gubitak pamćenja, vrtoglavice, nervozu, zamor i impotenciju [8]. Hronični efekti pri izloženosti niskim koncentracijama PCB uključuju oštećenje jetre, reproduktivnih organa, a može doći i do kancerogenih posledica.

## Klasifikacija otpadnih materija PCB prema poreklu

Vrsta otpada	Opis
Askareli	Smeša PCB - a i tri - i tetrahlorbenzena. Uobičajni askarel koji se nalazi u transformatorima sadrži 65 % PCB, ali može imati i 40 %. To je obično čista tečnost, gustine 1,5 kg/dm <sup>3</sup> .
Tečnost za dekontaminaciju	Tečnost koja se koristi za dekontaminaciju transformatora ili pri uklanjanju čvrstog PCB otpada. Sadržaj PCB - a je obično između 1 - 10 % u rastvaračima kao što su kerozin, trihloretilen, varsol, turpentine, ili trihlorbenzen. U smeši se mogu nalaziti i suspendovane čestice ali se obično ponaša kao tečnost.
Tečnost za dekontaminaciju	Tečnosti koje se koriste u kasnijim fazama ispiranja i dekontaminacije PCB opreme. Obično je koncentracija PCB u ovim otpadima manja od 1 %.
Kontaminirano mineralno ulje	Ulja obično sadrže manje od 1 % PCB-a. To su uglavnom „punjenja” transformatora. Zagađenost potiče od uobičajnih industrijskih praksi. Ulja su sama po sebi zapaljive tečnosti, sa gustinom nešto manjom od 1 kg/dm <sup>3</sup> . Ulja uglavnom ne sadrže veće koncentracije suspendovanih čestica.
Kontaminirana tečnost za retrofiling	Tečnosti za retrofiling su tečnosti koje se koriste za zamenu PCB - a u transformatorima. „Nova” tečnost uglavnom postaje zagađenja ostacima PCB - a, ukoliko se ne izvrši dekontaminacija.
PCB transformatori, hidraulična oprema, elektromagneti, razmenjivači toplote, difuzione pumpe	Elektro/mehanička oprema koja može biti „isušena”, dekontaminirana ili da sadrži PCB ili tečnost kontaminiranu PCB - om.
Veliki PCB kondenzatori	Kondenzatori koji sadrže više od 0,5 kg PCB - a. Veličina kondenzatora varira od veličine knjige do visokih trouglastih konzervi visine i do 1 m. Kondenzator se sastoji od papira i metalne folije koji su totalno potopljeni i impregnisani sa PCB - om.
Mali PCB kondenzatori	Kondenzatori koji sadrže manje od 0,5 kg PCB - a, obično su deo elektronske opreme i problem je njihovo izdvajanje opreme.
Otpaci koji potiču od rukovanja sa uređajima koji sadrže PCB	Industrijski otpad koji uključuje mali alat, plastiku, papir, sorbente i nešto „slobodne” tečnosti - obično rastvarač kontaminiran PCB - om. Koncentracija PCB - a je u širokom opsegu.
Otpadno ulje	Otpadna ulja, ulja za podmazivanje ili druga ulja kontaminirana PCB - om. Ovo je obično tečni otpad sa eventualnim sadržajem mulja.
Ostaci	Otpad koji može biti različitog porekla: pepeo iz insineratora (peć za spaljivanje), organski mulj koji nastaje pri dekontaminaciji ulja ili čvrste supstance nastale pri dekontaminaciji čvrstog otpada.
Zemlja i građevinski otpad	Čvrsti otpad, koji nastaje kao posledica prosipanja materije kontaminirane PCB-om. Ovi otpadi su uglavnom građevinski materijal (drvo, cement, farba, plastika, gips i metal).
Vodeni otpad	Iako je PCB malo rastvorljiv u vodi, može doći do kontaminacije, posle požara i posle prosipanja neke kontaminirane materije.

Veoma je korisno znati poreklo PCB materijala u različitim primenama. Mada trgovački nazivi PCB smeša nisu specifični za odgovarajuću primenu, sa-

držaj određene smeše može biti informacija od izuzetne koristi za definisanje postupka za dati PCB ili materijal sa sadržajem PCB.

## 6. ZAKLJUČAK

Fizičko – hemijske karakteristike polihlorovanih bifenila su odredile i omogućile njihovu široku komercijalnu primenu. PCB su našli primenu uglavnom kao dielektrični fluidi u transformatorima i kondenzatorima, u procesima prenosa toplote i hidrauličnim sistemima, kao rastvarači mastila, u bezugljeničnom papiru za kopiranje, zatim u formulaciji za proizvodnju lubrikacionih i motornih ulja, u proizvodnji plastifikatora, u proizvodnji boja, adheziva, zaptivnih materija, nezapaljivih materijala, vodootpornih materijala, proizvodnji plastike itd.

Ovako širok spektar moguće primene doveo je do njihove izuzetne široke upotrebe u industriji i drugim delatnostima. Nažalost, termička i hemijska stabilnost, kao i otpornost na metabolične procese čini ih nepoželjnim zagađivačima u životnoj sredini, jer dovodi do njihovog akumuliranja u prirodi. Ova jedinjenja su otkrivena u svežoj vodi u skoro svim delovima sveta, ali takođe i telima mnogih životinja. Ovim ispitivanjima PCB su identifikovani kao potencijalni rizik za životnu sredinu i zdravlje životinja i humane populacije. Njihovo prisustvo i detektovane koncentracije u lancu ishrane predstavljaju veliki rizik.

Usled opasnosti koje prete od akumulacije PCB u prirodi i degenerativnih procesa koje izazivaju kod živih organizama, veoma je korisno znati poreklo PCB materijala u različitim primenama, moguće načine dospeća u životnu sredinu, kao i negativne posledice koje mogu izazvati, a u cilju preduzimanja odgovarajućih mera zaštite.

## 7. LITERATURA

- [1] GUIDELINES FOR THE IDENTIFICATION OF PCBs AND MATERIALS CONTAINING PCBs, United Nations Environment Programme, Prepared by UNEP Chemicals, IOMC (International Organi-

zation Programme for the Solid Management of Chemicals, Geneva, Switzerland, August 1999.

- [2] H. Stevanović-Čarapina, A. Mihajlov, MOGUĆNOSTI ZA TRETMAN OPREME ZAGAĐENE POLIHLOBIFENILIMA (PCB), Simpozijum: Opasan otpad i životna sredina, Vrnjačka Banja, 133-145, (1996).
- [3] M. Laušević, S. Petrović, Z. Laušević, SELEKTIVNA ANALIZA TOKSIČNIH PCB, Opasan otpad i životna sredina, Vrnjačka Banja, 107-112, (1996).
- [4] L. Adanski - Spasić, Savetovanje KLASIFIKACIJA I ODREĐIVANJE POLIHLOROVANIH BIFENILA U UZORCIMA ŽIVOTNE SREDINE, PCB u okruženju, Palić, 12-19, (2001).
- [5] S. Dobson, G.J. van Esch: ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 140: POLYCHLORINATED BIPHENYLS AND TERPHENYLS, 2D ED.; World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (IPCS), Geneva, Switzerland, (1993).
- [6] I. M. Friedele, A. C. Frost, K. J. Herbert, K. J. Meeyer, J. C. Summers NEW CATALYST TECHNOLOGIES FOR THE DESTRUCTION OF HALOGENATED HYDROCARBONS AND VOLATILE ORGANICS, CATALYST TODAY, (str. 367-382) Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1993).
- [7] GUIDELINES FOR THE MANAGEMENT OF WASTES CONTAINING POLYCHLORINATED BIPHENYLS (PCBs), Council of Ontario Ministry of the Environment, Toronto (1989).
- [8] SWEDISH OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY BOARD REPORT, (1985).
- [9] H.M. Freeman: STANDARD HANDBOOK OF HAZARDOUS WASTE TREATMENT AND DISPOSAL, Mc.Graw Hill, New York (1989).
- [10] H. Stevanović-Čarapina, A. Jovović, M. Sovrlić, D. Antonović, V. Pavićević, Lj. Adanski, V. Cudić : PRIRUČNIK ZA POSTUPANJE SA MATERIJAMA ZAGAĐENIM PCB, Uprava za zaštitu životne sredine, Ministarstva za zaštitu zdravlja Republike Srbije, Beograd (2002).

Rad je primljen u uredništvo 08. 03. 2002. godine

# Primena protiveksploziona zaštićenih uređaja u rudničkim informaciono-upravljačkim sistemima

Stručni rad

UDK: 622.8; 622.817; 621.317.7; 621.391

---

## Rezime:

*U radu su prezentovane osnove protiveksploziona zaštite električnih uređaja, dat je kratak opis strukture rudničkog informaciono-upravljačkog sistema, navedeni su parametri radne sredine podzemne eksploatacije uglja, opisani su protiveksploziona zaštićeni uređaji rudničkog informaciono-upravljačkog sistema i prikazani su parametri protiveksploziona zaštite za sve električne uređaje.*

**Ključne reči: protiveksploziona zaštićeni uređaji, protiveksploziona zaštita električnih uređaja, monitoring, upravljanje**

---

## Abstract:

### USE OF EXPLOSION-PROOF PROTECTED ELECTRICAL DEVICES IN COAL MINES INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

*This paper presents the basis of explosion-proof protection of electrical devices, a short description of mines information and control systems, the parameters of the underground mines environment, a short description of mines information and control systems explosion-proof devices and the parameters of explosion - proof protection for all devices.*

**Key words: explosion-proof devices, explosion-proof protection, mines monitoring, mines control**

---

## 1. UVOD

Učestale nesreće u podzemnim rudnicima uglja uzrokovale su ljudske žrtve, povrede rudara i velike materijalne štete. U periodu od 1970. do 1998. godine u srpskim rudnicima uglja poginulo je 236 rudara. Uzroci nesreća bili su jamski požari (39 %), eksplozije metana i ugljene prašine (53 %), zarušavanja (3 %), izboj materijala (2 %) i prodor vode (3 %).

U cilju smanjenja ili eliminisanja opasnosti od navedenih pojava uvedeni su sistemi daljinske kontrole ventilacionih, gasnih i požarnih parametara i sistemi za efikasno namensko govorno sporazume-

vanje između rudara u jami i radnika u dispečerskim centrima u normalnim i hazardnim situacijama. Oba ova sistema integrisana su u jedan sistem i čine rudnički informaciono-upravljački sistem (RIUS). Većina podzemnih rudnika uglja kategorisani su kao metanske jame i svrstani su u zonu opasnosti I. Odavde i proističe osnovni tehnički zahtev da svi uređaji RIUS-a koji se montiraju u jami ili se povezuju sa uređajima u jami moraju biti izvedeni u nekoj vrsti protiveksploziona zaštite električnih uređaja shodno familiji standarda JUS N.S8.

Pojave u podzemnim rudnicima uglja su slučajne, pa je za detekciju ovih pojava neophodna kontinualna



detekcija. Ovo znači da oprema RIUS-a treba da radi i pri povećanim koncentracijama metana kada se obavezno isključuju iz rada električni uređaji u ugroženom delu rudnika. Pravilnik o tehničkim normativima za električne uređaje, postrojenja i instalacije u podzemnim rudnicima uglja predviđa da u uslovima povećane koncentracije metana mogu ostati u funkciji samo svojstveno bezbedni uređaji kategorije „ia”. Instalirani sistemi u srpskim rudnicima uglja sa jamskom eksploatacijom omogućuju kontinualno merenje koncentracije metana, ugljenmonoksida i kiseonika, brzine vazduha u protočnom i separatnom provetravanju, depresije glavnog i pomoćnog ventilatora i kratke spojeve na ventilacionim vratima i automatsko isključenje električne energije u ugroženom delu rudnika.

## 2. OSNOVI PROTIVEKSPLOZIONE ZAŠTITE ELEKTRIČNIH UREĐAJA

Uslov da neki električni uređaj može normalno da funkcioniše u eksplozivnoj atmosferi zapaljivih gasova, para ili prašine je da bude izgrađen u nekoj od vrsta protiveksplozionog izvođenja. Samo ovakvi uređaji mogu se koristiti u radnoj sredini u kojoj se pojavljuju eksplozivne smeše.

Protiveksploziona zaštita (PEZ) je veoma složena problematika, pa se zato i reguliše propisima ili standardima. Ovde egzistiraju dve vrste regulative:

- Konstrukcioni propisi ili standardi koji regulišu način izgradnje, ispitivanja i atestiranja protiveksploziona zaštićenih električnih uređaja (oznaka  $E_x$ ).
- Instalacioni propisi ili standardi koji regulišu način instalacije i korišćenja ovih uređaja.

Sam proces nastanka eksplozije zavisi od eksplozivne smeše i uzročnika paljenja. Na slici 1 data je logička šema nastanka eksplozije.

gde je:

- $I$  - logičko i
- $T_p$  - temperatura paljenja eksplozivne smeše

- $T$  - temperatura uzročnika paljenja
- $E_p$  - minimalno potrebna energija za paljenje eksplozivne smeše
- $E$  - energija uzročnika paljenja

Početak procesa eksplozije karakteriše tzv. indukciono vreme ( $t$ ) koje se definiše kao karakteristika uslova eksplozije. U literaturi [1] matematički se izražava formulom

$$t \approx \frac{k}{p^n} \cdot e^{\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

gde je:

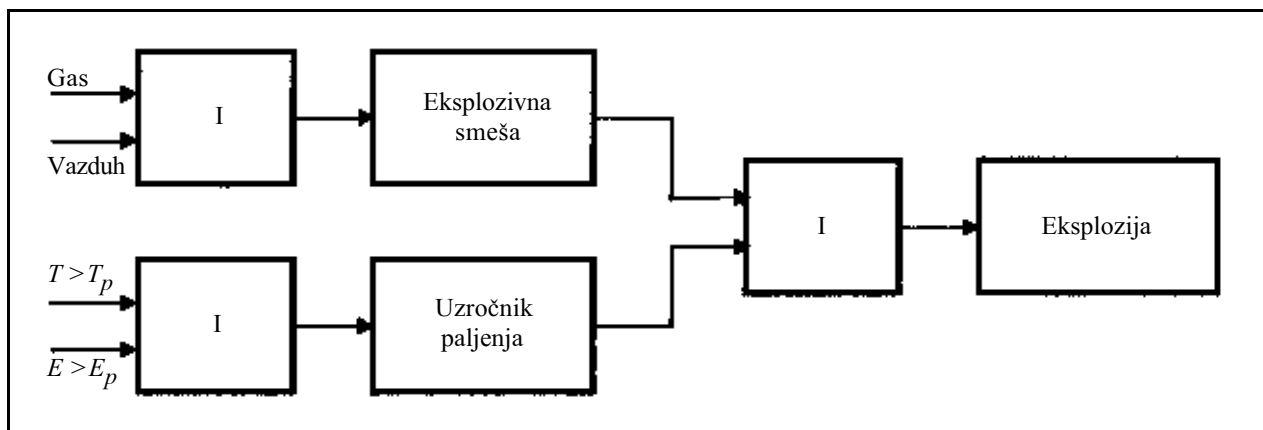
- $k$  - konstanta uzročnika paljenja
- $p$  - pritisak eksplozivne smeše
- $n \approx 1$  - zavisi od uslova sagorevanja
- $E$  - kritična energija paljenja gasa
- $R$  - gasna konstanta
- $T$  - temperatura eksplozivne smeše

Ova formula ima više kvalitativni značaj i pokazuje da pritisak smeše neposredno ubrzava proces paljenja, temperatura i gasna konstanta ubrzavaju, a veličina kritične energije usporava.

Svaki električni uređaj ili instalacija u podzemnom rudniku uglja je potencijalni uzročnik paljenja eksplozivne koncentracije metana ili uzviltane sitne ugljene prašine. Zato je i uslov da ovi uređaji budu izgrađeni u protiveksplozionom izvođenju i da se instaliraju i koriste prema važećim propisima.

U podzemnim rudnicima uglja koriste se najčešće električni uređaji, u vrstama protiveksplozione zaštite nepropaljivo kućište (oznaka Exd) i svojstvena bezbednost (oznaka Exi). Nepropaljivo kućište obezbeđuje da se eksplozija unutar kućišta ne može da prenese u prostoru izvan kućišta.

Svojstvena bezbednost bazira se na uslovu da je energija uzročnika paljenja pouzdano manja od minimalno potrebne energije za paljenje nezapaljivije eksplozivne smeše [1], [2], [3]. Znači da je energija strujnog kola tako mala, da otvorena električna varnica ili zagrevanje delova strujnog kola nisu u stanju da izazovu inicijalno paljenje eksplozivne smeše i ako je



Slika 1. Logička šema eksplozije

pritom temperatura električne varnice znatno veća od minimalne temperature paljenja eksplozivne smeše. Minimalno potrebna energija za paljenje eksplozivne koncentracije metana je 280 mJ. Kod ove vrste protiveksplozione zaštite razlikuju se kategorije [3]:

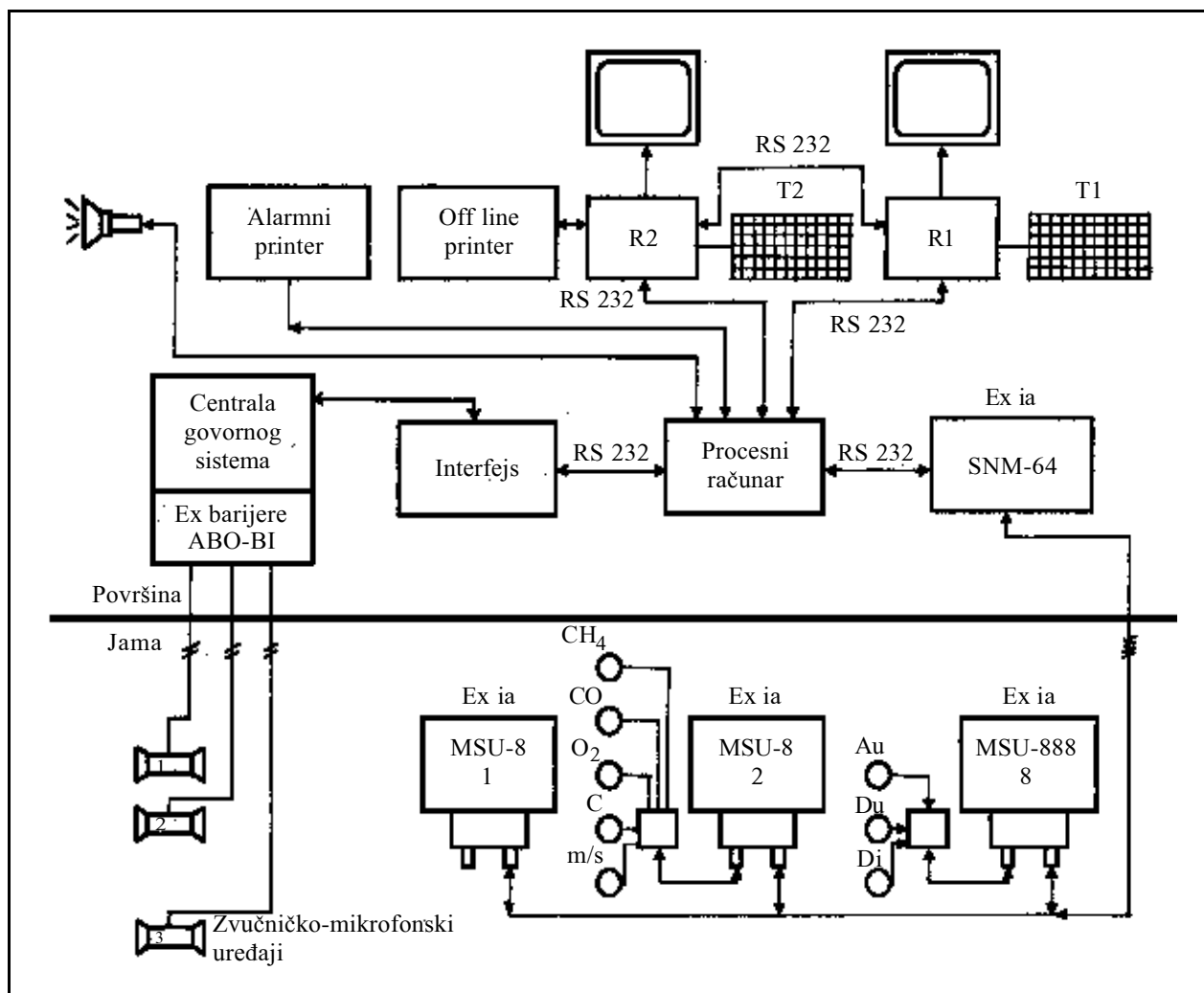
- ia, sa vrlo visokim stepenom sigurnosti vrste protiveksplozione zaštite i
- ib, sa stepenom sigurnosti koji je približan ostalim vrstama protiveksplozione zaštite.

### 3. PROTIVEKSPLOZIONA OPREMA INFORMACIONO-UPRAVLJAČKOG SISTEMA

Na slici 2 data je blok šema sistema Ei SM-64 i Ei SM-256, koji su instalirani u srpskim rudnicima uglja. Sistem čine merni uređaji u jami ( $CH_4$ ,  $CO$ ,  $O_2$ , m/s,  $T^\circ C$  i dr.), uređaji za prikupljanje i prenos signala i uređaji sistema za govorno sporazumevanje [4], [5].

Merni uređaji imaju sledeće tehničke karakteristike:

- kontinualno merenje,
- očitavanje rezultata merenja,
- analogni izlazni signal za povezivanje na sistem prenosa signala,
- zadavanje alarmnih pragova i izlazni signal za automatsko delovanje na energetski razvod pri prekoračenju alarmnog praga,
- napajanje iz jamske elektroenergetske mreže pomoću svojstveno bezbednih uređaja,
- automatsko prebacivanje na sopstveno baterijsko napajanje pri prekidu mrežnog napajanja i mogućnost testiranja baterije za rezervno napajanje,
- mogućnost testiranja alarmnog signala i
- svojstveno bezbedno izvođenje kategorije „ia”.



Slika 2. Blok šema sistema Ei SM-64 Ei SM-256

*Sistem za prenos signala zadovoljava sledeće osnovne tehničke zahteve:*

- prikupljanje podataka u jami vrši se pomoću daljinskih stanica (MSU-8), Ex ia I,
- prenos signala vrši se multi point načinom, pri čemu se preko jedne dvožične linije prenose podaci iz osam stanica MSU-8. Prenosna linija je samosigurna strujna petlja, Ex ia I,
- napajanje daljinskih stanica vrši se iz svojstveno bezbednog uređaja SNM-64, lociranog u dispečerskom centru. Napojno strujno kolo je svojstveno bezbedno Ex ia I. Napojni vod je dvožična linija preko koje se istovremeno napaja 8 daljinskih stanica MSU-8 na rastojanju do 10 km, uz otpor petlje do 600 Ω. Ovakvim rešenjem napajanja, prenosni sistem je učinjen nezavisnim od stanja jamske energetske mreže i
- raspoloživa snaga na početku napojne i prenosne linije je po max 1 000 mW.

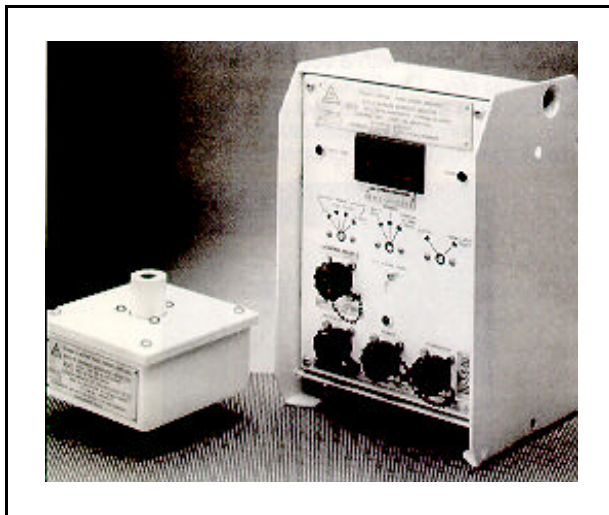
*Ex opremu u sistemu Ei SM-64 čine:*

- Za merenje koncentracije metana uređaj BM3, (slika 3). Uređaj se sastoji iz merne glave, koja kao senzor koristi katalitički element i kontrolne jedinice sa baterijom za rezervno napajanje. Merna glava se može udaljiti do 400 m od kontrolne jedinice. Merna glava je realizovana kao svojstveno bezbedna u nepropaljivom kućištu. Opseg merenja 0-3 % v/v  $CH_4$ . Ceo sistem BM3 atestiran je kao svojstveno bezbedni Ex ia I.



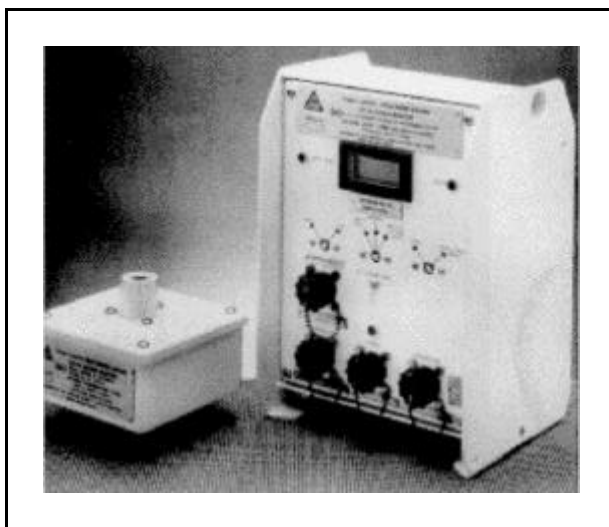
*Slika 3. Uređaj BM3*

- Uređaj BCO1-R (slika 4), za merenje koncentracije ugljenmonoksida. Merna glava kao senzor koristi elektrohemijisku ćeliju i realizovana je u zaštiti kao svojstvena bezbednost, kategorije ia. Drugi deo uređaja čini kontrolna jedinica sa baterijom za rezervno napajanje. Opsezi merenja su 0-50, 0-200 i 0-1 000 ppm. Ceo sistem BCO1-R atestiran je sa oznakom Ex ia I.



*Slika 4. Uređaj BCO1-R*

- Za merenje sadržaja kiseonika u jamskom vazduhu uređaj BO1-R (slika 5). Kao senzor u mernoj glavi koristi se elektrohemijiska ćelija. Merna glava realizovana je kao svojstveno bezbedna kategorija ia i omogućuje merenje u opsegu 0-32 % v/v  $O_2$ . Alarmni opseg 14-23 %. Kontrolna jedinica sadrži bateriju za rezervno napajanje i može se udaljiti od merne glave do 400 m. Ceo sistem BO1-R atestiran je kao svojstveno bezbedan Ex ia I.



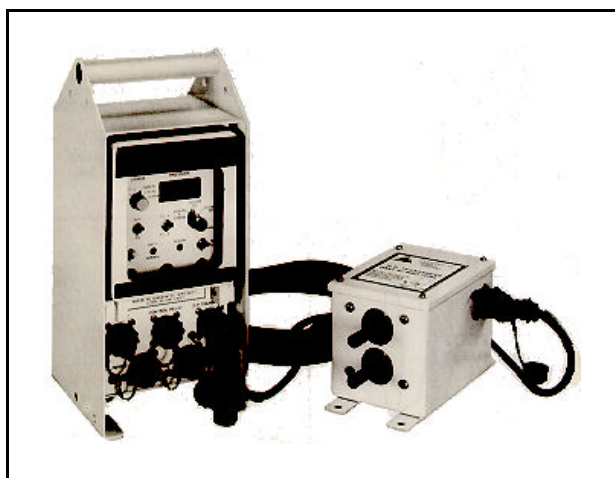
*Slika 5. Uređaj BO1-R*

- Uređaj BA5 za merenje brzine vazduha u protočnom provetravanju (slika 6). Merna glava koristi ultrazvučni način merenja (Vortex princip). Realizovana je u zaštiti svojstvena bezbednost kategorije ia. Merna glava se može locirati na rastojanju do 400 m od kontrolne jedinice. Kontrolna jedinica sadrži bateriju za rezervno napajanje i omogućuje izbor mernih opsega 0-2; 0-5; 0-10 i 0-20 m/s. Realizovana je u zaštiti svojstvena bezbednost kategorije ia. Ceo sistem BA5 atestiran je kao svojstveno bezbedan Ex ia I.



Slika 6. Uređaj BA5

- Za merenje depresije glavnog ventilatora, kratkih spojeva na ventilacionim vratima i brzine vazduha u cevima za separatno provetravanje uređaj, BP2 (slika 7). Merna glava koristi kapacitivnu membranu za merenje razlike pritiska. Omogućuje više opsega merenja (0-10; 0-100; 0-500; 0-1 000 Pa i 0-5 i 0-10 kPa). Može da se udalji od kontrolne jedinice do



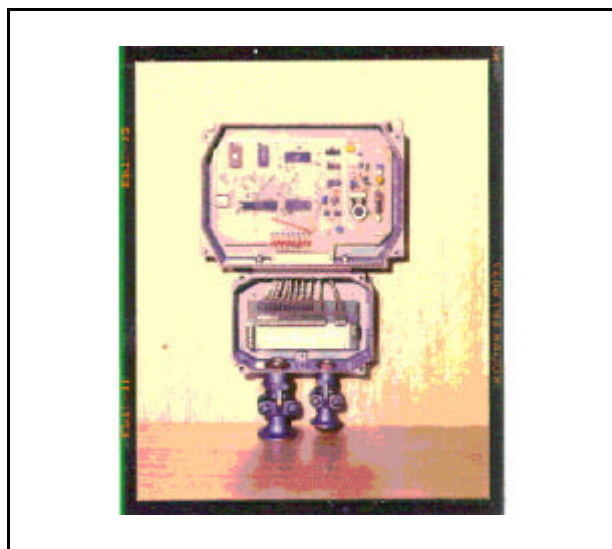
Slika 7. Uređaj BP2

- 400 m. Merna glava je atestirana i nosi oznaku zaštite Ex ia I. Kontrolna jedinica obezbeđuje napajanje merne glave i omogućuje izbor opsega merenja. Rezervno napajanje kontrolne jedinice vrši se iz svojstveno bezbednog uređaja BAT.1 (slika 8). Ceo sistem BP2 nosi oznaku zaštite Ex ia I.



Slika 8. Baterijski napajač BAT.1

- Daljinska stanica MSU-8 (slika 9) koja prihvata analogne signale sa 8 mernih uređaja i preko komunikacione linije šalje podatke u dispečerski centar. Ova jedinica napaja se daljinski iz dispečerskog centra. Realizovana je u vrsti zaštite Ex ia I. Pouzdano radi pri promeni napona napajanja od 25-36 Vdc. Komunikaciono kolo je galvanski odvojeno od prenosne linije. Potrošnja MSU-8 je max 80 mW.



Slika 9. Podstanica MSU-8

- Jedinica za razdvajanje i svojstveno bezbedno napajanje SNM-64 koja obezbeđuje daljinsko svojstveno bezbedno napajanje podstanicama u jami i svojstveno bezbedno galvanski odvojeno komunikaciono strujno kolo za razmenu podataka između centralne jedinice (procesnog računara) sistema Ei SM-64 i podstanica MSU-8. Ova jedinica montira se u neugroženom prostoru. Atestirana je kao pridodati uređaj [Ex ia I].
- Napajanje mernih uređaja vrši se u normalnim uslovima iz napajача 220V, 50 Hz / 18 V; 150 mA dc u zaštiti Exd ib I. Isključenje elektroenergetske mreže vrši se pomoću veznih članova u zaštiti Exd ib I.
- Ex opremu sistema za govorno sporazumevanje EiE-80 čine jamske jedinice realizovane kao kombinacija zvučnik-mikrofon u protiv-eksplozivnoj zaštiti Ex ib I i strujno naponski limiteri Ex ib, na početku svake dvožične linije koja povezuje opremu u centru sa jamskim jedinicama.

#### 4. PARAMETRI PROTIVEKSPLOZIVNE ZAŠTITE U RUDNIČKIM INFORMACIONO - UPRAVLJAČKIM SISTEMIMA

Protiveksplozivna zaštita RIUS-a ostvaruje se usaglašavanjem i nenarušavanjem  $E_x$  parametara PEZ-e pojedinačnih uređaja sa  $E_x$  parametrima prenosnih i spojnih vodova, da bi se dobila zahtevana PEZ u celom RIUS-u. Ovde je ciljno postavljeno da PEZ bude svojstvena bezbednost kategorije „ia” u celom sistemu.

Povezivanje opreme u jami međusobno i sa opremom u dispečerskom centru vrši se rudničkim kablovima TP34CV nx2x0,8 čije su karakteristike: otpor petlje = 73,2  $\Omega$ /km; Cparice = 150 nF/km; Lpetlje= 600-800  $\mu$ H/km.

Analizom pojedinačnih atesta, evidentirani su parametri vrste protiv-eksplozivne zaštite uređaja koji čine Ex opremu RIUS-a. Ovi parametri daju se u nastavku rada. Korišćenje oznake znače:  $U_p$  - napon praznog hoda;  $I_k$  - struja kratkog spoja;  $C_v$  - kapacitivnost priključenog uređaja ili voda;  $L_v$  - induktivnost priključenog uređaja ili voda [6].

Tabela 1.

Ex podaci za merne uređaje

Uređaj \ Parametar	BM3 (CH <sub>4</sub> )	BCO1-R (CO)	BO1-R (O <sub>2</sub> )	BA5 (m/s)	BP2 ( $\Delta$ p)
PEZ kontrolne jedinice	Ex ia I	Ex ia I	Ex ia I	Ex ia I	Ex ia I
Napon napajanja iz Ex ia izvora	15 - 23 Vdc	15 - 23 Vdc	15 - 23 Vdc	15 - 23 Vdc	15 - 23 Vdc
Granične veličine izvora napajanja (Ex ia baterija)	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \approx 0$	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \approx 0$	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \approx 0$	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 2,76$ A $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \approx 0$	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \approx 0$
Analogni izlaz 0,4 - 2 V dc (Ex ia I) granične veličine priključenja	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 31,5$ mA	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 100$ mA	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 100$ mA	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 100$ mA $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \leq 44$ mA	$U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 100$ mA $C_v \leq 55$ $\mu$ F $L_v \leq 44$ mA
L/R kablova za povezivanje sa mernom glavom i na analogni izlaz	max 48,37 $\mu$ H/ $\Omega$	max 48,37 $\mu$ H/ $\Omega$	max 48,37 $\mu$ H/ $\Omega$	max 48,37 $\mu$ H/ $\Omega$	max 48,37 $\mu$ H/ $\Omega$
Merna glava granični parametri kontrolne jedinice	Ex ia I $U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A	Ex ia I $U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A	Ex ia I $U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A	Ex ia I $U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A	Ex ia I $U_p \leq 10,6$ V $I_k \leq 3,5$ A
Prekidna moć kontakta izvršnog releja	$U \leq 10,6$ V $I \leq 189$ mA			$U \leq 10,6$ V $I \leq 210$ mA	$U \leq 20$ V $I \leq 1$ A

#### 4.1. Merni uređaji

U tabeli 1 dati su podaci za merne uređaje.

#### 4.2. Uređaji za napajanje i vezni članovi

*Uređaj za napajanje IN-7*

Vrsta zaštite - Exd ib I.

Ulazni napon - 220V, 50 Hz.

Izlazni napon i struja - 18 V, 150 mA dc.

Granični parametri -  $U_p \leq 25,2V$  dc;

$I_k \leq 255$  mA dc;  $C_v \leq 3,86$   $\mu$ F;  $L_v \leq 6,7$  mH.

*Vezni član KeRi 2m*

Vrste zaštite - Ex ia I.

Pobuda preko kontakta releja iz mernih uređaja.

Napajanje iz mreže 22 V, 50 Hz.

Granični parametri svojstveno bezbednog strujnog kola -  $U_p \leq 12,6$  V dc;  $I_k \leq 4,7$  mA dc;  $C_v \leq 27$   $\mu$ F;  $L_v$ - proizvoljno.

Prekidna moć kontakta na svojstveno bezbednoj strani - 220 V; 5 A; 500 VA ili 220 V; 1 A; 50 W.

#### 4.3. Uređaji sistema za prenos signala

*Daljinska stanica MSU-8*

Vrsta zaštite - Ex ib I.

Napon napajanja - 25-36 Vdc; 80 mW.

Daljinsko napajanje iz Ex ia uređaja.

Granične vrednosti kabla za napajanje -  $C_v \leq 1,1$   $\mu$ F;  $L_v \leq 23$  mH.

Granične vrednosti kabla za prenos signala -  $C_v \leq 11$   $\mu$ F;  $L_v \leq 15$  mH.

Analogni ulazi - iz Ex ia mernih uređaja.

*Jedinica za razdvajanje i svojstveno bezbedno napajanje SNM-64:*

Vrsta zaštite - [Ex ia I].

Napon napajanja - 20-28 V dc; 5 W.

Granični parametri ia strujnog kola za daljinsko napajanje podstanica u jami -  $U_p \leq 15,7$  V dc;  $I_k \leq 138$  mA dc;  $C_v \leq 1,35$   $\mu$ F;  $L_v \leq 23$  mH.

Granični parametri ia strujnog kola za prenos signala -  $U_p \leq 15,7$  V dc;  $I_k \leq 170$  mA dc;  $C_v \leq 11$   $\mu$ F;  $L_v \leq 15$  mH.

#### 4.4. Uređaji govornog sistema

*Naponsko-strujni limiter ABO-BI:*

Vrsta zaštite [Ex ib I].

Granični parametri ib strujnog kola -  $U_p \leq 45,2$  V dc;  $I_k \leq 80$  mA dc;  $C_v \leq 0,9$   $\mu$ F;  $L_v \leq 40$  mH; ukupni otpor 468  $\Omega$ ;  $u_{max}$  nesvojstveno bezbedne strane 250  $V_{eff}$ .

*Zvučničko-mikrofonski uređaj ASA 80/1:*

Vrsta zaštite Ex ib I.

Granični parametri unutrašnjeg izvora napajanja -  $U_p \leq 14$  V;  $I_k \leq 1$  A.

Granični parametri kola zvučnika -  $U_p \leq 4,6$  V;  $I_k \leq 295$  mA.

Granični parametri priključnog kabla - u skladu sa graničnim  $L_v$ ,  $C_v$  vrednostima limitera ABO-BI.

#### 5. ZAKLJUČAK

*Kratko opisana struktura RIUS-a Ei SM-64 pokazuje da ovaj sistem čine mnogi Ex uređaji koji su s jedne strane međusobno povezani i čine jednu složenu Ex mrežu uređaja i kablova, a sa druge strane postoji akcija - dejstvo jednih uređaja izazvano dejstvom drugih uređaja. Sve ovo se događa u sredini koja je stalno potencijalno ugrožena eksplozivnim koncentracijama metana, požarnim i toksičnim opasnostima. Zato je ovde problematika Ex zaštite veoma složena jer se od sistema očekuje da mora da zadovolji projektima predviđene tehničke zahteve i uslove, a mora da bude realizovan kao svojstveno bezbedan uređaj kategorije ia. Projektanti moraju da kod proračuna uzmu u obzir različite tehničke karakteristike i granične Ex parametre pojedinih uređaja, tako da njihov posao postaje veoma složen i odgovoran.*

#### 6. LITERATURA

- [1] Marinović N., PROTIVEKSPLOZIJSKA ZAŠTITA ELEKTRIČNIH UREĐAJA, Školska knjiga, Zagreb, 1986.
- [2] Marjanović D., Anđelković D., DOSADAŠNJA ISKUSTVA PRI PROJEKTOVANJU I KONSTRUKCIJI SAMOSIGURNIH ELEKTRIČNIH UREĐAJA, Jugoslovensko savetovanje o protiveksplozivnoj zaštiti električnih uređaja i postrojenja, Zbornik radova, Beograd, 1995.
- [3] Marjanović D., Kocić D., ASPEKT SAMOSIGURNOSTI PRI PROJEKTOVANJU SISTEMA ZA DALJINSKO MERENJE I KONTROLU, II Konferencija SAUM, Zbornik radova, Beograd 1988.
- [4] Marjanović D., MONITORING SYSTEM EI SM-64, UNDP REGIONAL PROJECT RER 87/005: Computerized Coal Mining Systems, Mini Workshop, Niš, 1989.
- [5] Marjanović D., PROTIVEKSPLOZIONA ZAŠTITA U RUDNIČKIM INFORMACIONO-UPRAVLJAČKIM SISTEMIMA, II Međunarodna Ex tribina, zbornik radova, Novi Sad, 2000.
- [6] TIPSKI I POJEDINAČNI ATESTI ZA EX UREĐAJE.

---

Božidar Rajnović

# Razvoj modela osnovnih progresivnih resursa u izgradnji složenih proizvodnih sistema

– drugi deo –

Originalni naučni rad  
UDK: 620.4

---

Rezime:

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja vezanih za primenu metoda određivanja potrebnih osnovnih resursa u projekt-menadžmentu složenih sistema mašinske montaže. U radu je izvršena postavka opšte diferencijalne jednačine osnovnih resursa, nađena su rešenja diferencijalne jednačine i konstruisana jednačina obvojnice istih rešenja.

Na osnovu tih teorijskih postavki, izvršena su ispitivanja i provere osnovnih resursa mašinske montaže složenih proizvodnih sistema na realnom gradilištu Termoelektrane-Toplane Zrenjanin. Kao rezultat tog ispitivanja, proizišle su konkretne krive osnovnih resursa mašinske montaže složenog proizvodnog sistema Termoelektrane-Toplane Zrenjanin.

**Ključne reči: osnovni resursi, mašinska montaža, složeni proizvodni sistemi**

---

Abstract:

MODEL OF DEVELOPMENT OF PROGRESSIVE RESOURCE  
IN BUILDING OF COMPOUND PRODUCTION SYSTEMS

– part two –

This paper represents part of research connected with the method development for determining the basic resources in project management of compound systems machine mounting. The general differential equation of basic resources was given in the paper. The solutions of differential equations and the equation of the envelope were found.

Investigation and examinations of basic resources in machine mounting of compound production systems were done on the basis of those theoretical assumptions. It was done on the actual building site of Termoelektrana - Toplana Zrenjanin. Actual curves come out as a result of those investigations of basic resources in machine mounting of compound production systems of TE-TO Zrenjanin.

**Key words: basic resources, machine mounting, compound production systems**

---

## 1. UVOD

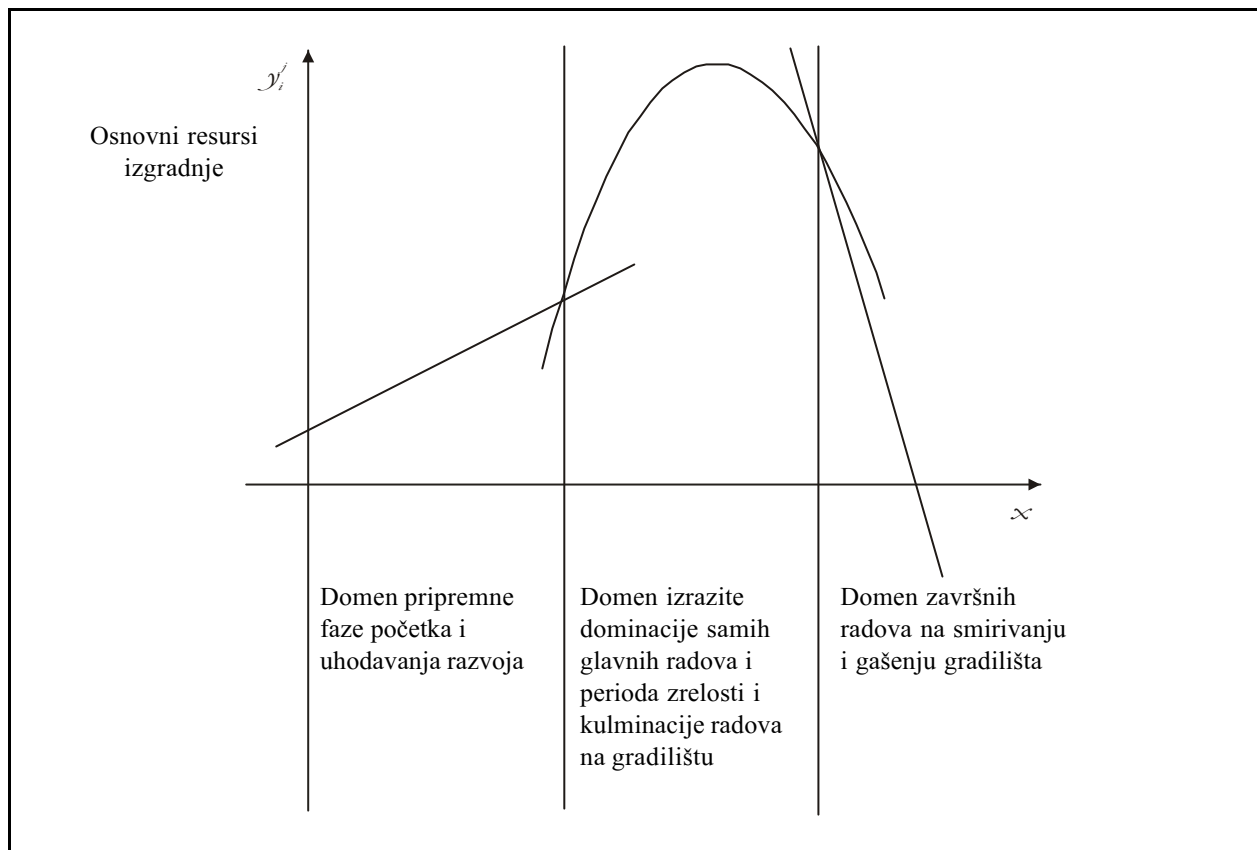
Još u toku početnih istraživanja, uočen je najdominantniji karakter promene osnovnih progresivnih

gradilišnih resursa u izgradnji složenih proizvodnih sistema. U daljem tekstu će, zbog obimnosti ovog segmenta, izučavanja osnovnih resursa koncizno izložiti samo osnovne podloge ovog domena.

---

Dr Božidar Rajnović, dipl.maš.ing.

– „EPS”, JP „Panonske elektrane”, Novi Sad, TE-TO Zrenjanin, 23000 Zrenjanin, Pančevački put b.b.



Slika 1. Načelni karakter promene osnovnih resursa izgradnje po faznim domenima

Za dalja istraživanja, potrebno je odmah naznačiti da je načelni karakter promene osnovnih resursa izgradnje po faznim domenima isti kao i na slici 1.

Signatura je ostala ista kao i u članku „Razvoj modela osnovnih progresivnih resursa u izgradnji složenih proizvodnih sistema”, objavljenom u časopisu „Elektroprivreda 2002.1.”:

$y_i'$  - oznaka resursa

$i$  - označava vrstu resursa

$j$  - označava tehnološku celinu u okviru koje se resurs posmatra

$g$  - označava gransku opredeljenost koeficijenta

$q$  - označava uslovljenost koeficijenta od projektovanog proizvodnog kapaciteta postrojenja

$K$  - označava pripadnost domenu kvadratnog karaktera promene

$t$  - ovaj indeks označava transformabilni karakter posmatranog koeficijenta i on se gubi kad koeficijent dobije konačnu formu koja se nadalje koristi

$T$  - označava vrednost u temenu parabole

$1_x$  - indeks 1 označava oblik koeficijenta na početku transformacije

Osnovni resursi, kao realno i materijalno prisutne veličine na gradilištu, mogu imati samo pozitivan predznak:

$$y_i' \geq 0$$

S obzirom na to da se svi planovi izgradnje složenih proizvodnih sistema i resursa posmatraju i realizuju u vremenu, to će invarijanta i ovog sistema biti vreme i nositi oznaku  $x$ .

## 2. RADNA HIPOTEZA U DOMENU IZRAZITE DOMINACIJE GLAVNIH RADOVA

Na osnovu dosadašnjih istraživanja drugih autora o karakteru promene osnovnih resursa izgradnje u periodu dominacije glavnih radova, moguće je zaključiti sledeće:

- krive su nelinearnog karaktera
- konkavne na gore  $f''(x) < 0$
- i gotovo da poseduju osobinu osne simetrije

Imajući u vidu sve osobine karakternih odlika ove zone (slika 1) i posmatrajući krive funkcija sa stanovišta funkcionalne analize, jasno je da bi najjednostavnija kriva, koja bi zadovoljavala tražene kriterijume bila kvadratna kriva oblika:

$${}_t^1 f_i^j(x) = {}_t^1 a_i^j(x)^2 + {}_t^1 b_i^j(x) + {}_t^1 c_i^j \quad (1)$$



Kvadratna funkcija data jednačinom (1) usvaja se za radnu hipotezu ovog domena.

Usvojenu kvadratnu funkciju, kao radnu hipotezu, potrebno je donekle transformisati, kako bi se olakšao rad na rešavanju diferencijalne jednačine. U prvom koraku slobodan član uz kvadratni član  ${}^1a_i^j$  transformiše se u:

$${}^1a_i^j = \frac{{}^1a_i^j}{2}$$

Sada jednačina (1) glasi:

$$\frac{{}^1f_i^j(x)}{{}^1a_i^j} = \frac{{}^1a_i^j}{2}(x)^2 + \frac{{}^1b_i^j(x)}{{}^1a_i^j}x + \frac{{}^1c_i^j}{{}^1a_i^j}$$

Konačan oblik transformisane kvadratne krive (1) je:

$$y_i^j = \frac{x^2}{2} \frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^1a_i^j} + \frac{{}^{g,q}c_i^j}{{}^1a_i^j} \quad (2)$$

pri čemu je:  $\frac{{}^1b_i^j}{{}^1a_i^j}$ ,  $\frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^1a_i^j}$ ,  $\frac{{}^1c_i^j}{{}^1a_i^j}$ ,  $\frac{{}^{g,q}c_i^j}{{}^1a_i^j}$ ,  $y_i^j$ ,  $\frac{{}^1f_i^j(x)}{{}^1a_i^j}$  - su karakterni parametri određenog resursa

### 3. POSTAVLJANJE I REŠAVANJE OSNOVNE DIFERENCIJALNE JEDNAČINE DINAMIKE PROMENA OSNOVNIH RESURSA U FAZI IZRAZITE DOMINACIJE GLAVNIH RADOVA IZGRADNJE SLOŽENIH PROIZVODNIH SISTEMA

Na osnovu usvojene radne hipoteze, kvadratna funkcija kao prezentantna kriva promene osnovnih resursa izgradnje složenih proizvodnih sistema, u domenu izrazite dominacije glavnih radova ima oblik:

$$y_i^j = \frac{x^2}{2} \frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^1a_i^j} + \frac{{}^{g,q}c_i^j}{{}^1a_i^j} \quad (2)$$

Dinamika osnovnih resursa izgradnje u jedinici vremena se matematičkim formalizmom može izraziti kao:

$$\frac{d_{{}^K}y_i^j}{dx} = {}^K y_i^j \quad (3)$$

Analogno tome promena dinamike osnovnih resursa izgradnje u vremenu se matematičkim formalizmom može izraziti:

$$\frac{d^2_{{}^K}y_i^j}{dx^2} = {}^K y_i^j \quad (4)$$

Na osnovu postavljene radne hipoteze o kvadratnoj karakteristici promene osnovnog resursa u

fazi izrazite dominacije glavnih radova, drugi izvod funkcije ovog karakternog domena je konstanta. Koristeći ovu osobenost drugog izvoda na osnovu radne hipoteze, dinamiku promene resursa moguće je posmatrati kroz prizmu jedinstva suprotnosti.

Ovakav prilaz problemu omogućuje logističku postavku drugog izvoda u matematičkom smislu, kao konstantan proizvod dva kontradiktorna člana promenljiva u vremenu. Prilikom postavljanja tražene diferencijalne jednačine, na osnovu ovakve logističke postavke, koristeće se opšte poznata relacija da trend promene neke posmatrane veličine izražene funkcionalno, matematički verodostojno prati prvi izvod posmatrane funkcije.

Dakle, prvi izvod hipotetičke promene posmatranog resursa  $(y_i^j)'$  usmeriće njegovu realnu dinamiku  $({}_K y_i^j)'$  kao „koeficijent pravca” i formirati prvi član oblika  $({}_K y_i^j)'$ . Prvi član ima načelno rastući karakter. S druge strane, kontradiktorno usmerenje prvom članu vrši drugi član oblika:

$$1 - \frac{{}^K y_i^j}{y_i^j}$$

On predstavlja nedostignuti stepen razvijenosti realne promene dinamike resursa u vremenu, čija je krajnja granica razvijenosti diktirana prvim izvodom hipotetičke funkcije  $(y_i^j)'$ . Drugi član ima opadajući karakter.

Ako se ovi logistički odnosi kontradiktornih članova izraze matematički, dolazi se do sledeće diferencijalne jednačine (5). Ona predstavlja, diferencijalnu jednačinu realne promene dinamike osnovnih resursa izgradnje složenih proizvodnih sistema u domenu izrazite dominacije glavnih radova. Pritom  $y_i^j$  predstavlja hipotetičku promenu resursa u vremenu (jednačina (2)).  ${}_K y_i^j$  pak, predstavlja realnu promenu resursa u vremenu, čiji konačan oblik tek treba da proiziđe iz rešenja diferencijalne jednačine (5). Rešenje diferencijalne jednačine, na osnovu hipoteze, treba da je kvadratnog oblika.

$${}_K y_i^j = y_i^j \left( 1 - \frac{{}^K y_i^j}{y_i^j} \right) \quad (5)$$

Negativan predznak označava to da se funkcija osnovnih resursa posmatra sa stanovišta investitora i označava resursno dugovanje investitora izvođaču. Ovo se objašnjava time što se realizacija vrši posredstvom aktuelne dokumentacije (izvođačkih projekata, građevinskih knjiga, mesečnih privremenih situacija itd.) i to za izvršene radove, dakle unazad.

Uspostavljanje veze između jednačine (2), kao radne hipoteze, i postavljanje diferencijalne jednačine (5) izvršiće se pomoću  $(y_i^j)'$

$$y_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad (6)$$

Zamenom vrednosti ( $y_i^j$ )' dobija se:

$${}_K y_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}_K y_i^j \quad 1 \quad \frac{{}_K y_i^j}{{}^{g,q}b_i^j} \quad x \quad (7)$$

Drugi izvod bilo koje kvadratne funkcije je konstanta. Dakle:

$$\text{Što, uvrštavanjem u jednačinu (7), daje:}$$

$$a_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}_K y_i^j \quad {}_K y_i^j \quad (8)$$

Razumljivo da radna hipoteza (2) na osnovu svoje suštine, predstavlja jedno od mogućih realnih rešenja diferencijalne jednačine, te se stoga može napisati i u obliku (9):

$${}_K y_i^j \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j \quad (9)$$

S obzirom na to da se diferencijalna jednačina (8) neće narušiti ako se levoj i desnoj strani oduzme ista vrednost i s obzirom na to da je cilj rešavanja ove diferencijalne jednačine pronaći karakter promene osnovnih resursa, to će se od jednačine (8) oduzeti jednačina (9). Jednačina (9) oduzima se od jednačine (8), da bi se dobio negativan predznak ispred  ${}_K y_i^j$  iz prethodno navedenog razloga, dugovanja investitora izvođaču.

$$a_i^j \quad {}_K y_i^j \quad {}_K y_i^j \quad {}_K y_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j$$

$${}_K y_i^j \quad {}_K y_i^j \quad {}_K y_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j \quad a_i^j \quad (10)$$

Da bi se omogućilo da rešenja diferencijalne jednačine (10) imaju što univerzalniji karakter i obuhvate opšte resurse izgradnje, potrebno je uvesti i dodatne koeficijente, koji će širinu zahvata spektra zavisno promenljive  ${}_K y_i^j$ , tj. osnovnih resursa mašinske montaže uspešno pokriti.

Prvi korak u nalaženju rešenja je uvođenje smene:

$${}_K y_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad (11)$$

${}^{g,q}a_i^j$  - je karakterni parametar koji se uvodi u vidu konstante, a opredeljen je (g) - granskom pripadnošću (građevinska, mašinska, elektroenergetska), (q) - kapacitetom složenog proizvodnog sistema u domenu (K) kvadratne karakteristike promene resursa u zavisnosti od (j) tehnološke celine unutar koje se posmatra određeni (i) resurs izgradnje.

Zamenom jednačine (11) u jednačinu (10) dobija se:

$${}_K y_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad ({}^{g,q}b_i^j \quad x) \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j \quad a_i^j$$

$${}_K y_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad ({}^{g,q}b_i^j \quad x) \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j \quad a_i^j \quad (12)$$

Kada se diferencijalna jednačina (12) diferencira po  $x$  dobija se:

$${}_K y_i^j \quad 2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad p_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad ({}^{g,q}b_i^j \quad x) \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad (13)$$

Ponovnim uvođenjem smene tj. jednačine (11) u jednačinu (13) i njenim sređivanjem, ona prelazi u oblik:

$$2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad 2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad p_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad x \quad \frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j$$

$$2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad 1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad 1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad 1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j$$

$$2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad 1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad 1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad 1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad 0$$

$$1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad 2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad 0 \quad (14)$$

Izjednačavanjem zagrada sa nulom iz druge zagrade jednačine (14) dobija se:

$$2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad 0$$

$$2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j$$

$$p_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad (15)$$

Zamenom jednačine (15) u jednačinu (12) dobija se:

$${}_K y_i^j \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j$$

$$\frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j \quad a_i^j$$

$${}_K y_i^j \quad \frac{x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j}{4} \quad \frac{x \quad {}^{g,q}b_i^j \quad {}^{g,q}b_i^j}{2} \quad \frac{x^2}{2} \quad {}^{g,q}b_i^j \quad x \quad {}^{g,q}c_i^j \quad a_i^j$$

$${}_K y_i^j \quad \frac{1}{4} \quad x^2 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad x \quad \frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad {}^{g,q}c_i^j \quad a_i^j \quad (16)$$

Jednačina (16) predstavlja prvo rešenje diferencijalne jednačine (5).

Izjednačavanjem prve zagrade sa nulom jednačine (14) dobija se diferencijalna jednačina:

$$1 \quad \frac{1}{{}^{g,q}b_i^j} \quad p_i^j \quad 0$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} p_i^j = 1 \\
 & p_i^j = g_{K i}^{g, q j} \\
 & p_i^j = g_{K i}^{g, q j} x + g_{K i}^{g, q j} C_i^j + g_{K i}^{g, q j} \quad (17)
 \end{aligned}$$

${}^{g, q} C_i^j$  - predstavlja veličinu preuzetog resursa iz prethodne linearne forme razvoja resursa (slika 1) na nivou tehnološke celine, ili, matematički gledano, vrednost zavisno promenljive  ${}_K Y_i^j$  u trenutku  $x = t = 0$  kvadratne promene.

${}^{g, q} C_i^j - {}^{g, q} b_i^j$  - predstavlja parcijalnu veličinu resursa kvadratne forme, koji je potrebno angažovati u pod-sistemu posmatranog opšteg resursa, takođe u trenutku  $x = t = 0$ . Parcijalna veličina angažovanog resursa se daje u formi razlike, jer je time uslovljeno da se angažovani resurs posmatra unutar zatvorenog kruga podsistema, tj. tačno određenog broja podsistema koji čine celinu.

Primer iz prakse bi mogao biti npr. resurs radne snage u mašinskoj sali prilikom montaže TE - TO. On se može posmatrati kao resurs radne snage angažovane na montaži:

- rotacionih uređaja (turbina, pumpi),
- rezervoara i
- cevovoda.

Svaki od ovih posmatranih sistema mašinske sale, mora imati avansno angažovanje resursa radne snage na pripremi predajno - prijemnih mesta u trenutku  $x = t = 0$ .

Sva ova tri parcijalno angažovana resursa radne snage  ${}^{g, q} C_i^j - {}^{g, q} b_i^j$  čine ukupno angažovanje resursa radne snage tehnološke celine mašinske sale  ${}^{g, q} C_i^j$  u trenutku  $x = t = 0$ .

${}^{g, q} b_i^j$  - predstavlja ostatak angažovanog resursa kvadratne forme na nivou kompletne tehnološke celine. Npr. ako se posmatra parcijalno angažovani resurs radne snage na montaži rotacionih uređaja u mašinskoj sali TE-TO ( ${}^{g, q} C_i^j - {}^{g, q} b_i^j$ ), onda  ${}^{g, q} b_i^j$  predstavlja zbir angažovanih resursa radne snage na montaži rezervoara i cevovoda.

Zamenom jednačine (17) u jednačinu (12), dobija se:

$$\begin{aligned}
 {}_K Y_i^j &= \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \left( g_{K i}^{g, q j} x + g_{K i}^{g, q j} C_i^j + g_{K i}^{g, q j} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \left( x + C_i^j + \frac{x^2}{2} \right) x + g_{K i}^{g, q j} C_i^j + g_{K i}^{g, q j} a_i^j
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}_K Y_i^j &= \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x^2 + 2 \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} x + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x^2 \\
 &= \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x^2 \\
 &= \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x + \frac{x^2}{2} x + \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} a_i^j \\
 {}_K Y_i^j &= x^2 + 2 \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} x \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} + \frac{1}{(g_{K i}^{g, q j})^2} \\
 &= \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x^2 + x \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \\
 x^2 &= \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} x \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} + \frac{x^2}{2} x + \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} a_i^j \\
 {}_K Y_i^j &= x^2 + x^2 \frac{x^2}{2} + 2 \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x \\
 &= 1 \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} 1 x \\
 &= \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} a_i^j \\
 {}_K Y_i^j &= \frac{x^2}{2} + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \\
 &= \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} a_i^j \\
 {}_K Y_i^j &= \frac{x^2}{2} + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \\
 &= \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} a_i^j \quad (18)
 \end{aligned}$$

Poslednja jednačina predstavlja novo rešenje diferencijalne jednačine osnovnih resursa izgradnje složenih sistema u vremenu. Jednačini (18) dodaje se i oduzima  ${}^{g, q} b_i^j$ , u cilju formiranja integracione konstante ( ${}^{g, q} C_i^j - {}^{g, q} b_i^j$ ) i dobija jednačina (19).

$$\begin{aligned}
 {}_K Y_i^j &= \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} x + \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \\
 &= \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{1}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j} C_i^j}{g_{K i}^{g, q j}} \frac{g_{K i}^{g, q j}}{g_{K i}^{g, q j}} a_i^j
 \end{aligned}$$

$${}_{K i}^{g,q,j} C_i^j - {}_{K i}^{g,q,j} b_i^j a_i^j \quad (19)$$

Posmatranjem analitičkog oblika krive, koja predstavlja rešenje diferencijalne jednačine (19), uočava se mogućnost konstrukcije obvojnice. S obzirom na značaj prognoziranja posredstvom krivih obvojnica, izvršice se njihova konstrukcija.

Ako se vrednost parametra datog kao razlika  ${}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j$  sukcesivno menja tj.

$$\begin{aligned} & {}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j ; {}_{K i}^{g,q} C_1^j - {}_{K i}^{g,q} b_1^j ; {}_{K i}^{g,q} C_2^j - {}_{K i}^{g,q} b_2^j ; \dots \\ & \dots ; {}_{K i}^{g,q} C_n^j - {}_{K i}^{g,q} b_n^j ; {}_{K i}^{g,q} C_1^j - {}_{K i}^{g,q} b_1^j ; \\ & {}_{K i}^{g,q} C_2^j - {}_{K i}^{g,q} b_2^j \dots ; {}_{K i}^{g,q} C_n^j - {}_{K i}^{g,q} b_n^j \dots ; {}_{K i}^{g,q} C_n^j - {}_{K i}^{g,q} b_n^j \end{aligned}$$

rešenja diferencijalne jednačine  $f[x; y_i^j; ({}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j)] = 0$  će kliziti duž obvojnice. Iz sistema jednačina treba naći krive koje predstavljaju rešenje

$$\frac{df}{dx} x; y_i^j; \left( \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \right) = 0$$

da bi se eliminisao parametar  $({}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j)$  i na taj način dobila jednačina obvojnice  $R(x; y_i^j) = 0$ . U konkretnom slučaju, to izgleda ovako:

$$\begin{aligned} & y_i^j \frac{1}{2} x^2 - \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{df}{dx} x; y_i^j; \left( \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \right) = \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x \\ & 2 \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} = 0 \\ & 2 \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} = 1 / \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & 2 \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} = \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \end{aligned} \quad (21)$$

Zamenom jednačine (21) u jednačinu (19) dobija se:

$$\begin{aligned} & {}_{K i}^{g,q} y_i^j = \frac{1}{2} x^2 - \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x \\ & \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j \\ & {}_{K i}^{g,q} y_i^j = \frac{1}{2} x^2 - \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x + \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j \\ & {}_{K i}^{g,q} y_i^j = \frac{1}{2} x^2 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x + \frac{1}{4} x^2 \\ & 2 \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j \\ & \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{x + 1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j \\ & {}_{K i}^{g,q} y_i^j = \frac{1}{4} x^2 + \frac{1}{2} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{21}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{2} x + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j \\ & {}_{K i}^{g,q} y_i^j = \frac{1}{4} x^2 + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} x \\ & \frac{1}{4} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} + \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \\ & \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{1}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} \frac{{}_{K i}^{g,q} C_i^j - {}_{K i}^{g,q} b_i^j}{{}_{K i}^{g,q} C_i^j} a_i^j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}_K y_i^j &= \frac{1}{4} x^2 - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} x + \frac{1}{4} {}^{g,q} C_i^j \\
 \frac{1}{2} {}^{g,q} b_i^j &= \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} + \frac{1}{2} {}^{g,q} C_i^j - \frac{1}{2} {}^{g,q} b_i^j \\
 &= \frac{1}{4} - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{4} + \frac{{}^{g,q} C_i^j}{2} - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{4} \\
 &= \frac{{}^{g,q} C_i^j}{2} - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} \\
 {}_K y_i^j &= \frac{1}{4} x^2 - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} x + \frac{{}^{g,q} C_i^j}{2} - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} \\
 &= \frac{1}{4} x^2 - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} x + \frac{1}{4} a_i^j \quad (22)
 \end{aligned}$$

Jednačina (22) predstavlja analitički oblik krive obvojnice.

### 3.1. Diskusija rešenja diferencijalne jednačine

Na osnovu rešenja diferencijalne jednačine, jasno je da postoje praktično dva rešenja data jednačinama (16) i (18). Takođe je vrlo bitna i jednačina obvojnice, data jednačinom (22), jer ona omogućuje prognoziranje osnovnih resursa izgradnje složenih proizvodnih sistema, u domenu izrazite dominacije glavnih radova.

#### 3.1.1. Diskusija prvog rešenja diferencijalne jednačine

Prvo parcijalno rešenje diferencijalne jednačine je oblika:

$${}_K y_i^j = \frac{1}{4} x^2 - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} x + \frac{{}^{g,q} b_i^j}{4} - \frac{{}^{g,q} C_i^j}{2} + a_i^j \quad (16)$$

Dakle, u pitanju je kvadratna funkcija čiji je grafik parabola a oblast tehnološke definisanosti je prvi kvadrant.

Kriva je konkavna na gore, jer je

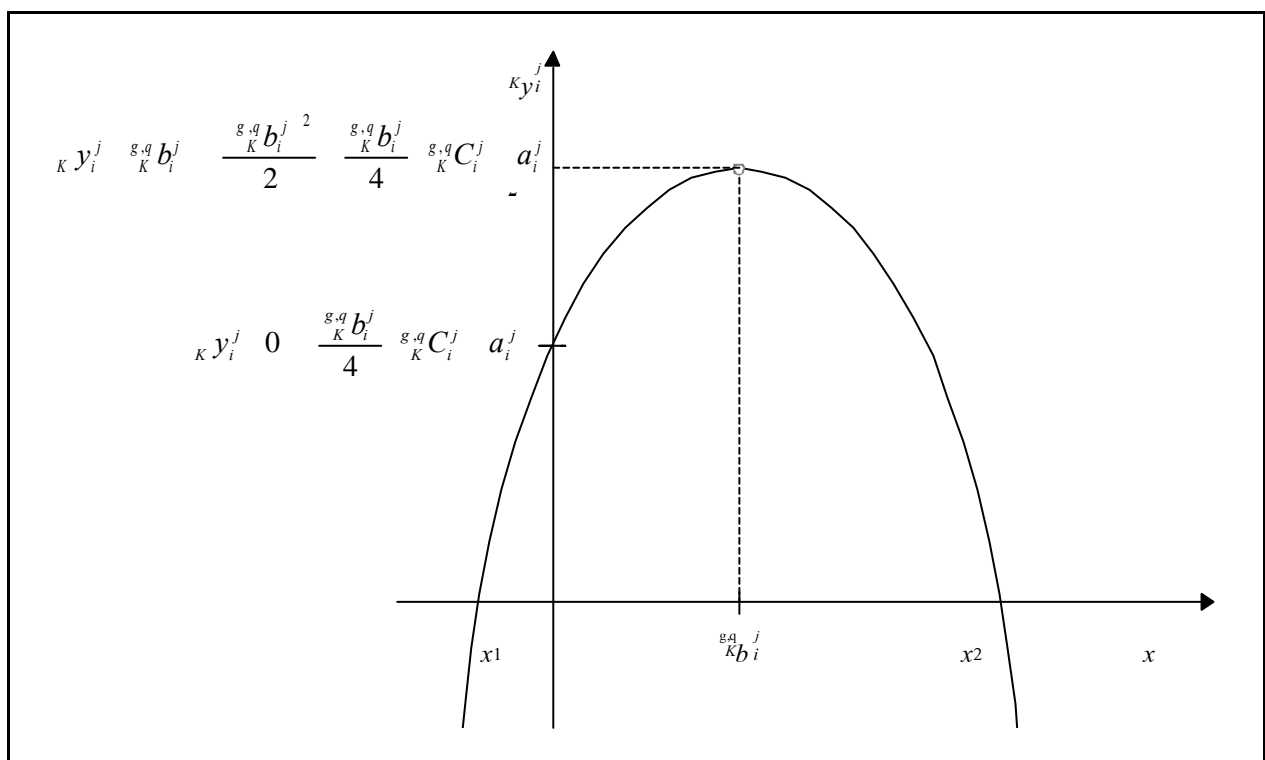
$$({}_K y_i^j)'' = -\frac{1}{2} < 0$$

i, samim tim, ima maksimum.

Koordinate maksimuma biće ujedno i koordinate temena parabole, a određiće se iz uslova

$$\begin{aligned}
 {}_K y_i^j &= 0 \\
 {}_K y_i^j &= 2 \frac{1}{4} x_T - \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2} = 0 \\
 x_T &= \frac{{}^{g,q} b_i^j}{2}
 \end{aligned}$$

vrednost  $({}_K y_i^j)_T$  dobiće se zamenom  $x_T$  u jednačinu (16)



Slika 2. Opšti oblik prvog rešenja diferencijalne jednačine

$$\begin{aligned}
 {}_K y_i^j \quad T &= \frac{\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}^2}{4} - \frac{\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}}{2} + \frac{\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}}{4} \frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} a_i^j \\
 {}_K y_i^j \quad T &= \frac{\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}^2}{4} - \frac{\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}}{4} \frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} a_i^j \quad (23)
 \end{aligned}$$

Jednačina (24) je jednačina maksimuma funkcije  $({}_K y_i^j)_T$ . Evidentno je da je jednačina 24 potpuna kvadratna jednačina u funkciji promenljive  $\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}$ .

Na osnovu zavisnosti  $x_T$  jedino od  $\frac{{}^{g,q} b_i^j}{K}$  i velikog avansnog zahvata  ${}_K y_i^j(0)$ , jasno je da se radi o specifičnom problemu. Naime, ovo upućuje na modularni pristup rešavanju realizacije složenih proizvodnih sistema. Npr. kotlovsku jedinicu razbiti na moduo sagorevanja (gorionici sa gasnom rampom), moduo napojne stanice (napojne pumpe sa napojnom rampom) i sl.

### 3.1.2. Diskusija drugog rešenja diferencijalne jednačine

Drugo rešenje diferencijalne jednačine je oblika

$$\begin{aligned}
 {}_K y_i^j &= \frac{1}{2} x^2 \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} x + \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}^2}{\left(\frac{{}^{g,q} j}{K}\right)^2} \\
 &= \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} \frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} a_i^j \quad (18)
 \end{aligned}$$

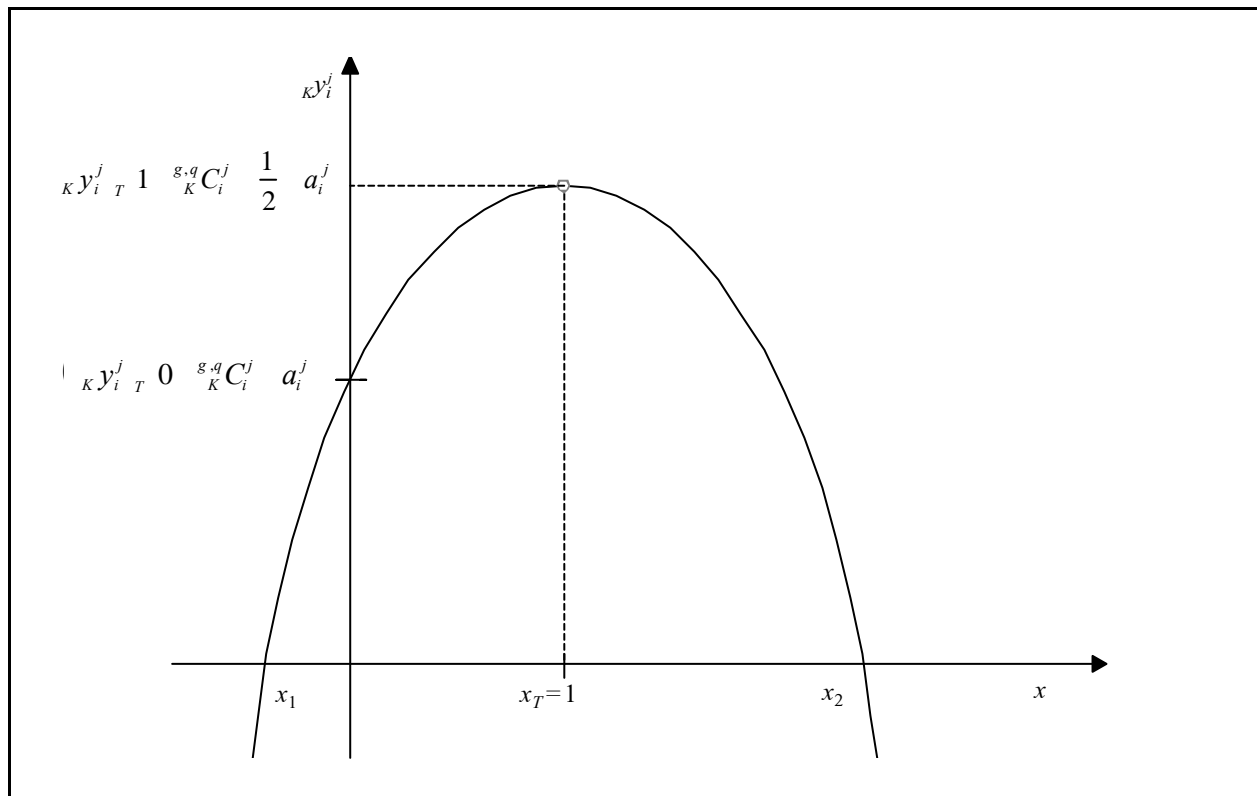
Očigledno je, da je i ova funkcija kvadratna i samim tim grafik joj je parabola. Ovo rešenje ima izražen karakter opštosti.

Dalja ispitivanja ovog rešenja bi se izvodila analogno prethodnoj analizi tj.  $({}_K y_i^j)'' = -1 < 0$ , iz čega sledi egzistencija maksimuma funkcije čije su koordinate  $x_T$  i  $(y_i^j)_T$

$$\begin{aligned}
 {}_K y_i^j &= 0 \\
 {}_K y_i^j &= x_T \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} = 0 \\
 x_T &= \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} \quad (24)
 \end{aligned}$$

Zamenom vrednosti jednačine (24) u jednačinu (18) dobija se

$$\begin{aligned}
 {}_K y_i^j \quad T &= \frac{1}{2} \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}}^2 \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} \\
 &= \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}}^2 \frac{\frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} \frac{{}^{g,q} j}{K}}{\frac{{}^{g,q} j}{K}} \\
 &= \frac{{}^{g,q} C_i^j}{K} a_i^j
 \end{aligned}$$



Slika 3. Opšti oblik maksimuma maksimuma drugog rešenja diferencijalne jednačine

$${}_K Y_i^j \Big|_T = \frac{1}{2} \frac{\frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}}{\frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}} \frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}}{\frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}} \cdot \frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} a_i^j \quad (25)$$

Očigledno je da i moguće vrednosti zavisno promenljive koje uzimaju temena parabole takođe zadovoljavaju kvadratnu funkciju promene u zavisnosti od:

$${}_K Y_i^j \Big|_T = f \frac{\frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}}{\frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}}$$

Iznalazhenje maksimuma maksimumuma kvadratne funkcije maksimuma vršiče se izjednačavanjem prvog izvoda po  $\frac{{}^{g,q}C_i^j - {}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}a_i^j}$  sa nulom (jednačina (25))

$$\frac{{}_K Y_i^j \Big|_T = 0}{\frac{1}{2} \frac{\frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}}{\frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i}} - 1} = 0$$

Na osnovu toga jednačina (24) dobija vrednost  $x_T = 1$ , a zamenom ove vrednosti u jednačinu (18) dobija se funkcija maksimuma maksimumuma funkcije  $(\frac{{}^{g,q}a_i^j}{{}^{g,q}K_i})_T$ , koja glasi:

$${}_K Y_i^j \Big|_T = 1 - \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} a_i^j$$

Vremenska jedinica  $x$  na dijagramu nije uniformna, nego tehnološki uslovljena. Očigledno je da se radi o nekom specifičnom obliku promene osnovnih sistema, jer on nakon prvog vremenskog intervala dostiže maksimum angažovanja posmatranog resursa, dok je sa druge strane avansno angažovanje posmatranog resursa značajno.

U praksi, ovo je dobro poznat slučaj takozvane kontejnerske mašinske montaže. Naime, radi se o montaži manjih tehnoloških celina koje stižu na gradilište složenih proizvodnih sistema kao tehnološki oformljene tj. spakovane u kontejneru.

Značajan zaključak analize drugog rešenja diferencijalne jednačine je da je maksimum maksimumum familije ovih rešenja postignut u  $x_T = 1$ .

Ovo praktično znači da u krajnjoj instanci, ovo rešenje preferira kontejnersku mašinsku montažu. Odavde se može zaključiti da kontejnerska mašinska montaža na osnovu analize drugog rešenja dife-

rencijalne jednačine predstavlja montažu budućnosti.

### 3.1.3. Diskusija rešenja obvojnice parcijalnih rešenja diferencijalne jednačine

Na kraju, potrebno je izanalizirati jednačinu obvojnica (22)

$${}_K Y_i^j \Big|_0 = \frac{1}{4} x^2 - \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 - \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{1}{4} a_i^j \quad (22)$$

Sama jednačina je kvadratnog oblika konkavna na gore. Dakle, i kod nje egzistira maksimum funkcije.

U daljem radu će se vrednost razlike  $\frac{{}^{g,q}C_i^j - {}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}a_i^j}$  predstaviti kao  $\frac{{}^{g,q}C_i^j - {}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}a_i^j} = \frac{{}^{g,q}d_i^j}{{}^{g,q}a_i^j}$ ; i tada je  $\frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}a_i^j} = \frac{{}^{g,q}C_i^j - {}^{g,q}d_i^j}{{}^{g,q}a_i^j}$

$${}_K Y_i^j \Big|_0 = \frac{2}{4} x - \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 - \frac{{}^{g,q}d_i^j}{{}^{g,q}a_i^j} x + \frac{1}{4} a_i^j \quad (26)$$

Uvrštavanjem vrednosti  $x_T$  iz jednačine (26) u jednačinu (22) dobija se  $({}_K Y_i^j \Big|_T)$ .

$${}_K Y_i^j \Big|_T = \frac{1}{4} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 - \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{1}{4} a_i^j - \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 + \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x - \frac{1}{4} a_i^j + \frac{1}{4} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 - \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{1}{4} a_i^j - \frac{1}{4} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 + \frac{1}{2} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x - \frac{1}{4} a_i^j$$

$${}_K Y_i^j \Big|_T = \frac{3}{4} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 - \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{1}{2} a_i^j$$

Ako se ispoštuje napomena  $\frac{{}^{g,q}b_i^j}{{}^{g,q}a_i^j} = \frac{{}^{g,q}C_i^j - {}^{g,q}d_i^j}{{}^{g,q}a_i^j}$

$${}_K Y_i^j \Big|_T = \frac{3}{4} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x^2 - \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} x + \frac{{}^{g,q}C_i^j}{{}^{g,q}K_i} \frac{{}^{g,q}j}{{}^{g,q}K_i} - \frac{1}{2} a_i^j \quad (27)$$

Pošto se radi o kvadratnoj funkciji kod koje je:

$$\frac{d^2}{{}^{g,q}d} \frac{{}_K Y_i^j \Big|_0}{x^2} = 0$$

funkcija ima minimum.

Početna vrednost funkcije data jednačinom (27) određuje se na osnovu uslova:

$${}_{K}^{g,q} y_{i}^j = 0$$

A jednačina (27) u tom slučaju uzima vrednost

$${}_{K} y_{i}^j = {}_{K}^{g,q} C_{i}^j - \frac{1}{2} a_{i}^j$$

Minimum funkcije (27) će se odrediti iz uslova:

$$\frac{d}{d} {}_{K} y_{i}^j = 0 \quad (28)$$

Vrednost minimuma funkcije maksimuma je:

$${}_{K} y_{i}^j = \frac{1}{6} a_{i}^j \quad (29)$$

S obzirom na nejednakosti

$$\left| {}_{K}^{g,q} C_{i}^j \right| \left| {}_{K}^{g,q} y_{i}^j \right| \quad (30)$$

$$\left| {}_{K}^{g,q} C_{i}^j \right| = 1 \quad (31)$$

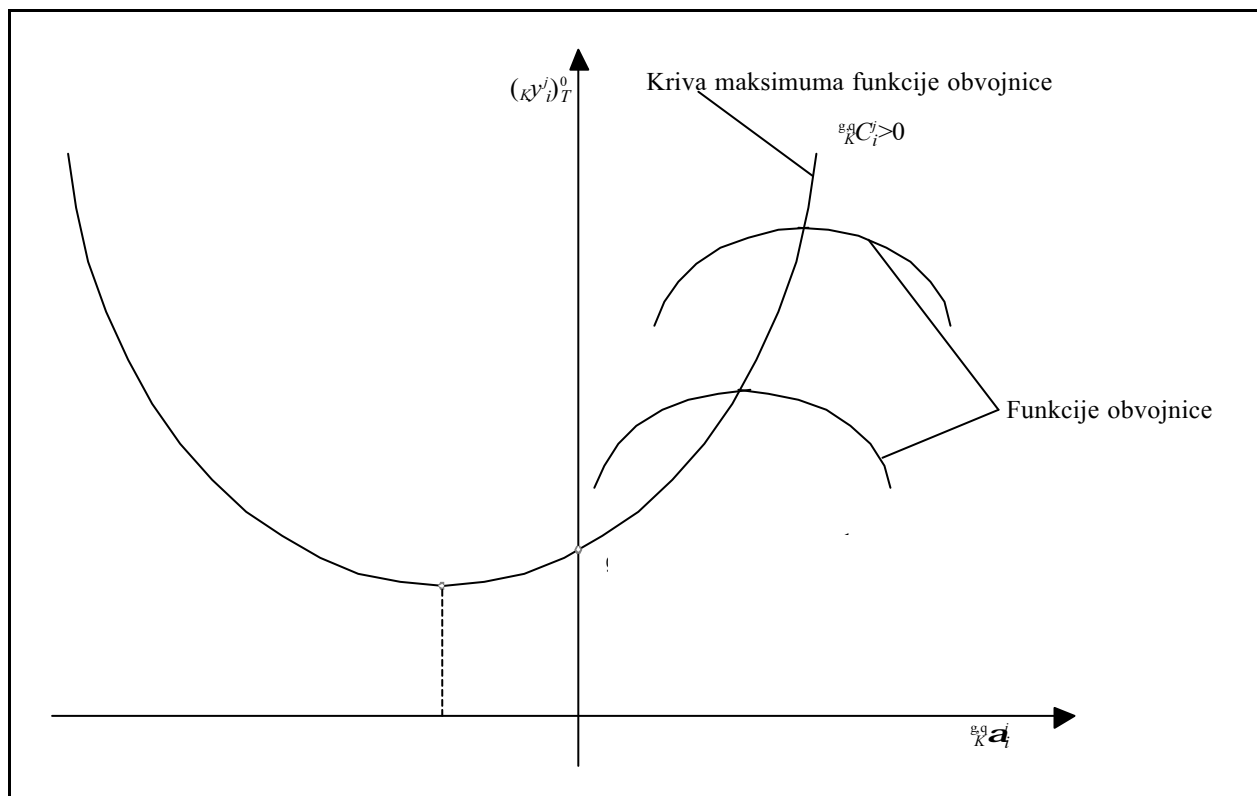
$$\left| {}_{K}^{g,q} C_{i}^j \right| = a_{i}^j \quad (32)$$

Na osnovu opšteg oblika jednačine obvojnice (22), očigledno je da je opšti oblik kvadratna funkcija sa egzistencijom maksimuma.

Ovakav oblik funkcionalne zavisnosti ograničava prostor unutar koga se vrše promene resursa, što omogućuje egzaktno matematičko prognoziranje.

Daljom analizom familije obvojnica parcijalnih rešenja diferencijalne jednačine, dolazi se do zaključka da je kriva maksimuma krive obvojnice u zavisnosti od  $a_{i}^j$ .

Tehnološka uslovljenost vrednosti osnovnih resursa ogleda se upravo u zavisnosti maksimuma kvadratne krive obvojnice od parametara  $a_{i}^j$ ;  ${}_{K}^{g,q} C_{i}^j$ ;  ${}_{K}^{g,q} a_{i}^j$  i  ${}_{K}^{g,q} b_{i}^j$ . Egzistencija ovakve zavisnosti daje strateški značaj matematičkom modelu, zbog mogućnosti izučavanja načelnog karaktera promena funkcija obvojnica u budućnosti. U tom smislu, kao što se sa slike 4 vidi, funkcija maksimuma osnovnih resursa je rastuća. To, u tehnološkom smislu, naglašava progresivni karakter osnovnih resursa izgradnje složenih proizvodnih sistema u budućnosti. Ovakav zaključak moguće je izvesti s obzirom na presudnu ulogu segmenta dominacije glavnih radova izgradnje složenih proizvodnih sistema, nad čitavom oblasti kompozitne krive (slika 1) načelnog karaktera osnovnih resursa izgradnje po faznim domenima.



Slika 4. Kriva maksimuma funkcije obvojnica



#### 4. KONKRETAN PRIMER KVADRATNE ZAVISNOSTI U PERIODU DOMINACIJE MAŠINSKE MONTAŽE RESURSA RADNE SNAGE „ĐURO ĐAKOVIĆ” SLAVONSKI BROD NA GRADILIŠTU TE-TO ZRENJANIN

Aproksimacija kvadratne forme resursa radne snage Đuro Đaković - Slavonski Brod u periodu dominacije glavnih radova mašinske montaže na gradilištu TE-TO Zrenjanin vršiče se kao da linearna završna forma ne egzistira (slika 1).

Numerička izračunavanja bazirana su na teorijskoj metodi sume minimalnih kvadratnih odstupanja i na osnovu nje formirani rezultati sistematizovani su u tabeli 1.

Analitički oblik kvadratne funkcije dobijen u prvoj aproksimaciji je oblika

$$y_K^* = -3,89x_K^2 + 55,01x_K + 245,68 \quad (33)$$

Osnovne karakteristične tačke kvadratne parabole (33) su:

*Vrednost maksimuma u temenu*

$$x_{Kmax}^* = x_{KT}^* = 7,7 \text{ [meseci] tj. 01.XI 1985.}$$

$$y_{Kmax}^* = y_{KT}^* = 449,23 \text{ [izvršilaca]}$$

*Nule funkcije*

$$x_{K01}^* = -3,67 \text{ [meseci] tj. 21. XII 1985.}$$

$$x_{K02}^* = 17,82 \text{ [meseci] tj. 28. IX 1986.}$$

Vrednosti resursa radne snage na osnovu prve aproksimacije uveliko odstupaju od empirijskih vrednosti. Iz tog razloga, odmah je izvršena druga aproksimacija sa ciljem boljeg uklapanja krive, s obzirom na empirijske vrednosti maksimuma. Kao rezultat ove aproksimacije dobijena je kriva:

$$y_K^{**} = -0,57x_K^2 + 8x_K + 282 \quad (34)$$

Osnovne karakteristične tačke kvadratne parabole (34) su:

*Vrednosti maksimuma u temenu*

$$x_{Kmax}^{**} = x_{KT}^{**} = 7,01 \text{ [meseci] tj. 01. X 1985.}$$

$$y_{Kmax}^{**} = y_{KT}^{**} = 310 \text{ [izvršilaca]}$$

*Nule funkcije*

$$x_{K01}^{**} = -16,27 \text{ [meseci] tj. 15. VI 1984.}$$

$$x_{K02}^{**} = 30,31 \text{ [meseci] tj. 15. X 1987.}$$

Analiziranjem funkcije dobijene drugom aproksimacijom na osnovu tabele 1 jasno je da su greške početnog i centralnog dela kvadratne parabole vrlo male, dok su greške završnog dela izuzetno velike.

Tabela 1.

KVADRATNA ZAVISNOST RESURSA RADNE SNAGE U PERIODU IZRAZITE DOMINACIJE MAŠINSKE MONTAŽE „ĐURO ĐAKOVIĆ” - SLAVONSKI BROD

R. br.	Godina kalendarska	1985. godina										1986. godina										
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1.	Mesec kalendarski																					
2.	Mesec po redu $X_K$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3.	Vrednost resursa $Y$ [broj izvršilaca]	286	308	308	307	307	313	313	313	307	227	134	65	20								
4.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive $Y_K^*$ [br.izvr.]	305,8	349,14	384,7	412,48	432,48	444,7	449,14	445,5	434,68	415,78	389,10	354,64	312,40								
5.	Greška [%] $\Delta Y_K^* = \frac{Y - Y_K^*}{Y} \times 100$	6,92	-13,36	-24,9	-34,36	-40,87	-42,08	-43,50	-42,33	-41,59	-83,16	-190,37	-445,6	-146,2								
6.	Srednja selektivna greška $ \bar{Y}_{KS}^*  = \frac{\sum  \Delta Y_K^* }{X_{KS}}$ [%]	32,21																				
7.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive $Y_K^{**}$ [br.izvr.]	289,43	295,72	300,87	304,88	307,75	309,48	310,07	309,52	307,83	305,0	301,03	295,92	289,87								
8.	Greška [%] $\Delta Y_K^{**} = \frac{Y - Y_K^{**}}{Y} \times 100$	-1,12	3,99	2,31	0,69	-0,24	1,12	0,94	1,11	-0,27	-34,36	-124,65	-78,03	-134,84								
9.	Srednja selektivna greška $ \bar{Y}_{KS}^{**}  = \frac{\sum  \Delta Y_K^{**} }{X_{KS}}$ [%]					1,31																

Visok procenat greške završnog domena kvadratne parabole upućuje na zaključak o neizostavnoj potrebi tretiranja ovog domena nekom drugom originalnom završnom formom.

Analizirajući vrednosti nula funkcije, jasno je da prve nule, kao negativne vrednosti padaju van domena tehnološke definisanosti kvadratne funkcije osnovnog resursa radne snage. Vrednosti drugih nula su, pak, toliko velike da uveliko premašuju postavljene rokove završetka investicije.

Ove vrednosti drugih nula funkcije, takođe upućuju na neophodnost iznalaženja originalne završne forme resursa radne snage mašinske montaže na gradilištu TE-TO Zrenjanin.

## 5. ZAKLJUČAK

*Rešavanjem diferencijalne jednačine dinamike promena osnovnih resursa u fazi izrazite dominacije glavnih radova izgradnje složenih proizvodnih sistema, u potpunosti je postignut cilj logističke postavke teorijskog domena posmatranog problema.*

*Na bazi opštih teorijskih postavki, koristeći širok spektar mogućnosti determinisanja izučavanog domena u empirijskom smislu, prišlo se praktičnoj proveru teorijskih postulata.*

*Nizak procenat greške praktične provere, direktno potvrđuje teorijske postulate i takođe potvrđuje empirijsku primenljivost na praktičnim problemima.*

*Sve izloženo u ovom članku imalo je za cilj kompletno upoznavanje sa novopostavljenim teorijskim postulatima i njihov visok stepen primenljivosti na operativne probleme planiranja i prognoziranja osnovnih resursa u izgradnji složenih proizvodnih sistema.*

---

Rad je primljen u uredništvo 21. 01. 2002. godine

## 6. LITERATURA

- [1] Anđelić T.: TENZORSKI RAČUN, „Naučna knjiga”, Beograd 1966. godine
- [2] Bogner M., Petrović A.: PROCENA USLUGA U INVESTICIONOJ IZGRADNJI, Smeits, Beograd 1995. godine
- [3] Čukić R., Radović Ž.: INVESTICIJE-IZGRADNJA OBJEKATA, OBEZBEĐENJE SREDSTAVA I OBEZBEĐENJE PLAĆANJA INVESTICIJA, Pravno-ekonomski centar, Beograd 1984. godine
- [4] Džigurski B., Ćosić I.: PRIRUČNIK ZA PROJEKTOVANJE, Mašinski fakultet, Novi Sad 1975. godine
- [5] Jovanović P., Radulović N.: ANALIZA OSETLJIVOSTI KRITERIJUMA ZA OCENU INVESTICIONIH PROJEKATA, Naučna konferencija IS'90, Novi Sad 1990. godine
- [6] Kerzner H.: PROJECT MANAGEMENT, PART I, PART II BALDWIN-WALLACE COLLEGE, Berea 1994.
- [7] Lambić M.: UPRAVLJANJE RAZVOJNIM PROCESIMA, TF „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin 1993. godine
- [8] Rajnović B.: KARAKTER PROMENA OSNOVNIH RESURSA MAŠINSKE MONTAŽE U INVESTICIONOJ IZGRADNJI, Magistarski rad, Zrenjanin, 1998. godine
- [9] Radlovački S., Marić B.: OSNOVNE ORGANIZACIJE RADA, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 1982. godine
- [10] Riggs J.: ECONOMICS DECISION MODELS FOR ENGINEERS AND MANAGERS, McGraw Hill Book Co., New York, 1968.

## „Tranzistorski pretvarači snage”

– drugo izdanje –

autor Mr Radojle Radetić

Od osamdesetih godina tehnologija izrade bipolarnih tranzistora (BT) je doživela veliki napredak, tako da se danas stiglo do tranzistora za napon i iznad 1 kV i struju iznad 1 kA. Veća brzina rada i potpuna upravljivost omogućili su da oni nađu svoje mesto i tako potisnu tiristore u oblasti pretvarača nižih snaga (do nekoliko stotina kW) i viših frekvenci (reda kHz i više). Prvi značajniji uspesi postignuti su razvojem bipolarnih tranzistorskih modula velikih snaga. Vrlo brzo se postižu odlični dobri rezultati u razvoju snažnih FET-ova, što je zajedno sa BT omogućilo izradu kombinacije nazvane IGBT (insulated gate bipolar transistor). Na ovaj način, postignuta je još veća brzina rada i upravljanje sa veoma malom strujom gejta (naponsko upravljanje). Knjiga se sastoji od pet poglavlja i to su:

**1. Tranzistori i diode snage:** U ovom poglavlju se detaljno obrađuju najvažnije električne (statičke i dinamičke), i toplotne karakteristike snažnih tranzistora i dioda. Pored bipolarnih, obrađene su karakteristike tranzistora tipa IGBT i prekidačkih MOSFET-ova.

**2. Transformatori i prigušnice:** U ovom poglavlju se obrađuju pitanja kao što su: osnovni oblici magnetnih jezgara, materijali za jezgra, namoti, rad u širokom opsegu frekvenci, promena napona, magnetna rasipanja, predmagnećenje, strujni udar pri uključenju, zagrevanje, elementi proračuna transformatora za pretvarače tipa FORWARD i FLY-BACK, transformatori za ispravljače, prigušnice i slično. Detaljno je prikazana analiza rada transformatora u širokom opsegu frekvencija. Zbog oskudne literature na našem jeziku, unešeno je i nekoliko podnaslova o tiristorskim ispravljačima.

**3. Pretvarači:** U ovom delu su, u manjoj ili većoj meri, opisane sve (četiri) vrste pretvarača.

Kod DC/DC pretvarača opisano je deset vrsta jednoimpulsnih i dvoimpulsnih, direktnih i indirektnih pretvarača. DC/AC pretvarači (invertori) su podeljeni na naponske i strujne i posebno opisani. Kod naponskih invertora su obrađena sva važnija pitanja. Kod strujnih invertora date su osnovne definicije,

a detaljnije se analiziraju strujni invertori u rezonantnom radu. Ovo je centralno i, po obimu, najveće poglavlje, po kome je knjiga i dobila naziv.

**4. Regulacija brzine elektromotora:** Ovde se posebno razmatraju regulacija brzine jednosmernog i asinhrohog motora. Kod jednosmernog (DC) motora se prvo ukratko ukazuje na moguće načine regulacije brzine, a zatim se daju osnovne konfiguracije tranzistorskih čopera za rad u jednom, dva, ili četiri kvadranta. Kod asinhronog motora se prvo analizira rad pri konstantnom naponu i frekvenci, konstantnoj struji i frekvenci, a zatim regulacija brzine pri konstantnom odnosu napona i frekvence kao i pri konstantnom fluksu. Posle toga se govori o trofaznim tranzistorskim inverterima sa impulsno amplitudnom modulacijom (PAM) i impulsno širinskom modulacijom (PWM). Obrađena su i pitanja, kao što su: elektrodinamičko kočenje jednosmernom strujom na statoru, poluprovodnička podsinhrona kaskada i slično.

**5. Kola za upravljanje:** U prvom delu ovog poglavlja se obrađuju potrebni oblici bazne struje i upravljačka (drajverska) kola koja treba da ih obezbede. U drugom delu se daju primeri nekih osnovnih kola za generisanje upravljačkih signala namenjenih upravljanju tranzistorskim pretvaračima. Pored kola za bipolarne tranzistore, tu su i kola za upravljanje tranzistorima tipa IGBT i prekidačkim MOSFET-ovima. Takođe je dat prikaz većeg broja integrisanih kola, sa primerima njihove primene. Prikazano je dosta električnih šema pretvarača, sa konkretnim brojnim vrednostima pojedinih komponenta.

Knjiga ima 270 stranica, sa preko 300 slika i obilje matematičkih izraza. Osnovna namena ove knjige je da upotpuni prazninu, koja kod nas postoji u ovoj oblasti energetske elektronike. Prvenstveno je namenjena inženjerima i tehničarima koji se, na bilo koji način, bave tranzistorskim pretvaračima, a verujem da može biti od koristi i studentima redovnih i postdiplomskih studija.

**Izdavač: Nauka, Beograd, maja 2002. godine**

# **Zbirka rešenih zadataka iz proizvodnje, prenosa i upotrebe električne energije – drugo izdanje –**

*autor dr Jovan Štarklj*

---

Početkom 2002. godine, u izdanju Akademске misli iz Beograda, izašla je iz štampe „Zbirka rešenih zadataka iz proizvodnje, prenosa i upotrebe električne energije”, autora dr. Jovana Štarklja. Zbirka sadrži 150 zadataka iz sledećih oblasti:

- sinhroni generatori i stabilnost;
- kratki spojevi;
- vodovi za prenos električne energije;
- proračuni tokova struja i snaga u delovima električnih mreža, kao i gubitaka snage i električne energije;
- primarna regulacija učestanosti u elektroenergetskim sistemima;
- regulacija napona i kompenzacija reaktivne snage u električnim mrežama;
- upotreba električne energije;
- primena metoda iz teorije verovatnoće i matematičke statistike kod rešavanja zadataka iz električnih mreža i elektroenergetskih sistema;

– električna merenja i tehnika visokog napona.

Zbirka sadrži zadatke različite težine, od elementarnih primera do izuzetno složenih i teških problema. Data rešenja zadataka su primerena težini i složenosti postavljenih problema.

Kao što je navedeno, zadaci su grupisani po oblastima. Za svaku oblast najpre su dati elementarni primeri, a potom složeniji i teži. Posebno su edukativni problemi koji se odnose na sinhronu generatore i stabilnost, primarnu regulaciju učestanosti u elektroenergetskom sistemu i primenu metoda iz teorije verovatnoće na rešavanje problema u elektroenergetskim sistemima.

Dugogodišnji rad autora „Zbirke u oblasti upravljanja i eksploatacije elektroenergetskog sistema” odlučujuće je uticao na izbor zadataka. Izabrani zadaci su vrlo često problemi iz prakse, te ova „Zbirka” može biti od velike koristi inženjerima u elektroprivredi, pri rešavanju praktičnih problema. Zbirka zadataka se takođe preporučuje i studentima elektrotehnike - smer elektroenergetski sistemi, kao moguća dodatna literatura.

*D. Tubić*