



Elektroprivreda

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

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

Sadržaj	Strana Page	Content
<i>Dragan S. Popović</i> GENERALIZOVANI MODEL TRANSFORMATORA I TOKOVI SNAGA	3	GENERALIZED MODEL OF TRANSFORMER AND POWER FLOWS
<i>Duško Bekut, Izabela Berić i Aleksandar Parmaković</i> PREKOSTRUJNE ZAŠTITE U SLABOUPETLJANIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	15	OVERCURRENT PROTECTIONS IN WEAKLY MESHED DISTRIBUTION NETWORKS
<i>Dragan S. Popović, Željko Popović i Vojin Kerleta</i> IZBOR RIZIKA U PROCESU RESTAURACIJE OPTEREĆENJA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA	26	DISTRIBUTION NETWORKS RESTORATION SUPPLY BASED ON RISK SELECTION
<i>Tomislav Milanov</i> PRORAČUNI NESIMETRIČNIH STRUJA KRATKIH SPOJEVA U NADZEMNIM ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA NA KONZUMU JP „ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD”	37	CALCULATION OF NON-SYMMETRICAL SHORT- CIRCUIT CURRENTS IN OVERHEAD ELECTRIC POWER DISTRIBUTION NETWORKS OF „ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD”
<i>Predrag Brzaković</i> UTICAJ ENERGETSKOG KOMPLEKSA „KOSTOLAC” NA KVALITET ŽIVOTNE SREDINE	48	INFLUENCE OF ENERGETIC COMPLEX „KOSTOLAC” ON ENVIRONMENTAL QUALITY
<i>Dragan Trtica</i> PRIMENA METODE INTEGRALA KVADRATA GREŠKE - PRETEKA FAZE I POJAČANJA U POSTUPKU PODEŠAVANJA PARAMETARA PROPORCIONALNO - INTEGRALNO DIFERENCIJALNOG REGULATORA	56	APPLICATION OF INTEGRAL SQUARE ERROR-GAIN PHASE MARGIN METHOD IN THE PROCEDURE OF PROPORTIONAL INTEGRAL DIFFERENTIAL REGULATOR ADJUSTMENT
<i>Božidar Rajnović</i> RAZVOJ MODELA OSNOVNIH PROGRESIVNIH RESURSA U IZGRADNJI SLOŽENIH PROIZVODNIH SISTEMA - četvrti deo -	65	MODEL OF DEVELOPMENT OF PROGRESSIVE RESOURCE IN BUILDING OF COMPOUND PRODUCTION SYSTEMS - part four -
<i>Branislav A. Bošković</i> OSTVARENJE ELEKTROENERGETSKOG BILANSA JUGOSLOVENSKE ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA U 2002. GODINI	80	REALIZATION OF THE POWER BALANCE OF THE YUGOSLAV ELECTRIC POWER SYSTEM IN 2002.
UPUTSTVO AUTORIMA ZA SARADNJU U STRUČNOM GLASILU „ELEKTROPRIVREDA”	94	GUIDELINES FOR AUTHORS OF THE „ELEKTROPRIVREDA” JOURNAL

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.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu; 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;

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

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

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

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

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

REDAKCIONI ODBOR

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

TEHNIČKI UREDNIK
TECHNICAL EDITOR

Jovo Todorović dipl. teh.

LEKTOR

LINGUISTIC REVIEW

Lela Lončar, dipl. filolog

TEHNIČKI CRTAČ

MAPS AND GRAPHICS

Milanka Pejović,

teh. crtač

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Časopis „Elektroprivreda” se izdaje u 2002. godini uz finansijsku pomoć Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije

The „Elektroprivreda” journal is published in 2002 with financial support of Ministry for Science, Technology and Development of the Republic of Serbia

Štampa: „Kultura”, Beograd, Maršala Birjuzova 28

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

Tiraž: 1 000 primeraka

Circulation: 1,000 copies

Dragan P. Popović

Generalizovani model transformatora i tokovi snaga

Originalni naučni rad
UDK: 621.3.05; 621.314; 621.313

Rezime:

U radu se izlaže razvoj modela transformatora čiji se efekti kvantifikuju preko odgovarajućih injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga u čvorištima njegovog priključka. Takav način modelovanja ne ugrožava simetričnost matrice admitansi čvorova elektroenergetskog sistema, a njegova izvedena generalna forma omogućuje jednostavno predstavljanje, kako energetskih transformatora sa i bez regulacije ugla, tako i statičkih transformatora sa regulacijom ugla elektroenergetskog sistema. Izabrani način modelovanja takođe omogućuje formulaciju jednostavnih procedura određivanja tokova snaga u karakterističnim statičkim, kvazidinamičkim i dinamičkim stanjima, koje imaju potrebnu efikasnost i fleksibilnost, što je utvrđeno na primerima niza karakterističnih stanja druge UCTE sinhrona zone.

Ključne reči: transformator, generalizovani model, regulacija ugla, injektirane snage, druga UCTE sinhrona zona

Abstract:

GENERALIZED MODEL OF TRANSFORMER AND POWER FLOWS

The paper deals with development of transformer model, the effects of which are quantified by means of corresponding injected active and reactive power in its connection nodes. Such means of modelling does not jeopardize the matrix symmetry of node admittances in the electric power system, and its derived general form enables a simple presentation of both energy transformers with or without angle regulation, as well as static transformers with angle regulation (so-called serial FACTS power flow controllers). The selected means of modelling also enables formulation of simple procedures of power flow determination in specific static, quasi-dynamic states, which have the necessary efficiency and flexibility, which is proved in examples of numerous specific states of the second UCTE synchronous zone.

Key words: transformer, generalized model, angle regulation, injected power, second UCTE synchronous zone

1. UVOD

U dosadašnjoj praksi, kada su u pitanju bili tzv. konvencionalni energetski transformatori, odnosno transformatori sa realnim prenosnim odnosima, njihovo modelovanje je vršeno, po pravilu, preko odgovarajuće zamenske šeme. Pri tome, njihovo inkor-

poriranje u matricu admitansi elektroenergetskog sistema nije ugrožavalo njenu simetričnost, osobinu koja se dalje znalački koristila u tehnici rešavanja problema tokova snaga.

Međutim, ako bi se takav pristup modelovanju primenio u slučajevima energetskih transformatora

Prof. dr Dragan P. Popović, naučni savetnik Instituta „Nikola Telsa”, 11000 Beograd, Koste Glavinica 8a
e-mail: dpopovic@ieent.org

sa regulacijom ugla, kao i slučajevima statičkih transformatora sa regulacijom ugla (tzv. serijski FACTS kontroleri tokova snaga), matrica admitansi EES-a postala bi nesimetrična, sa poznatim nepovoljnim konsekvencama. Uz znatno povećanje memorijskih zahteva, povećalo bi se i vreme simulacija u odnosu na proračune tokova snaga bez ovih transformatora.

Takva iskustva stečena su i u okviru radova [1, 2], u kojima su se efekti transformatora sa regulacijom ugla određivali primenom poznatog računarskog programom CLF-OPF [3], u kome je predviđeno da se ovi transformatori isključivo modeluju preko uobičajene zamenske šeme.

Stoga je postala atraktivna ideja o modelovanju efekata ovih kontrolera tokova snaga (odnosno transformatora sa kompleksnim prenosnim odnosima) preko injektiranih snaga u relevantnim čvorovima, a koje (modelovanje) ne ugrožava prirodnu simetričnost matrice admitansi.

U radu [4], formiran je jedan uprošćen inkrementalni model koji se odnosi samo na injektirane aktivne snage, uz zanemarenje konduktansi elemenata na kome se on nalazi. Nešto složeniji prilaz dat je u [5], ali i dalje je bila samo aktivna snaga u pitanju, uz takođe, uvažavanje jedino susceptansi. U [6], razvijeni model transformatora sa regulacijom ugla obuhvata i injektiranu reaktivnu snagu, ali i dalje samo uz uvažavanje susceptansi elemenata na kojima su instalirani ovi kontroleri.

Međutim, kako je to bilo pokazano u radu [7], ako se želi dostizanje visoke preciznosti određivanja svih efekata serijskih kontrolera tokova snaga, uključujući i onaj osnovni - regulacija aktivnih snaga, neophodno je bilo da se uvaži i uticaj konduktansi kod formiranja izraza za injektirane snage. U tom cilju, proširen je model injektiranih snaga, izložen u [6], obuhvatajući uticaj konduktansi elemenata na kojima su ugrađeni ovi kontroleri.

Dalje, u radu [8], pokazano je kako se injekcioni model statičkog transformatora sa regulacijom ugla, formiran u [7], uspešno inkorporira u metode određivanja tokova snaga u uslovima kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa elektroenergetskih interkonekcija.

Pisanje ovoga rada podstaknuto je projektom koji se radi za Elektroprivredu Srbije, čiji je naziv „Razvoj i praktična primena računarskog programa za automatizovan proračun prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija”. S obzirom na to da u susednim EES (Rumunija, Bugarska) postoje energetske transformatori sa regulacijom ugla, pitanje njihovog adekvatnog modelovanja dobilo je na aktuelnosti i značaju.

Saglasno tom izazovu, osnovni cilj ovoga rada je, imajući u vidu prethodno stečena iskustva na pla-

nu modelovanja statičkih transformatora sa regulacijom ugla, da formira **generalizovani injekcioni model transformatora**, iz koga se veoma jednostavno mogu da izvedu modeli svih postojećih, kako konvencionalnih (sa nominalnim i nenominalnim prenosnim odnosima), tako i energetskih transformatora sa regulacijom ugla, uključujući i tzv. serijske FACTS kontrolere tokova snaga.

Naravno, moglo bi da se postavi pitanje: zašto se ovi FACTS kontroleri tretiraju u radovima domaćih autora, kad njih nema u EES Srbije i njegovom okruženju? To je tačno, za sada ih nema, ali pitanje je šta će biti u budućnosti, kada bude formirano Regionalno tržište električne energije (REM) u jugoistočnoj Evropi, a pogotovu kada ono intenzivno „proradi”. Nije isključeno da će se u uslovima većih tranzita, u dužem vremenskom trajanju, pokazati tehnookonomska opravdanost ugradnje ovih kontrolera na najpogodnijim lokacijama.

Velika pogodnost ovakvog načina modelovanja transformatora biće pokazana i u kontekstu razvoja i praktične primene metoda određivanja tokova snaga u relevantnim statičkim, kvazidinamičkim i dinamičkim stanjima realnih elektroenergetskih interkonekcija. Daje se realna mogućnost za uspešno korišćenje postojećih računarskih programa za proračun tokova snaga u nizu karakterističnih stanja elektroenergetskih interkonekcija. U pitanju su samo minimalne dopune kod određivanja vektora debalansa snaga (mismatch) tokom iterativnih procedura, saglasno izabranom načinu modelovanja transformatora.

2. LISTA UPOTREBLJENIH OZNAKA

$\underline{t} = t e^j$ - kompleksni odnos transformacije transformatora sa regulacijom ugla

t - moduo kompleksnog prenosnog odnosa

\underline{f} - ugao regulacije transformatora sa regulacijom ugla

\underline{y} - redna admitansa transformatora

\underline{y} - redna admitansa dalekovoda

$\underline{y}_{ok}^{km}, \underline{y}_{om}^{km}$ - očne admitanse dalekovoda

$\underline{g}_{km}, \underline{b}_{km}$ - konduktansa i susceptansa elemenata „ $k-m$ ”

Q_{km} - razlika uglova fazora napona na početku i kraju elemenata „ $k-m$ ”

N - ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih čvorova EES-a

NG - ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatorskih čvorova

MSV - ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatora koji imaju statičku karakteristiku napon - reaktivna snaga

NL - ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih „neproizvodnih” čvorova

NC - oznaka skupa čvorova EES-a na kojima su priključeni energetski transformatori sa i bez regulacije ugla, odnosno oznaka skupa čvorova elemenata na kojima su ugrađeni serijski FACTS kontroleri tokova snaga, modelovanih preko odgovarajućih injektiranih snaga

$\Delta f = f - f_0$ - odstupanje kvazistacionarne vrednosti jedinstvene učestanosti EES-a f od svoje vrednosti iz polaznog ustaljenog stanja f_0

k_p - regulaciona konstanta agregata

P_{GO}, Q_{GO} - aktivna i reaktivna snaga generatora u polaznom ustaljenom stanju

V_{GO} - napon na krajevima generatora u polaznom ustaljenom stanju

s_V - statizam primarne regulacije napona generatora

$P_L(V, f), Q_L(V, f)$ - aktivna i reaktivna snaga potrošača kao složene nelinearne funkcije od napona i učestanosti

P, Q - aktivna i reaktivna snaga injektiranja

$E\mathcal{Q}$ - elektromotorna sila sinhronne mašine, uslovljena fluksnim obuhvatom u njenoj q -osi, koja odgovara tranzijentnom periodu

$E\mathcal{d}$ - elektromotorna sila uslovljena fluksnim obuhvatom u d -osi sinhronne mašine u tranzijentnom periodu

$x\mathcal{q}, x\mathcal{d}$ - tranzijentne reaktanse sinhronne mašine u poprečnoj, odnosno podužnoj osi

d - električni ugao q -ose rotora sinhronne mašine u odnosu na proizvoljno izabranu osu sa sinhronom ugaonom brzinom obrtanja

V, \mathcal{Q} - moduo i ugao fazora napona \underline{V}

$M = T_j S_n$ - konstanta sinhronne mašine

T_j - vremenska konstanta inercije

S_n - nominalna prividna snaga

P_m - mehanička snaga sinhronne mašine

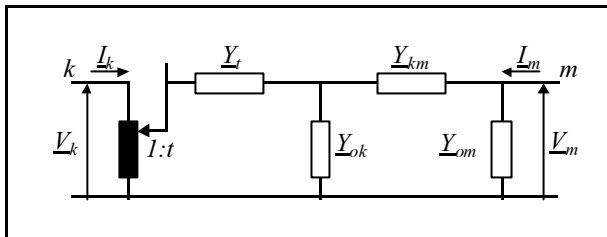
k, l - subiteracioni indeksi

3. GENERALIZOVANI INJEKCIONI MODEL TRANSFORMATORA

Do sada, kao što je već rečeno, kada je u pitanju modelovanje klasičnih energetskih transformatora, po pravilu je prisutan konvencionalni prilaz, baziran na odgovarajućoj modifikaciji matrice admitansi čvorova EES-a, nastaloj inkorporiranjem njegove zamenske šeme, pri čemu je bila sačuvana njena važna osobina - *simetričnost*.

Međutim, takav prilaz modelovanju, kada su u pitanju energetski transformatori sa regulacijom ugla ili serijski FACTS kontroleri tokova snaga, doводи do *nesimetričnosti* matrice admitansi.

To će najbolje biti ilustrovano slikom 1 i u njenom daljom matematičkom interpretacijom. Na njoj je dat najopštiji slučaj zamenske šeme statičkog transformatora sa regulacijom ugla čija je admitan-



Slika 1. Zamenska šema dalekovoda i statičkog transformatora sa regulacijom ugla

sa, y_p , priključenog na početku dalekovoda, predstavljenog uobičajenom „P” šemom (redna admitansa, y_{km} , otočne admitanse y_{ok}, y_{om}).

Saglasno slici 1, važi sledeća veza između fazora struja (I_k, I_m) i napona (V_k, V_m):

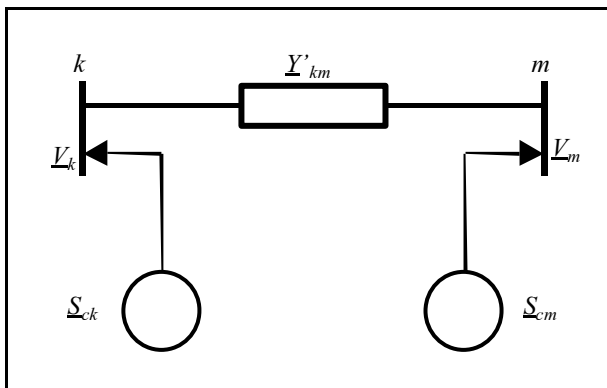
$$\begin{aligned} \underline{I}_k &= t^2 (\underline{y}'_{km} + \underline{y}_{ok}) - t^* \underline{y}'_{km} \underline{V}_k \\ \underline{I}_m &= -t \underline{y}'_{km} \underline{V}_k + (\underline{y}'_{km} + \underline{y}_{om}) \underline{V}_m \end{aligned} \quad (1)$$

gde je $\underline{y}'_{km} = \underline{y}_{km} \underline{y}_t / (\underline{y}_{km} + \underline{y}_t)$, a simbol „*” označava konjugovano-kompleksnu veličinu.

U slučaju energetskog transformatora sa regulacijom ugla, priključenog na čvorove k i m (dakle, tu nema dalekovoda kao u slučaju serijskog FACTS kontrolera, već je u pitanju sam transformator sa svojom admitansom \underline{y}_t), u sistemu jednačina (1) treba staviti da je $\underline{y}_{km} = \underline{y}_t$, a izostaviti otočne elemente \underline{y}_{ok} i \underline{y}_{om} .

Sistem jednačina (1) na jasan način pokazuje suštinu modifikacije matrice admitansi EES-a, u kome se nalaze transformatori sa regulacijom ugla, bili oni energetski ili statički, odnosno serijski FACTS kontroleri tokova snaga. Ta matrica evidentno postaje nesimetrična i funkcija ugla regulacije f , sa poznatim nepovoljnim posledicama.

Drugi prilaz modelovanju ovih transformatora, kao što je već bilo rečeno, baziran je na odgovarajućem modelu injektiranih snaga u relevantnim čvoro-



Slika 2. Model transformatora izražen preko injektiranih snaga S_{ck} i S_{cm} .

vima, a koji ne ugrožava prirodnu simetričnost matrice admitansi EES-a (pomenuti radovi [4–7]).

U koncipiranju injeccionog modela transformatora, polazi se striktno od zamenske šeme date na slici 1, odnosno od sistema jednačina (1), sa ciljem da se, saglasno slici 2, odrede injektiranja u krajnjim tačkama k i m , koja će u potpunosti tačno kvantifikovati efekte ovih transformatora.

Dakle, imajući u vidu namenu i suštinu modela injektiranih snaga transformatora, predstavljenog na slici 2, potrebno je definisati injektirane kompleksne snage S_{ck} i S_{cm} , čije vrednosti moraju biti takve da, za element modelovan samo preko admitanse (za slučaj serijskog FACTS kontrolera, priključenog na dalekovod) ili admitanse y'_{km} (za slučaj energetskog transformatora sa regulacijom ugla), daju efekte identične onima koji bi proizašli iz načina modelovanja sa slike 1, odnosno saglasno sistemu jednačina (1).

Striktno respektujući prethodno dati uslov, tražene injektirane aktivne i reaktivne snage u čvorovima k i m , posle kraćih elementarnih matematičkih operacija i sređivanja, imaće sledeći oblik (izostavljen indeks „ m ” kod elemenata g_{km} i b_{km} ekvivalentne admitanse):

$$P_{ck} = g_{km} V_k^2 1 - t^2 - g_{km} V_k V_m tc 1 \cos \alpha_{km} - ts \sin \alpha_{km} + b_{km} V_k V_m tc 1 \sin \alpha_{km} - ts \cos \alpha_{km} \quad (2)$$

$$Q_{ck} = b_{km} V_k^2 1 - t^2 - g_{km} V_k V_m tc 1 \sin \alpha_{km} - ts \cos \alpha_{km} - b_{km} V_k V_m tc 1 \cos \alpha_{km} - ts \sin \alpha_{km} \quad (3)$$

$$P_{cm} = g_{km} V_k V_m tc 1 \cos \alpha_{km} - ts \sin \alpha_{km} - b_{km} V_k V_m ts \cos \alpha_{km} - tc 1 \sin \alpha_{km} \quad (4)$$

$$Q_{cm} = g_{km} V_k V_m tc 1 \sin \alpha_{km} - ts \cos \alpha_{km} - b_{km} V_k V_m ts \sin \alpha_{km} - tc 1 \cos \alpha_{km} \quad (5)$$

gde je $tc = t \cos \alpha$, a $ts = t \sin \alpha$.

Na taj način, relacije (2), (3), (4) i (5) predstavljaju matematički oblik injeccionog modela transformatora. A da je u pitanju stvarno njegov **generalizovani oblik**, odnosno da iz njega mogu da proizađu sve postojeće vrste energetskih transformatora (sa realnim i kompleksnim prenosnim odnosima), uključujući i statičke transformatore sa regulacijom ugla (tzv. serijski FACTS kontroleri tokova snaga), pokazaće naredno poglavlje ovoga rada.

4. POSEBNI SLUČAJEVI GENERALIZOVANOG INJEKCIONOG MODELA TRANSFORMATORA

4. 1. Klasični energetski transformatori

Kod ovih transformatora prenosni odnos je realna vrednost (naravno, tada ugao regulacije ne postoji, odnosno f ima nultu vrednost).

U slučaju kada je prenosni odnos *nominalan* ($t=1$), sva injektiranja, saglasno relacijama (2)-(5), evidentno imaće nultu vrednost, što je i očekivano kada su ovi transformatori u pitanju. Dakle, ima se ista situacija kao kada se ovi transformatori predstavljaju preko odovarajuće zamenske šeme.

U slučaju nenominalnog prenosnog odnosa ($t \neq 1$), postojaće odgovarajuća injektiranja, što je takođe bilo očekivano, ali tu postoje evidentne razlike u odnosu na tradicionalni prilaz modelovanju preko zamenske šeme.

Tada relacije (2)-(5), za $f=0$, odnosno $tc=t$, a $ts=0$, dobijaju sledeći oblik :

$$P_{ck} = g_{km} V_k^2 1 - t^2 - g_{km} V_k V_m t 1 \cos \alpha_{km} + b_{km} V_k V_m t 1 \sin \alpha_{km} \quad (2a)$$

$$Q_{ck} = b_{km} V_k^2 1 - t^2 - g_{km} V_k V_m t 1 \sin \alpha_{km} - b_{km} V_k V_m t 1 \cos \alpha_{km} \quad (3a)$$

$$P_{cm} = g_{km} V_k V_m t 1 \cos \alpha_{km} - b_{km} V_k V_m t 1 \sin \alpha_{km} \quad (4a)$$

$$Q_{cm} = g_{km} V_k V_m t 1 \sin \alpha_{km} - b_{km} V_k V_m t 1 \cos \alpha_{km} \quad (5a)$$

4. 2. Energetski transformatori sa regulacijom ugla

Izvedena generalna forma injeccionog modela omogućuje predstavljanje bilo koga postojećeg tipa energetskih transformatora sa regulacijom ugla. U okviru ovoga rada, kao karakteristični primeri biće apostrofirana tri sledeća njihova tipa, a koja su prisutna u poznatom i široko korišćenom računarskom programu CLF-OPF [3]:

- tip 3 kod koga je prenosni odnos fiksiran i jednak nominalnom ($t=1$), a zadaje se samo ugao regulacije f ;
- tip 4, kod koga se zadaje veličina r , a ugao α iznosi 60° ;
- tip 5, kod koga se takođe zadaje veličina r , a ugao α iznosi 120° .

Veze između zadatih veličina r i ugla α , sa veličinama prenosnog odnosa t i ugla regulacije α su sledeće:

$$t = \sqrt{1 - r^2 \cos^2 \alpha - r^2 \sin^2 \alpha} \quad (6)$$

$$\alpha = \arctg \frac{r \sin \alpha}{1 - r \cos \alpha} \quad (7)$$

Na taj način, poznavajući veličine r i α , odnosno sračunavanjem prenosnog odnosa i ugla regulacije posredstvom datih relacija (6) i (7), omogućena je neposredna komunikacija sa izvedenim generalizovanim injeccionim modelom transformatora, dajući preko relacija (2)-(5).

4. 3. Statički transformatori sa regulacijom ugla (serijski FACTS kontroleri tokova snaga)

Kod ovih transformatora postoji sledeća veza između prenosnog odnosa i ugla regulacije [6]:

$$t = I / \cos \quad (8)$$

Respektujući dati odnos, relacije (2)-(5) postaju identične relacijama datim u pomenutom radu [7], odnosno :

$$P_{ck} = -g_{km} V_k^2 \tan^2 - g_{km} V_k V_m \tan \sin_{km} + b_{km} V_k V_m \tan \cos_{km} \quad (2b)$$

$$Q_{ck} = g_{km} V_k V_m \tan \cos_{km} + b_{km} V_k^2 \tan^2 + b_{km} V_k V_m \tan \sin_{km} \quad (3b)$$

$$P_{cm} = -g_{km} V_k V_m \tan \sin_{km} - b_{km} V_k V_m \tan \cos_{km} \quad (4b)$$

$$Q_{cm} = -g_{km} V_k V_m \tan \cos_{km} + b_{km} V_k V_m \tan \sin_{km} \quad (5b)$$

U slučaju da se zanemare konduktanse, relacije(2)-(5) postaju identične relacijama datim u [6], odnosno

$$P_{ck} = b_{km} V_k V_m \tan \cos_{km} \quad (2c)$$

$$Q_{ck} = b_{km} V_k^2 \tan^2 + b_{km} V_k V_m \tan \sin_{km} \quad (3c)$$

$$P_{cm} = -b_{km} V_k V_m \tan \cos_{km} \quad (4c)$$

$$Q_{cm} = b_{km} V_k V_m \tan \sin_{km} \quad (5c)$$

5. MODELI TOKOVA SNAGA

5. 1. Konvencionalni model tokova snaga

Jednačine balansa snaga, odnosno konvencionalni model tokova snaga ima sledeći poznati oblik (napisan za teorijski najopštiji slučaj prisustva proizvodnje i potrošnje u svakom čvoru EES-a) :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li}(V_i) - P_i = 0 \quad (9)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}(V_i) - Q_i = 0 \quad i \in N \quad (10)$$

5. 2. Model tokova snaga za stanje nakon primarne regulacije napona i učestanosti

Za kvazistacionarna stanja, uspostavljena nakon poremećaja i dejstva primarne regulacije napona i učestanosti, važe sledeće jednačine balansa [9]:

$$P_i - P_{GOi} - k_{pi} f - P_i = 0, i \in NG \quad (11)$$

$$Q_i - Q_{GOi} - Q_{GOi} \frac{V_{GOi} - V_{Gi}}{s_{Vi} V_{GOi}} - Q_i = 0, i \in NSV \quad (12)$$

$$P_i - P_{Li}(V_i, f) - P_i = 0, i \in NL \quad (13)$$

$$Q_i - Q_{Li}(V_i, f) - Q_i = 0, i \in NL \quad (14)$$

5. 3. Model tokova snaga u uslovima kratkotrajne dinamike

U uslovima kratkotrajnih dinamičkih procesa EES-a, u kojima dominira individualna dinamika sinhronih mašina, uz intenzivno odvijanje prelaznih procesa u njihovim regulacionim sistemima, a naročito u sistemu regulacije pobude, u svakom trenutku važe sledeće jednačine električnog balansa (napisane za najopštiji slučaj prisustva proizvodnje i potrošnje u svim čvorovima EES-a) [10]:

$$P_i - P_{Gi} - P_{Li}(f_i, V_i) - P_i = 0 \quad (15)$$

$$Q_i - Q_{Gi} - Q_{Li}(f_i, V_i) - Q_i = 0 \quad i \in N \quad (16)$$

Aktivne i reaktivne snage na krajevima generatora (P_{Gi} , Q_{Gi}), saglasno vrsti dinamike koja se analizira, respektujući prelazna stanja u „d” i „q” osama njihovih rotora, izražavaju se na sledeći način:

$$P_{Gi} = \frac{E_{qi}' V_{di}}{x_{di}} - \frac{E_{di}' V_{qi}}{x_{qi}} - \frac{x_{qi}' - x_{di}'}{x_{di}' \cdot x_{qi}'} V_{di} V_{qi} \quad (17)$$

$$Q_{Gi} = \frac{E_{qi}' V_{qi}}{x_{di}} + \frac{E_{di}' V_{di}}{x_{qi}} - \frac{V_{qi}^2}{x_{di}} - \frac{V_{di}^2}{x_{qi}} \quad (18)$$

gde je:

$$V_{di} = V_i \sin(\delta_i - \delta_i) \quad (19)$$

$$V_{qi} = V_i \cos(\delta_i - \delta_i) \quad (20)$$

5. 4. Model tokova snaga u uslovima dugotrajne dinamike

Jednačine električnog balansa, za uslov sinfažnog kretanja rotora sinhronih mašina, imaju oblik [11]:

$$R_i - R_{mi} - R_i = 0 \quad i \in NG; i \in r \quad (21)$$

$$P_i - P_{Li}(f, V) - P_i = 0 \quad i \in NL \quad (22)$$

$$Q - Q_{Li}(f, V) - Q = 0 \quad i \in NL \quad (23)$$

gde je:

$$R_{mi} \quad F_r P_{mi} \quad F_i P_{mr} \quad (24)$$

$$R_i \quad F_r P_i \quad F_i P_r \quad (25)$$

$$F_i = M_i / M_s \quad (24a)$$

$$M_s \quad M_i \quad (25a)$$

Preko jednakosti (21) (r-oznaka za referentni generator), saglasno relacijama (24) i (25), inkorporiran je uslov sinfaznosti kretanja rotora sinhronih mašina, kada sve one participiraju u ukupnoj akceleraciji EES-a, srazmerno svojim konstantama inercije.

6. MODELI TOKOVA SNAGA SA GENERALIZOVANIM INJEKCIJONIM MODELOM TRANSFORMATORA

6. 1. Konvencionalni tokovi snaga

U slučaju kada se transformatori (bilo kog tipa) predstavljaju posredstvom prethodno izloženog generalizovanog modela injektiranih snaga (relacije (2)-(5)), a određuju se konvencionalni tokovi snaga, tada se u okviru jednačina balansa oblika (9) i (10), za krajnja čvorišta na koja su priključeni ovako modelovani transformatori, pojavljuju sledeće nove jednačine :

$$P_i^C = P_{Gi} + P_{Ci} - P_{Li}(V_i) - P_i = 0 \quad i \quad NC \quad (26)$$

$$Q_i^C = Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li}(V_i) - Q_i = 0 \quad i \quad NC \quad (27)$$

koje se odnose na čvorišta (NC) na koja su priključeni ovi transformatori.

6. 2. Tokovi snaga u uslovima kratkotrajnih dinamičkih procesa

U slučaju kratkotrajnih dinamičkih procesa i prisustva generalizovanog injekcionog modela transformatora, u okviru datih jednačina balansa oblika (15) i (16), javljaju se sledeće nove jednačine, koje se odnose na krajnja čvorišta na kojima su priključeni ovi transformatori :

$$P_i^C \quad P_{Gi} \quad P_{Ci} \quad P_{Li}(f_i, V_i) \quad P_i \quad 0 \quad (28)$$

$$Q_i^C \quad Q_{Gi} \quad Q_{Ci} \quad Q_{Li}(f_i, V_i) \quad Q_i \quad 0 \quad i \quad NC \quad (29)$$

6. 3. Tokovi snaga u kvazidinamičkim stanjima i u uslovima dugotrajnih dinamičkih procesa

Takođe, u stanjima nakon primarne regulacije napona i učestanosti, kao i u uslovima dugotrajnih dinamičkih procesa i prisustva generalizovanog injekcionog modela transformatora, u okviru jednačina balansa oblika (13) i (14), odnosno (22) i (23), javljaju se sledeće nove jednačine :

$$P_i^C \quad P_{Ci} \quad P_{Li}(f_i, V_i) \quad P_i \quad 0 \quad (30)$$

$$Q_i^C \quad Q_{Ci} \quad Q_{Li}(f_i, V_i) \quad Q_i \quad 0 \quad i \quad NC \quad (31)$$

7. TEHNIKE REŠAVANJA MODELA TOKOVA SNAGA SA INJEKCIJONIM MODELIMA TRANSFORMATORA

7. 1. Uvodne napomene

Sasvim je sigurno da se problem proračuna tokova snaga EES-a, u kojima su transformatori modelovani preko odgovarajućih modela injektiranih snaga, može uspešno da rešava primenom metode Newton-Raphsona [12], imajući u vidu njene pouzdane karakteristike kvadratne konvergencije, o čemu najbolje govore rezultati izloženi u radu [6].

Međutim, posebni izazov u pogledu traganja za jednostavnijim, ali i dalje efikasnim tehnikama rešavanja, pružao je sam način modelovanja transformatora, pri kome elementi matrice admitansi čvorova EES-a ostaju nepromenjeni, uz očuvanje njene početne simetrije.

U radovima [7, 8], koji su se bavili injekcionim modelima tzv. serijskih FACTS kontrolera (dakle, u pitanju je bio poseban slučaj injekcionog modela transformatora - relacije (2b)-(5b)), izloženi su razvoji brzih postupaka sa razdvajanjem varijabli tokom iterativne procedure, koji su se odnosili na određivanje tokova snaga u uslovima statičkih stanja [7] i uslovima kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa u EES [8].

Razvoj tehnika rešavanja modela tokova snaga u pomenutim stanjima pošao je od oblika rešenja koji daje primena metode Newton-Raphsona [12] na odgovarajuće jednačine balansa.

U ovom radu, dalje će se operisati sa izvedenim generalizovanim modelom transformatora (relacije (2)-(5)), da bi se pokazalo da se i u slučaju ove generalne forme dolazi do jednostavnih metoda određivanja tokova snaga u relevantnim statičkim, kvazidinamičkim i dinamičkim stanjima elektroenergetskih interkonekcija.

7. 2. Konvencionalni tokovi snaga

Dakle, polazeći od oblika rešavanja koji daje primena metode Newton-Rhpsona na sisteme jednačina balansa (26) i (27), najpre se zanemaruje, tokom pojedine iteracije, uticaj promene napona na aktivne snage, kao i uticaj promene ugla na reaktivne snage (odgovarajuće submatrice u matrici Jakobijana postaju nula matrice, odnosno izvršeno je rasprezanje varijabli tokom pojedine iteracije).

Dalje, uvodeći ona ista uprošćenja i pretpostavke kao kod formulacije brzog raspregnutog postupka [13, 14], uz dosledno dalje uvažavanje prisustva generalizovanog injeccionog modela transformatora, dobijaju se sledeća dva sistema raspregnutih jednačina :

$$P^C / V = B'_C \quad (32)$$

$$Q^C / V = B''_C \quad V \quad (33)$$

Shodno sprovedenom postupku formiranja ovih sistema jednačina, odnosno respektujući prisustvo transformatora čiji efekti su obuhvaćeni preko modela injektiranih snaga (2)-(5), matrice koeficijenata B'_C i B''_C i razlikovale bi se u odnosu na matrice B' i B'' koje su prisutne u autentičnom postupku Stott-Alsaca (smisao uvedenog indeksa „c”), u onim dijagonalnim i vandijagonalnim elementima, koji odgovaraju čvorovima na kojima su priključeni ovako modelovani transformatori.

U slučaju transformatora priključenog na čvorove „k” i „m”, odnosno serijskog kontrolera, ugrađenog u grani „k-m”, odgovarajući dijagonalni elementi matrica B'_C i B''_C imali bi oblik :

$$b'_{ckk} = b'_{kk} + g_{km} [(tc \ 1) \sin_{km} \ ts \cos_{km}] \quad (34)$$

$$b'_{cmm} = b'_{mm} - g_{km} [(tc \ 1) \sin_{km} \ ts \cos_{km}] \quad (35)$$

$$b''_{ckk} = b''_{kk} - g_{km} [(tc \ 1) \sin_{km} \ ts \cos_{km}] \quad (36)$$

$$b''_{cmm} = b''_{mm} + g_{km} [(tc \ 1) \sin_{km} \ ts \cos_{km}] - \quad (37)$$

odnosno, došlo bi do odgovarajućeg proširenja dijagonalnih elemenata b'_{kk} , b'_{mm} , b''_{kk} i b''_{mm} , prisutnih u originalnoj verziji postupka [13].

Na taj način, saglasno datim izrazima (34) - (37), operisalo bi se sistemima raspregnutih jednačina (32) i (33), kod kojih, striktno gledano, svi elementi matrica koeficijenata ne bi imali konstantne

vrednosti, jer odgovarajući dijagonalni elementi su funkcija ugla regulacije transformatora (tamo, gde ga ima), kao i razlike uglova fazora napona u čvorovima priključka transformatora, odnosno na krajevima grana, u kojima su ugrađeni serijski FACTS kontroleri tokova snaga.

Međutim, analizirajući navedene izraze (34) - (37), uočavaju se mogućnosti za uvođenjem daljih uprošćenja, imajući u vidu najpre realne opsege ugla regulacije koji se sreću u praksi ($-15^\circ \text{el} < \mathbf{f} < 15^\circ \text{el}$).

Takođe, u prilog daljim uprošćenjima kod formiranja matrica koeficijenata govori uobičajeni odnos konduktansi i susceptansi u realnim visokonaponskim mrežama. Najzad, dalja moguća uprošćenja nalaze uporište u uobičajenim vrednostima razlike uglova fazora napona ($|\mathbf{q}_{km}| < 15^\circ \text{el}$).

Dakle, prethodno rečeno govori o dominantnoj ulozi elemenata b'_{kk} , b'_{mm} , b''_{kk} i b''_{mm} , što su i analize u nizu konkretnih primera potvrdile, odnosno o mogućnosti opravdanog zanemarenja ostalih članova u relacijama (34) - (37). (12)

Takav isti zaključak važi i za odgovarajuće van dijagonalne elemente, odnosno i tu je dominantna uloga elemenata koji su prisutni u postupku [13].

Saglasno tome, efekti energetskih transformatora, odnosno serijskih FACTS kontrolera tokova snaga, modelovanih preko injeccionog modela, određuju se sukcesivnim iterativnim rešavanjem sledeća dva raspregnuta sistema jednačina :

$$P^C / V = B' \quad (38)$$

$$Q^C / V = B'' \quad V \quad (39)$$

u kojima simetrične matrice koeficijenata B' i B'' imaju konstantne elemente, identične onima koji figurišu u autentičnom brzom raspregnutom postupku Stott-Alsaca [13].

Jedina razlika u odnosu na pomenuti postupak je u elementima vektora debalansa (mismatch) DP^C i DQ^C , koji se odnose na krajnja čvorišta transformatora, odnosno kontrolera, predstavljenih preko injeccionog modela, za koga važe relacije (2), (3), (4) i (5).

Time je postignuto da se efekti transformatora sa i bez regulacije ugla (ma kog tipa oni bili), kvantifikuju na veoma jednostavan način.

Ta jednostavnost, saglasno raspregnutim (tokom pojedine iteracije) jednačinama (38) i (39), neposredno proizilazi iz činjenice da se za datu topologiju EES-a i niz mogućih lokacija ovih kontrolera kao i niz njihovih mogućih podešenja, simetrične matrice koeficijenata B' i B'' formiraju samo jedanput (kao što se i njihova trouglasta faktorizacija takođe vrši samo jednom). Uz ovu jednostavnost i evi-

gulacijom ugla na svim interkonektivnim dalekovodima 400 kV razmatrane interkonekcije. Oni su modelovani preko prethodno datog injekcionog modela, a pretpostavljene su sledeće vrednosti ugla regulacije f : Sofija (BG)-Niš (YU) ($f=10^\circ$ el), Đerdap (YU)-Portile de Fier (RO)($f=10^\circ$ el), Dubrovo (MA)-Solun (GR)($f=10^\circ$ el), Elbasan (AL)-Kardija (GR)($f=10^\circ$ el), Kozloduj (BG)-Tintareni (RO) ($f=10^\circ$ el) i Solun (GR)-Blagojevggrad (BG) $f=10^\circ$ el). Naravno, i same vrednosti ugla f su hipotetičke, ali dovoljno indikativne za utvrđivanje karakteristika

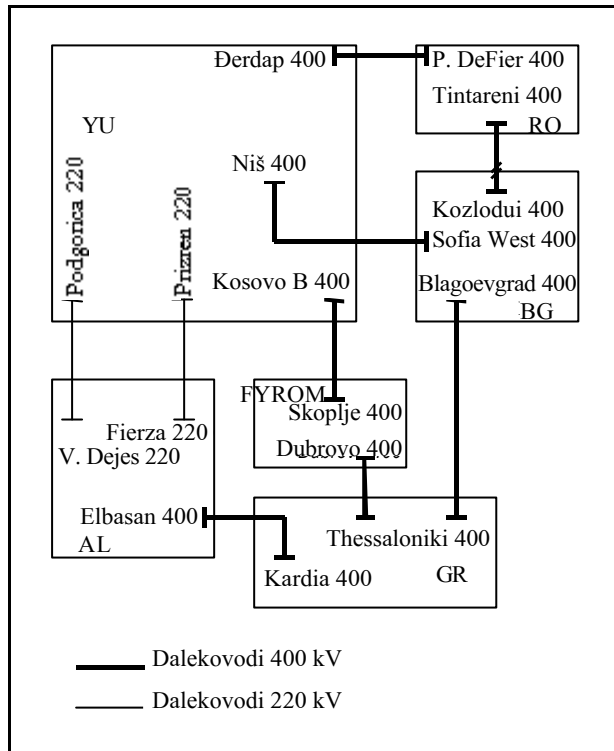
konvergencije razvijene metode. Svi proračuni su rađeni primenom računarskog programa PRIM-CONT, čiji su relevantni metodološki i praktični aspekti izloženi u radu [17].

Tok iterativne procedure se pratio preko maksimalnih apsolutnih vrednosti koordinata vektora DP^c i DQ^c (za različite trenutke od nastanka debalansa (u momentu debalansa, 1s i 10 s nakon toga), uz napomenu da se početna procena traženih varijabli obavljala preko njihovih vrednosti iz prethodnog vremenskog intervala.

Tabela 1.

Tok iterativne procedure određivanja tokova snaga u uslovima kratkotrajnih dinamičkih procesa

Broj iteracije	$\max \Delta P^c $ (MW)			$\max \Delta Q^c $ (Mvar)		
	t=0,0 s	t=1,0 s	t=10,0 s	t=0,0 s	t=1,0 s	t=10,0 s
a) Ispad jednog agregata u TE Nikola Tesla B (YU), opterećenog sa 600 MW						
0	599,200	340,100	128,600	213,400	82,600	34,900
1	37,300	3,800	0,575	25,600	0,260	0,266
2	4,600	0,500	0,088	3,400	0,162	0,060
3	0,938	0,035	-	1,100	0,036	-
4	0,213	-	-	0,283	-	-
5	0,050	-	-	0,087	-	-
b) Ispad jednog agregata u NE Kozlodui (BG), opterećenog sa 870 MW						
0	886,900	321,700	168,500	314,100	89,500	33,600
1	32,300	3,500	0,895	31,900	1,700	3,100
2	0,930	0,356	0,102	1,500	0,094	0,140
3	0,338	0,031	0,086	0,667	0,069	0,116
4	0,047	-	0,209	0,173	-	0,031
5	0,016	-	0,084	0,075	-	0,050
c) Ispad agregata u NE Črna Voda (RO), opterećenog sa 732 MW						
0	732,500	268,900	155,600	84,600	63,300	36,200
1	22,600	2,600	0,822	58,900	0,286	0,289
2	4,800	0,317	0,088	14,200	0,299	0,144
3	1,400	0,023	0,059	5,100	0,034	0,031
4	0,464	-	-	1,600	-	-
5	0,147	-	-	0,438	-	-
6	0,048	-	-	0,200	-	-
7	0,018	-	-	0,117	-	-
8	0,009	-	-	0,071	-	-



Slika 3. Blok dijagram elektroenergetske interkonekcije na prostorima Balkana

8. 2. Energetski transformatori sa i bez regulacije ugla

Na istom praktičnom primeru realne interkonekcije [15], bila je izvršena evaluacija metoda određivanja tokova snaga, koje komuniciraju sa injeccionim modelom energetskih transformatora sa nenominalnim (realnim) prenosnim odnosima i energetskih transformatora sa regulacijom ugla (sva tri tipa koja su prisutna u računarskom programu CLF-OPF). Predmet pažnje bili su tokovi snaga u relevantnim statičkim, kvazidinamičkim i dinamičkim stanjima.

U ovom radu, u prvom planu će biti elaboracija kvazidinamičkih (odnosno, postdinamičkih kvazistacionarnih) tokova snaga, jer se u prilazu Instituta „Nikola Tesla”, (uz „samopokretanje” [16]), na njima baziraju analize sigurnosti kod automatizovanog utvrđivanja graničnih prenosnih mogućnosti elektroenergetskih interkonekcija.

U tom cilju poslužiće tabela 2. U njoj se daje tok iterativne procedure rešavanja raspregnutih jednačina (40) i (41), praćen preko maksimalnih apsolutnih vrednosti koordinata vektora DP^c i DQ^c .

To je prikazano najpre za a) polazno ustaljeno stanje razmatrane interkonekcije, dobijeno „samostartovanjem”, na način detaljno elaboriran u radu [16]. Upotrebljen je tzv. „flat” start (svi uglovi

imali su nulte vrednosti, a naponi, nominalne), a NE Kozlodui (BG) uzeta je kao balansna elektrana.

Zatim, tok iterativne procedure daje se za realizovani program razmene u iznosu od 500 MW između BG (izvozi) i YU (uvozi) i za slučajeve ispada navedene pod b)-ispad jednog agregata u TE Nikola Tesla B (YU), angažovanog sa 600 MW i 245 Mvar i pod c)-ispad interkonektivnog dalekovoda Sofija (BG)-Niš (YU), opterećenog sa 306 MW i 32 Mvar.

U datoj tabeli, oznaka A se odnosi na slučaj kada su svi prisutni transformatori (blok transformatori i mrežni transformatori-ukupno 98) imali realni prenosni odnos (nominalni i nenominalni), a modelovani su bili preko odgovarajuće zamenske šeme (uobičajeni „admitantni” prilaz).

Oznaka B odnosi se na slučaj kada su svi ovi transformatori (dakle, njih ukupno 98) predstavljene preko odgovarajućeg injeccionog modela.

Na kraju, oznaka C odnosi se na slučaj koji se razlikuje od slučaja B samo u uvažavanju realne činjenice prisustva četiri energetska transformatora sa regulacijom ugla u rumunskom EES (RBRAD, RBUCS, RSLAT i RSIBI). Svi su oni interkonektivni transformatori sa prenosnim odnosom 400/220 kV/kV, a odgovaraju tipu 4 iz CLF-OPF-a.

Analizirajući pokazatelje iz tabele 2, dolazi se do evidentnog zaključka o veoma dobrim karakteristikama konvergencije razvijenih metoda određivanja tokova snaga, koje komuniciraju sa injeccionim modelom energetskih transformatora sa nenominalnim (realnim) prenosnim odnosima i energetskih transformatora sa regulacijom ugla.

Dakle, dosadašnja praktična iskustva govore o velikoj upotrebnosti vrednosti generalizovanog injeccionog modela transformatora, bilo oni imali realne (ne nominalne) ili kompleksne prenosne odnose.

9. ZAKLJUČCI

Generalna forma injeccionog modela transformatora, izvedena u ovom radu, omogućuje jednostavno predstavljanje svih postojećih vrsta energetskih transformatora (sa i bez regulacije ugla) i statičkih transformatora sa regulacijom ugla (tzv. serijski FACTS kontroleri tokova snaga).

Takav način modelovanja, koji ne ugrožava simetričnost matrice admitansi EES-a, omogućio je da se tokovi snaga u karakterističnim statičkim, postdinamičkim kvazistacionarnim i dinamičkim stanjima određuju posredstvom odgovarajućih brzih raspregnutih postupaka, u kojima matrice koeficijenta imaju konstantne elemente za nepromenjenu topologiju.

Tabela 2.

Tok iterativne procedure određivanja tokova snaga u postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima

Broj iteracije	$\max \Delta P^c $ (MW)			$\max \Delta Q^c $ (Mvar)		
	A	B	C	A	B	C
a) Polazno ustaljeno stanje - „samopokretanje” proračuna graničnih prenosnih mogućnosti						
0	1 433,000	1 433,000	1 433,000	1 628,300	1 628,300	1 628,300
1	91,500	75,700	75,300	60,400	22,100	32,300
2	11,800	17,300	17,300	3,400	1,800	1,700
3	2,800	8,200	8,300	0,424	0,297	0,292
4	0,867	0,537	0,664	0,142	0,058	0,058
5	0,275	0,401	0,432	0,057	0,042	0,030
6	0,105	0,102	0,124	0,025	0,035	0,028
7	0,052	0,040	0,049	0,007	0,005	0,002
b) Ispad jednog agregata u TE Nikola Tesla B (YU), opterećenog sa 600 MW i 245 Mvar						
0	599,300	599,300	599,300	209,800	209,800	210,300
1	43,500	43,500	43,500	3,800	1,900	1,900
2	4,100	3,500	3,200	0,121	0,125	0,127
3	1,700	1,400	1,200	0,051	0,035	0,033
4	0,675	0,521	0,446	0,031	0,031	0,031
5	0,258	0,190	0,156	0,015	0,029	0,026
6	0,098	0,067	0,054	0,003	0,006	0,007
c) Ispad interkonektivnog dalekovoda Sofija (BG)-Niš (YU), opterećenog sa 306 MW i 32 Mvar						
0	123,400	123,400	123,400	99,200	99,200	99,000
1	17,700	17,400	17,300	3,000	2,300	2,300
2	0,962	1,100	1,100	0,273	0,282	0,282
3	0,090	0,127	0,128	0,028	0,063	0,039
4	-	0,021	0,019	-	0,032	0,018

Ti postupci poseduju visoku numeričku efikasnost i fleksibilnost, odnosno veoma dobre karakteristike konvergencije, što je utvrđeno na primeru određivanja niza karakterističnih stanja u okviru druge UCTE sinhronne zone.

Uz prethodno apostrofirano, trebalo bi da se takođe posebno istaknu praktični aspekti, s obzirom na to da primenjeni način modelovanja nekonvencionalnih transformatora pruža realnu mogućnost uspešnog korišćenja postojećih softvera za proračun tokova snaga u nizu karakterističnih stanja EES-a. Potrebne su samo minimalne dopune kod formiranja vektora debalansa snaga tokom iterativnih procedura, saglasno usvojenom načinu modelovanja tran-

sformatora preko odgovarajućih snaga injektiranja u tačkama njihovog priključka.

10. LITERATURA

- [1] D. P. Popović, S. Mijailović, T. Papazoglou, MOGUĆA POBOLJŠANJA PERFORMANSI RADA ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA PRIMENOM NEKIH OD ELEMENATA FACTS TEHNOLOGIJE, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 1995, str. 16-22.
- [2] T. Papazoglou, D. P. Popović, S. Mijailović, ANALYSIS OF THE EFFECTS OF APPLICATION OF PST AND CSC ON THE PERFORMANCE OF

- THE UCPTTE SYSTEM IN THE BALKANS, STOCKHOLM POWER TECH CONFERENCE, STOCKHOLM, June 18-22, 1995, paper SPT PS 16-02-0520, pp. 490-493.
- [3] C. Dechamps, R. Nuytten, J. Vankelecom, CONSTRAINED LOW FLOW - OPTIMUM POWER FLOW, CLF-OPF: USER GUIDE, SYSTEMS-EUROPE S. A. PUBLICATION BRUXELLES, 1997.
- [4] B. Stott and E. Hobson, POWER SYSTEM SECURITY CONTROL CALCULATIONS USING LINEAR PROGRAMMING, Parts I and II, IEEE Trans. PAS. , Vol. PAS-97, No 5, September/October 1978, pp. 1713-1731.
- [5] Z. X. Han, PHASE SHIFTER AND POWER FLOW CONTROL, IEEE Trans. on PAS. Vol. PAS-101, October 1982, pp. 3790-3795
- [6] M. Noroozian, G. Andersson, POWER FLOW CONTROL BY USE OF CONTROLLABLE SERIES COMPONENTS, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No 3, July 1993, pp. 1420-1429.
- [7] D. P. Popović, JEDNA METODA PRORAČUNA TOKOVA SNAGA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA SA SERIJSKIM FACTS KONTROLERIMA, časopis „Elektroprivreda”, br. 1, 1998, str. 11-22.
- [8] D. P. Popović, METODE ODREĐIVANJA TOKOVA SNAGA U EES SA SERIJSKIM FACTS KONTROLERIMA, U USLOVIMA KARAKTERISTIČNIH DINAMIČKIH PROCESA, časopis „Elektroprivreda”, br. 3, 1998, str. 7-13
- [9] D. P. Popović, AN EFFICIENT METHODOLOGY FOR STEADY-STATE SECURITY ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 10, No. 2, April 1988, pp. 110-116.
- [10] D. P. Popović and M. Stefanović, A FAST NETWORK SOLUTION BY THE DECOUPLED PROCEDURE DURING SHORT-TERM DYNAMIC PROCESSES IN POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 12, No. 1, January 1990, pp. 25-30.
- [11] D. P. Popović, AN EFFICIENT DECOUPLED PROCEDURE FOR SOLVING THE LOAD-FLOW PROBLEMS DURING LONG-TERM DYNAMICS, Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 9, No. 3, July 1987, pp. 173-179.
- [12] W. F. Tinney and C. E. Hart, POWER FLOW SOLUTION BY NEWTON'S METHOD, IEEE Trans. PAS. Vol. PAS-86, No 11, November 1967, pp. 1449-1467.
- [13] B. Stott and O. Alsac, FAST DECOUPLED LOAD FLOW, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-93, No. 3, May/June 1974, pp. 859-869.
- [14] R. A. M. van Amerongen, A GENERAL-PURPOSE VERSION OF THE FAST DECOUPLED LOAD-FLOW, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989, pp. 760-770.
- [15] TECHNICAL FEASIBILITY STUDY OF INTERCONNECTION OF THE ELECTRIC POWER SYSTEMS OF BULGARIA AND ROMANIA WITH THE POWER SYSTEMS OF GREECE, POWER SYSTEMS UNDER EKC COORDINATION AND ALBANIA FOR PARALLEL AND SYNCHRONOUS OPERATION IN COMPLIANCE WITH UCPTTE REGULATIONS AND STANDARDS, PART IV: DYNAMIC CALCULATIONS FOR THE YEAR 1995, Nikola Tesla Institute, Belgrade, July, 1995.
- [16] D. P. Popović, ODREĐIVANJE TOKOVA SNAGA U POLAZNIM USTALJENIM STANJIMA U ANALIZAMA SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, časopis „Elektroprivreda”, br. 2, 2000, str. 13-26.
- [17] D. Popović and S. Mijailović, AN EFFICIENT METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF PRIMARY FREQUENCY CONTROL OF ELECTRIC POWER SYSTEM Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, 22(2000), pp 331-341

Rad je primljen u uredništvo 13. 01. 2003. godine



Prof. dr Dragan P. Popović rođen je 1943. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1965. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1981. godine na smeru Elektroenergetski sistemi, a doktorsku tezu odbranio maja 1984. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Po diplomiranju, zaposlio se u Elektrotehničkom Institutu „Nikola Tesla”, gde se sada nalazi na radnom mestu višeg savetnika u centru „Elektroenergetski sistemi”. Godine 1993. izabran je za vanrednog profesora Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu sa nepunim radnim vremenom, za oblast Elektroenergetski sistemi, a 1997. godine dobio je najviše naučno-istraživačko zvanje naučni savetnik.

D. Popović je kao autor (pretežno) ili koautor do sada objavio ukupno - 136 naučnih i stručnih radova, od kojih je 13 objavljeno u stranim časopisima, 53 u domaćim časopisima, 19 na međunarodnim konferencijama i 53 na domaćim konferencijama i savetovanjima. Takođe je razvio veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih aspekata rada elektroenergetskih interkonekcija.

Duško Bekut,
Izabela Berić i Aleksandar Parmaković

Prekostrujne zaštite u slaboupetljanim distributivnim mrežama

Originalni naučni rad
UDK: 621.316; 621.311.1

Rezime:

U radu je detaljno obrađen problem rada prekostrujnih zaštita u slaboupetljanim distributivnim mrežama. Prikazan je izbor strujnog i vremenskog podešenja/koordinacije prekostrujnih releja u slaboupetljanim srednjenaponskim distributivnim mrežama. Za izbor vrednosti struje pri kojoj se izvodi koordinacija, razmatrana su dva postupka: prema vrednosti struje na mestu ugradnje releja i prema vrednosti podešenja trenutnog člana zaštite. Za koordinaciju/vremensko podešenje releja prikazane su dve metode: direktna i tzv. „contact travel”. Za svako od pomenutih razmatranja date su napomene vezane za mogućnost primene, kao i prednosti i nedostaci koji se pri tome mogu očekivati. Problem kaskadnog delovanja prekostrujnih zaštita, za čije rešenje je predložen jedan novi jednostavan postupak za proračun struje releja pri kaskadnom delovanju nakon delovanja prvog od dva releja, predstavlja glavni predmet obrade ovog rada. Na kraju, razmatranja su ilustrovana primerom u kojem je kao podloga korišćena realna mreža.

Ključne reči: prekostrujna zaštita, slaboupetljana distributivna mreža

Abstract:

OVERCURRENT PROTECTIONS IN WEAKLY MESHED DISTRIBUTION NETWORKS

This paper deals with operation of overcurrent protection in weakly meshed distribution networks. Current and time setting/coordination of overcurrent relays are considered in weakly meshed medium voltage networks. Two procedures are analyzed for selection of the coordination current value: one based on the value of current on relay location, and another based on value of instantaneous relay setting. Two methods are applied for time setting/coordination: direct and contact travel. Remarks about possibility of application, as well as expected advantages and shortcomings, are given for each method. Also, main attention has been paid to cascade operation of overcurrent relays. A new simple procedure for calculation of relay current after tripping of one relay in cascade operation is suggested. Finally, all considerations are supported by an example where data from a real network are used.

Key words: Overcurrent protection, weakly meshed distribution network

1. UVOD

Distributivne mreže uobičajeno funkcionišu kao mreže sa radijalnom strukturom, dok se relativno ret-

ko nailazi na petlje koje postoje u trajnom pogonu¹⁾. Kao jedan od glavnih motiva za formiranje petlji u distributivnoj mreži je povećanje pouzdanosti napajanja posebnih kategorija potrošača. Kada se u radijal-

V. prof. dr Duško Bekut – Fakultet tehničkih nauka, 21 000 Novi Sad, Fruškogorska 11
Izabela Berić, dipl. ing. Aleksandar Parmaković, dipl. ing. – DMS Grupa, 21 000 Novi Sad

nim delovima mreže dogodi kvar na deonici²⁾, tada jedan deo potrošača ostaje kraći ili duži period bez napajanja do identifikacije mesta kvara i isključenja te deonice iz pogona. Ako je zbog prirode potrošača takav prekid nedopustiv, onda se primenjuje napajanje u petlji u kome se takvi potrošači napajaju dvostrano u trajnom pogonu. Da bi se obezbedila maksimalna selektivnost pri eliminaciji kvarova, neophodno je da se sve deonice koje čine petlju opreme sa oba kraja sa relejima i prekidačima [1,2,3]. U slučaju nastanka kvara na deonici koja je u petlji, zaštitama sa oba kraja će se delovati na prekidače i deonica će biti isključena, pri čemu će svi čvorovi u petlji (srednjenaponske sabirnice) ostati pod naponom. To je najveća prednost koja se obezbeđuje uvođenjem petlji.

Petlje mogu biti proste ako nemaju zajedničkih deonica sa drugim petljama ili složene ako ih imaju. Pri formiranju uklopnog stanja distributivne mreže, treba izbegavati formiranje složenih petlji, jer se pri takvom pogonu ne može u opštem slučaju obezbediti selektivnost zaštite. Već kod formiranja proste petlje, struja na mestu kvara u dubljim delovima petlje se obično značajno ne povećava, ali se struja kvara sada deli između krajeva petlji, pa su struje po deonicama manje, što dovodi do manje osetljivosti zaštita i u krajnjem slučaju i do gubitka selektivnosti. Očigledno je da je postojanje petlji povezano sa zahtevima za većim investicijama u zaštitu i prekidačku opremu - pa je takav pogon skuplji, pri čemu je teže obezbediti osetljivost i selektivnost. Zato se ovakav pogon primenjuje samo tamo gde su zahtevi za povećanjem pouzdanosti i besprekidnim napajanjem izričiti.

Sa ustanovljavanjem „open marketa” za prodaju električne energije može se kroz kategorisanje potrošača i odgovarajuću cenu električne energije koja se isporučuje sa takvim karakteristikama (sa manjim brojem i trajanjem prekida napajanja), učiniti da i pogon sa petljama bude ekonomski isplativ i moguć za realnu primenu.

U realnim distributivnim mrežama nema mnogo petlji zbog svih prethodno navedenih razloga, pa se zato govori o slaboupetljanim mrežama. U budućnosti, u načelu treba očekivati blago povećanje broja petlji u distributivnim mrežama. Kao važan motiv za razmatranje i uvažavanje rada zaštita u slaboupetljanim mrežama je i zahtev koji se sreće u svim svetskim tenderima za oblast distributivnog menadžment sistema u kojima se zahteva da se funkcija relejne zaštite može koristiti i u radijalnim i u slaboupetljanim mrežama.

¹⁾ Kratkotrajno formiranje petlji je relativno uobičajen postupak kod tzv. besprekidnog prebacivanja napajanja sa jedne na drugu napojnu transformatorsku stanicu ili izvod.

²⁾ U distributivnim mrežama se sa mnogo većim intenzitetom događaju kvarovi na deonicama nego na sabirnicama.

Problematika rada prekostrujnih zaštita u slaboupetljanim mrežama predstavlja glavni predmet obrade ovog rada. Cilj rada je da se ukaže na složenost problema rada zaštita u slaboupetljanim mrežama, kao i da se ponude odgovori i rešenja za neke od identifikovanih problema.

Postupak za podešenje i koordinaciju releja u radijalnim mrežama primenjuje se od krajeva mreže ka izvoru napajanja (napojnoj transformatorskoj stanici) sa minimalnom vremenskom selektivnošću između dva sukcesivna para releja (par osnovni - rezervni relej). Na taj način se dobija optimalno podešenje releja. Postojanje čak i relativno malog broja petlji ovaj zadatak čini neuporedivo složenijim i vrlo teško izvodljivim u većim mrežama, ukoliko se ne primenjuju metode zasnovane na primeni računara [1,4]. Za rešavanje ovog problema, u radu su izložene dve metode za izbor podešenja releja u slaboupetljanim mrežama: direktna metoda i metoda *contact travel* [2]. U drugom delu rada je ukratko izložen postupak za podešavanje releja primenom direktne metode, gde se za koordinaciju prekostrujnih releja sa kontinualnim podešenjem primenjuje algoritam zasnovan na simplex metodi u dve faze, dok se za koordinaciju prekostrujnih releja sa diskretnim podešenjem primenjuje algoritam zasnovan na „mixed integer” metodi. Poseban akcenat je stavljen na koordinaciju releja primenom metode *contact travel*. U trećem delu je obraden problem kaskadnog delovanja prekostrujnih zaštita na petljastim delovima mreže i predložena su unapređenja vezana za proračun režima nakon delovanja prvog od releja. Na kraju ovog dela je prikazan primer proračuna kaskadnog delovanja. Prethodna dva dela su ujedno delovi rada koji predstavljaju glavni predmet obrade ovog rada i u kojima su dati glavni doprinosi ovog rada. U završnim delovima dati su zaključak i literatura. Na kraju, u prilogu je dato razmatranje vezano za uticaj generatora na rad zaštite u radijalnim i petljastim delovima mreže.

2. IZBOR PODEŠENJA I KOORDINACIJA PREKOSTRUJNIH RELEJA U SLABOUPETLJANIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

U distributivnim mrežama, u okviru prekostrujne zaštite se koriste dve vrste releja: prekostrujni releji sa strujno nezavisnom i sa strujno zavisnom karakteristikom. Kako se u slaboupetljanim distributivnim mrežama ne bi mogla obezbediti selektivnost primenom običnih prekostrujnih releja, to se u ovim slučajevima koristi usmerena prekostrujna zaštita.

Podešenje releja ima dve komponente: strujnu i vremensku. Strujno podešenje je u najvećem broju

slučajeva određeno vrednošću struje u normalnim radnim režimima (najčešće su to maksimalna opterećenja elemenata na kojima se postavlja zaštita), dok se manji broj releja podešava na osnovu vrednosti struja kvara (ova vrednost se neuporedivo češće koristi za proveru osetljivosti datog releja).

Podešavanje i koordinacija releja sa strujno nezavisnom karakteristikom se izvodi na standardan način [2,3] i taj postupak je vrlo jednostavan, budući da vreme pobude releja ne zavisi od struje. Releji sa strujno zavisnom karakteristikom se gotovo ne primenjuju u našoj zemlji, ali s obzirom na značajne pogodnosti koje takvi releji nude (bolje iskorišćenje provodnika vodova, brža eliminacija kvarova kod većih struja, manje vremensko zatezanje pri delovanju – posebno kod releja koji su bliži napojnoj transformatorskoj stanici, kao i činjenica da ovaj tip karakteristike nude svi svetski proizvođači releja, može se očekivati da će vremenom rasti potreba za primenom i ovog tipa releja. U delu koji sledi posebno je obrađen problem podešenja i koordinacije releja sa strujno zavisnom karakteristikom.

2.1. Izbor podešenja i koordinacija prekostrujnih releja

U ovom delu se prvo razmatra strujno, a zatim i vremensko podešenje releja.

2.1.1. Strujno podešenje releja

Uvođenje više zaštita duž jednog radijalnog izvoda je uobičajeno u mrežama američkog tipa, dok se u mrežama evropskog tipa zaštita uglavnom postavlja samo na početku izvoda, a postavlja se dublje na izvodu samo u slučaju nedovoljne osetljivosti zaštite na početku izvoda. U petljastim delovima mreža je uobičajeno postavljanje zaštite na svakoj od deonica u okviru petlje.

Trenutni prekostrujni releji na deonicama između dve transformatorske stanice *SN/NN* se podešavaju na 125 % od struje trolnog kratkog spoja na suprotnom kraju deonice kada je petlja otvorena. Petlja se otvara na početnim deonicama kod korena petlje. Koren petlje je čvor iz koga se napaja petlja, dok su početne deonice one preko kojih je petlja povezana na koren petlje. Izuzetak od gornjeg pravila postoji kod podešavanja trenutnih releja na početnim deonicama koji su usmereni ka korenu petlje. Podešenje ovih releja se izvodi na 150 % od maksimalne struje opterećenja štićene deonice.

Prekostrujni releji na deonicama izvoda se podešavaju s obzirom na vrednost maksimalne struje opterećenja deonice. Kao maksimalna se uzima najveća od struja opterećenja deonice u tri različita re-

žima: kada je petlja zatvorena, kada je petlja otvorena s jedne, odnosno s druge strane kod korena petlje. Strujno podešenje prekostrujnog releja se izračunava prema sledećem izrazu:

$$I_{TAP} = k I_{max} (1/CTR), \quad (1)$$

gde je: *k* - koeficijent podešenja (tipično 1,2 do 1,5), *I_{max}* - maksimalna struja opterećenja deonice koja se štiti razmatranim relejom i

CTR - prenosni odnos strujnog mernog transformatora.

2.1.2. Koordinacija/vremensko podešenje

Osnovni kriterijum za vremensko podešenje kod prekostrujnih releja je da vremensko podešenje bude što je moguće manje uz obezbeđenje vremenske selektivnosti između parova osnovni - rezervni relej (dva sukcesivna na red vezana releja). Naime, vreme delovanja rezervnog releja treba da je za *Dt* veće od vremena delovanja osnovnog releja za dati kvar.

Kod vremenskog podešenja releja postavlja se dilema za koji tip kratkih spojeva (jednopolni, dvopolni, ...) treba izvoditi koordinaciju i da li to treba da budu kratki spojevi sa minimalnim ili maksimalnim vrednostima struje kvara. Kod koordinacije releja sa strujno nezavisnom karakteristikom ovo pitanje je irelevantno, budući da vreme pobuđivanja i delovanja releja ne zavisi od vrednosti struje. Kod releja sa strujno zavisnom karakteristikom, ova dva pitanja su tesno povezana, a pravilo je da se koordinacija izvodi pri maksimalnim vrednostima struje kvara (proračun struja definisan prema JUS IEC 909). Kod releja namenjenih zaštiti od međufaznih kratkih spojeva koristi se struja trolnog kratkog spoja, dok se za zemljospojne releje koristi struja jednopolnog kratkog spoja.

Kod releja sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom, vremensko podešenje se izvodi za „normalno³⁾“ uklopno stanje i sa tipovima kvara sa najvećim vrednostima struje kvara [2]. Ovakvim pristupom se obezbeđuje selektivnost rada releja i pri manjim vrednostima struja, jer se pri manjim vrednostima struja vreme delovanja između dva sukcesivna releja sa zavisnim vremenskim karakteristikama povećava. To se lako može videti sa slike 1, gde je za neku izabranu vrednost struje na apscisi potrebno očitati vrednosti ordinata krivih. Nije teško kon-

³⁾ Normalno uklopno stanje podrazumeva stanje u kojem će mreža uobičajeno funkcionisati. To znači da pri podešavanju zaštite ne treba birati neka neuobičajena stanja koja bi bila izvedena na stranu sigurnosti pošto se takva stanja po pravilu veoma retko pojavljuju u realnom pogonu, pa je svrsishodnije pri eventualnoj pojavi takvih stanja prepodesiti zaštite.

statovati da se sa smanjenjem vrednosti struja povećavaju razlike između vrednosti ordinata krivih.

Izuzetak od ovog pravila je slučaj kada bi osnovna zaštita bila izvedena isključivo relejom sa inverznom karakteristikom (dakle bez trenutnog releja) i kada bi rezervna zaštita bila izvedena sa vremenski nisko podešenim relejom sa fiksnim vremenom prorade, gde koordinaciju treba proveriti i za minimalne vrednosti struje kvara.

Neka je za ilustraciju problema koordinacije releja na slici 2 prikazan deo jednog izvoda sa dve deonice označene sa A i B pri čemu je deonica A bliža napojnoj transformatorskoj stanici. Zaštite deonice su postavljene na početku svake deonice i označene su brojevima 1 i 2. U okviru svake zaštite se nalazi trenutni i/ili prekostrujni relej. Postoji nekoliko mogućnosti za koordinaciju s obzirom na primenu ova dva tipa releja. Treba imati u vidu da se koordinacija izvodi samo između prekostrujnih releja koji imaju funkciju osnovne i rezervne zaštite, a nikada između trenutnih ali i da prisustvo trenutnih releja može biti iskorišćeno za ubrzanje rada i unapređenje koordinacije prekostrujnih releja.

Postoje sledeća dva slučaja za koordinaciju prekostrujnih releja [2]:

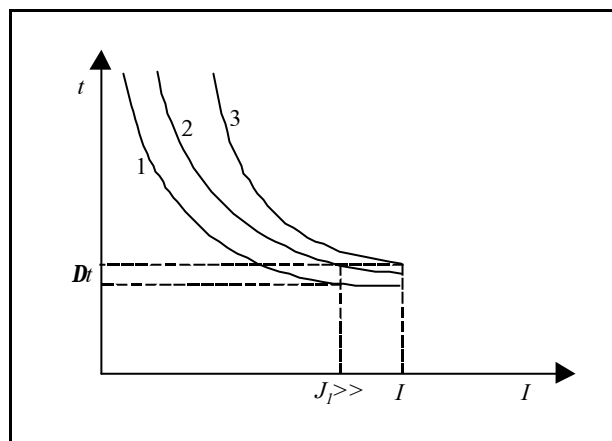
- da se u osnovnoj i rezervnoj zaštiti koriste isključivo prekostrujni releji $I >$ ili da se na deonici bližoj napojnoj transformatorskoj stanici dodatno koristi i trenutni relej $I \gg$ (to je dodatni relej uz rezervnu zaštitu),
- da se u okviru svake zaštite koriste i trenutni releji ($I >$ & $I \gg$) ili da se eventualno uz osnovnu zaštitu koristi trenutni relej.

U prvom slučaju se koordinacija izvodi prema vrednosti struje kvara na kraju deonice sa rezervnom zaštitom. Konkretno na slici 2, osnovna zaštita deonice B je zaštita 1, a rezervna zaštita je zaštita 2. U ovom slučaju se koordinacija izvodi na osnovu vrednosti struje I na mestu K_1 . U drugom slučaju se koordinacija izvodi prema vrednosti struje podešenja trenutnog releja (to je struja $J_1 \gg$ kojoj je korespondentno mesto K_2 na deonici B).

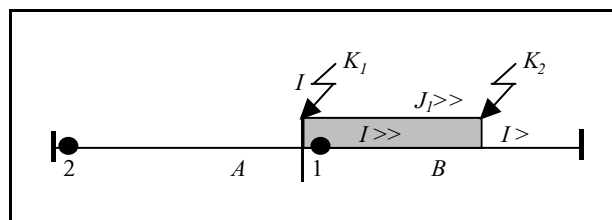
Neka se razmatra prvi slučaj koordinacije prekostrujnih releja koji se izvodi na osnovu vrednosti struje kvara I na mestu kvara K_1 pored zaštite 1. Neka je jednostavnosti radi čak i strujno podešenje ovih releja isto. Na slici 1 je istaknuta isprekidanim linijama margina vremena (Dt) potrebna za koordinaciju prekostrujnih releja u okviru zaštite 1 i 2. Da bi se obezbedio zadati stepen vremenske selektivnosti Dt između prekostrujnih releja 1 i 2 pri vrednosti struje I , potrebno je izabrati za koeficijent finog podešenja prekostrujnog releja u okviru zaštite 2 vrednost koja odgovara krivoj 3 sa slike 1.

Drugi slučaj koordinacije releja se izvodi u odnosu na struju $J_1 \gg$ podešenja trenutnog releja smeštenog u okviru zaštite 1. Ova vrednost struje je manja u odnosu na struju I iz prethodnog slučaja, tako da se koordinacija releja vrši u domenu manjih vrednosti struja gde je rastojanje između odgovarajućih krivih prekostrujnih releja veće. U ovom slučaju koordinacija releja u okviru zaštite 2 će biti ispunjena ako se izabere koeficijent finog podešenja koji odgovara krivoj 2 na slici 1. Krivoj 2 je korespondentna manja vrednost koeficijenta finog podešenja nego što je to slučaj sa krivom 3. Dakle, u ovom slučaju je ispunjen stepen vremenske selektivnosti Dt između parova osnovni - rezervni relej, pri manjim vrednostima koeficijenta finog podešenja nego u prvom slučaju, što istovremeno znači brže delovanje rezervnog releja.

Sa stanovišta delovanja zaštita sa vremenski zavisnom karakteristikom, podešenje prema tipu kratkog spoja sa najvećom vrednošću struje (to je po pravilu troljni kratak spoj) ima za rezultat da se obezbeđuje selektivnost, ali istovremeno ima i spori eliminaciju kvarova za ostale tipove kratkih spojeva (npr. dvopolne ili dvopolne sa zemljom koji su čak više verovatni nego troljni).



Slika 1. Krive releja sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom



Slika 2. Koordinacija osnovna/rezerva zaštita na dve deonice izvoda

Prisustvo trenutnih prekostrujnih releja u distributivnoj mreži se maksimalno koristi, jer se podrazumeva da će kvarovi na jednom delu osnovne zone biti eliminisani upravo tim relejima (išrafirani deo deonice B na slici 2), pa će eventualna potreba za koordinacijom osnovni - rezervni relej postojati samo kod kvarova na delu osnovne zone koji se ne eliminišu trenutnim relejima (deo deonice B koji nije išrafiran na slici 2). Prema tome, kada se koordinacija prekostrujnih releja izvodi prema struji podešenja trenutnih releja, to se čini prema vrednosti struje koja odgovara mestu na početku nešrafirane oblasti na vodu B (dakle, tačno na granici dokle se u osnovnoj zoni kvarovi trenutno eliminišu). Ta vrednost struje je manja nego na početku deonice B , pa se koordinacija izvodi pri manjoj vrednosti struje, čime se obezbeđuje brže delovanje rezervnog releja [2]. S obzirom na to da na putanji od krajeva mreže do napojne transformatorske stanice ima više releja, pri svakoj koordinaciji se može postići minimizacija vremena delovanja, što konačno ima za rezultat da su u čitavoj mreži smanjena vremena delovanja releja. Na ovaj način, pored primarnog cilja uvođenja trenutnih releja - ubrzanje eliminacije kvara na deonici na kojoj je postavljen, dodatno je iskorišćeno prisustvo ovih releja, tako da se kroz manju vrednost podešenja pri koordinaciji ubrzava delovanje zaštite. Za ovaj tip koordinacije, do eventualnog gubitka selektivnosti bi došlo samo u slučaju kada bi došlo do otkaza trenutnog releja (što je statistički gledano redak događaj, pa je ovaj slučaj samo od akademskog značaja), pa bi se kvar eliminisao samo delovanjem prekostrujnog releja. Ovaj problem ne postoji kod prvog pristupa.

U realnim mrežama se koriste oba pristupa. U programskoj podršci [6,7] se koriste sledeća rešenja. Ako u okviru zaštita ne postoje trenutni releji, onda se primenjuje prvi pristup, dok se drugi pristup primenjuje kada je to moguće u slučaju postojanja trenutnih releja. Odnosno, cilj je da se u mreži obezbedi minimalno vremensko podešenje releja.

Prethodnim razmatranjem su u potpunosti definisani uslovi i vrednosti struja prema kojima treba koordinisati releje, dok se u nastavku izlažu dve metode o postupcima za neposrednu realizaciju, te koordinacije u slabopetljanim sredjenaponskim distributivnim mrežama. Za izbor vremenskog podešenja releja u ovim mrežama koristi se direktna metoda - standardni postupak u petljama [3] koji se zasniva na podešenjima u smeru kretanja kazaljke sata i obrnutom smeru i metoda „*contact travel*” [2] koja predstavlja modifikaciju direktne metode.

Direktna metoda se zasniva na optimizacionim procedurama: „simplex” metodi i „mixed integer” metodi koje obezbeđuju efikasno nalaženje global-

nog optimalnog rešenja, što predstavlja poseban kvalitet ovakvog postupka [5]. Direktna metoda se može primenjivati i kod prostih i složenih petlji, dok se drugom metodom - *contact travel* dobijaju nešto manja vremenska podešenja, jer se uzima u obzir putovanje kontakata releja, ali se može primenjivati samo za podešenje releja u prostim petljama.

2.2. Direktna metoda

Za rešavanje ovog problema predložena je jedna od tehnika linearnog programiranja - primalna „simplex” metoda [3], odnosno tehnika celobrojnog linearnog programiranja - „mixed integer” metoda u zavisnosti od toga da li se radi o prekostrujnim relejima sa kontinualnim ili diskretnim vremenskim podešenjem. U delu koji sledi, biće ukratko izložena ideja za izbor vremenskog podešenja i koordinaciju prekostrujnih releja primenom jedne od ove dve optimizacione procedure.

Kriterijumska funkcija ovog optimizacionog problema w predstavlja sumu vremena delovanja prekostrujnih releja, koju je potrebno minimizirati uz ograničenja koja predstavljaju uslove zadovoljenja vremenske selektivnosti između parova osnovni - rezervni relej. Za mrežu u kojoj se nalazi m releja kriterijumska funkcija glasi [4]:

$$\min w = \sum_{i=1}^m t_{i,q} + \sum_{i=1}^m a_{i,q} DIAL_i \quad (2)$$

gde je: $t_{i,q}$ - vreme delovanja i -tog releja koje je jednako proizvodu koeficijenta $a_{i,q}$ i $DIAL_i$ - koeficijenta vremenskog podešenja i -tog releja (koeficijent finog podešenja), dok je q - indeks čvora gde je ugrađen i -ti relej.

Koeficijent $a_{i,q}$ se za releje sa vremenski zavisnom karakteristikom izračunava na sledeći način [3]:

$$a_{i,q} = \frac{I}{I_{TAPi} - 1} \quad (3)$$

gde je: I - struja podešenja trenutnog releja u čvoru q kada postoji trenutni relej u okviru iste zaštite, u suprotnom je to struja kratkog spoja u čvoru q , I_{TAPi} - strujno podešenje i -tog prekostrujnog releja, a , b - koeficijenti osnovnog podešenja.

Za releje sa vremenski nezavisnom karakteristikom se zadaje $a_{i,q}=1$, a vrednost $DIAL_i$ odgovara vremenu podešenja releja.

Dakle, u predloženoj optimizacionom problemu se izračunavaju samo koeficijenti $DIAL_i$. Kod releja sa vremenski nezavisnom karakteristikom $DIAL_i$ je, kao što je pomenuto, vreme podešenja, dok kod releja sa inverznom karakteristikom proračun

$DIAL_i$ u stvari odgovara izboru jedne iz familije krivih za izabrani tip karakteristike releja. Izabrani tip karakteristike releja je gotovo po pravilu normalno zavisna inverzna karakteristika ($\mathbf{a}=0,02$, $\mathbf{b}=0,14$). Primena drugih karakteristika (npr. vrlo ili ekstremno zavisne) ima za rezultat značajno smanjenje vremena delovanja, što može dovesti do gubitka selektivnosti u odnosu na zaštite kod potrošača. Distributivne kompanije samo izuzetno koordinišu zaštitu u srednjenaponskoj mreži sa zaštitama potrošača, a uglavnom se zahteva da se potrošači usklade sa zaštitom kompanije, pri čemu je najlakše obezbediti tu koordinaciju kod primene normalno zavisne inverzne karakteristike.

Vreme delovanja rezervnog releja mora da bude veće od sume vremena delovanja osnovnog releja za struju kvara na mestu njegove ugradnje i stepena vremenske selektivnosti Dt :

$$t_{ri,q} - t_{i,q} \geq Dt, \quad i=1, \dots, m, \quad (4)$$

gde je: $t_{i,q}$ - vreme delovanja osnovnog releja za struju kvara na mestu njegove ugradnje (čvor q), $t_{ri,q}$ - vreme delovanja rezervnog releja pri kvaru u čvoru q , odnosno, pri struji podešenja trenutnog releja u čvoru q .

Vremensko podešenje prekostrujnih releja se dobija rešavanjem optimizacionog problema, čija je kriterijumska funkcija definisana izrazom (2), uz ograničenja koja su definisana izrazom (4).

Na ovaj način je problem podešenja i koordinacije releja sveden na optimizacioni problem koji se rešava u dve faze primenom primalne „simplex” metode. U prvoj fazi se dobija dopustivo bazno rešenje, dok se u drugoj nalazi optimum. Primenom tehnike linearnog programiranja, obezbeđuje se efikasno nalaženje globalnog optimalnog rešenja, što predstavlja poseban kvalitet ovakvog pristupa.

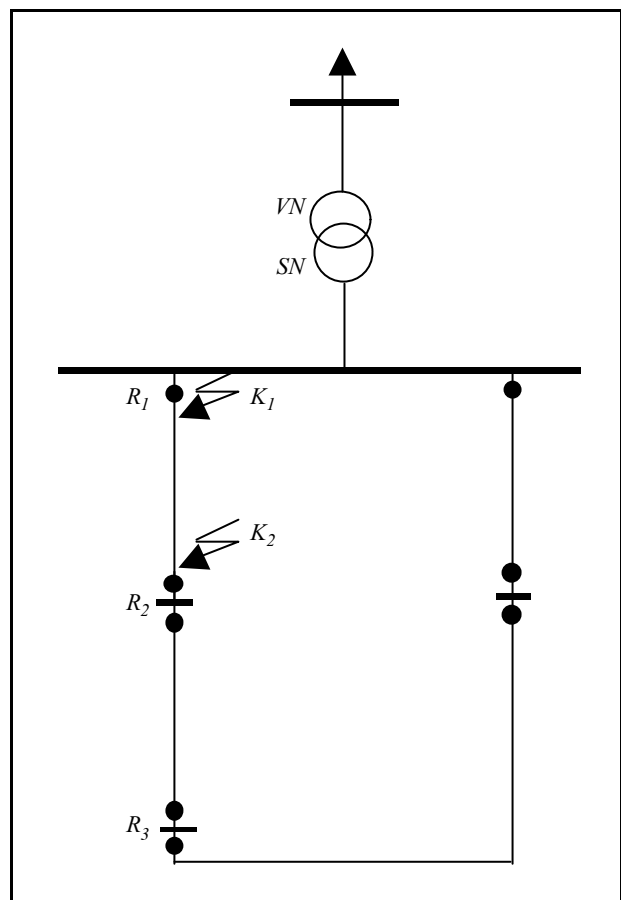
U nastavku je opisana osnovna ideja i algoritam za podešenje prekostrujnih releja u slaboupetljanim srednjenaponskim distributivnim mrežama primenom metode *contact travel*.

2.3. Metoda *contact travel*

U metodi *contact travel* se dodatno uvažava vreme putovanja kontakata releja. Za razliku od direktne metode, to je jedan iterativni postupak za izbor vremenskog podešenja (koeficijenta finog podešenja kod releja sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom) koji se sastoji u sledećem:

– U prvom koraku je potrebno pretpostaviti vrednosti koeficijenta finog podešenja za sve releje na deonicama u petlji.

– Izračunati vreme delovanja prvog releja (relej $R1$ na slici 3) za struju kratkog spoja na početku deonice na (mesto $K1$) kada je petlja zatvorena. Za prvi relej može da se izabere bilo koji relej u petlji. Obično se uzima da je to jedan od releja koji se nalazi blizu izvora napajanja - transformatora VN/SN . Pored toga, potrebno je izračunati i vreme delovanja releja koji se nalazi u okviru zaštite na suprotnom kraju deonice $R2$, kao i vreme delovanja njegovog rezervnog releja $R3$ za istu struju kvara. Neka je vreme delovanja prvog releja t_{R1} , a releja $R2$ i $R3$ t_{R2} i t_{R3} , respektivno.



Slika 3. Upetljani deo distributivne mreže

– Za kvar na suprotnom kraju deonice (mesto $K2$ na slici 3) potrebno je izračunati vreme delovanja releja $R2$ - t'_{R2} i releja $R3$ - t'_{R3} u slučaju kada je petlja otvorena na mestu ugradnje releja $R1$. Uz to je potrebno proveriti da li je zadovoljena koordinacija između parova releja $R2$ i $R3$, uzimajući u obzir i vreme putovanja kontakata tokom kvara $K1$ pre otvaranja petlje zbog delovanja prvog releja $R1$. Drugim rečima, usled kvara $K1$ struja kvara protiče kroz relej $R1$ i kroz releje $R2$ i $R3$. Za dati kvar, vreme delovanja releja $R1$ (t_{R1}) je manje od vreme-

na delovanja releja $R2$ i $R3$, jer je struja kvara koja protiče kroz relej $R1$ znatno veća od struje kvara koja protiče kroz releje $R2$ i $R3$. Zbog toga su se releji $R2$ i $R3$ pobudili do izvesne granice koja je određena količnikom vremena t_{R1} za koje se deluje relejom $R1$ i vremena t_{R2} , odnosno, t_{R3} za koje bi se delovalo relejima $R2$ i $R3$, respektivno, pri kvaru $K1$. Zatim se, prema ovoj metodi, mesto kvara prebacuje na mesto $K2$ pri čemu se uvažava zatečeno stanje pobuđenosti releja $R2$ i $R3$, a odgovarajuća vremena delovanja pri kvaru $K2$ su data kao:

$$t''_{R2} = t_{R1} + t'_{R2} - I \frac{t_{R1}}{t_{R2}}, \quad (5)$$

$$t''_{R3} = t_{R1} + t'_{R3} - I \frac{t_{R1}}{t_{R3}}, \quad (6)$$

gde je: t - vreme delovanja releja kada je petlja zatvorena, t' - vreme delovanja odgovarajućih releja nakon delovanja prvog releja i t'' - vreme delovanja releja kada je petlja otvorena nakon delovanja prvog releja sa uvažanim vremenom putovanja kontakata. Ako je vreme delovanja prekostrujnog releja $R3$ (t''_{R3}) veće od vremena delovanja prekostrujnog releja $R2$ (t''_{R2}) za Δt , tada je zadovoljena koordinacija između parova osnovni - rezervni relej. U suprotnom je potrebno povećati koeficijent finog podešenja prekostrujnog releja $R3$.

– Prethodna dva koraka se ponavljaju za svaki relej u petlji, uvažavajući kvar na mestu ugradnje razmatranog releja kada je petlja zatvorena i kvar na suprotnom kraju deonice kada je petlja otvorena na mestu ugradnje razmatranog releja.

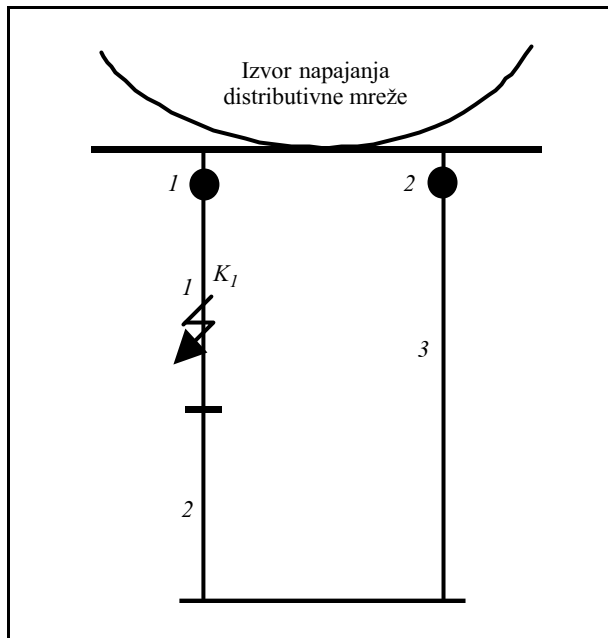
– Postupak je završen kada je ispunjen uslov koordinacije za svaki par osnovni - rezervni relej u petlji.

Primenom metode *contact travel* za izbor vremenskog podešenja (koeficijenta finog podešenja za strujno zavisne releje) obezbeđena je odgovarajuća koordinacija releja u različitim režimima rada i kada je petlja otvorena i kada je zatvorena.

3. PRORAČUNI REŽIMA SA KVAROM NA DEONICAMA GDE POSTOJE USLOVI ZA KASKADNO DELOVANJE PREKOSTRUJNIH ZAŠTITA IZVODA

Kaskadno delovanje prekostrujnih zaštita izvoda nastaje kada se kvar eliminiše nejedновременim sukcesivnim delovanjem dva ili više releja. Kaskadno delovanje je moguće i kod osnovnih i kod rezervnih prekostrujnih zaštita. U ovom delu rada je obrađen problem kaskadnog delovanja prekostrujnih zaštita u petljastim delovima mreže. Ovaj slučaj nastaje kada se dva radijalna izvoda koji imaju zaštite samo na početku izvoda povežu u prostu petlju - slika 4. Na ovoj

slici je prikazan upetljani deo distributivne mreže, gde su zaštite postavljene na krajevima petlje (na početnim deonicama) i označene brojevima 1 i 2. Deonice su označene *italic* brojevima od 1 do 3.



Slika 4. Jedna prosta petlja u distributivnoj mreži

Postoje dve varijante kaskadnog delovanja u petljastim delovima mreže:

- kvazi, u kojem su pri pojavi kvara oba releja pobuđena, ali se nejedновременa eliminacija kvara događa zbog njihove različite brzine delovanja i
- suštinsko kaskadno delovanje, gde se pri kvaru deluje samo jednim relejom, dok drugi nije pri tome ni pobuđen, a da se uslovi za pobuđivanje i delovanje tog drugog releja obezbeđuju tek nakon delovanja prvog releja (otvaranja prekidača čiji rad inicira taj relej).

Predmet obrade u ovom radu je ova druga varijanta⁴⁾ koja će se i podrazumevati u nastavku pod pojmom kaskadno delovanje. Istovremeno se podrazumeva da u petljama nema generatora⁵⁾. Do kaskadnog delovanja najčešće dolazi kod kvarova na početnim deonicama petlje (na deonicama 1 i 3 sa slike 4). U delu rada koji sledi, obrađuje se proračun režima u mreži nakon delovanja prvog od dva releja.

3.1. Proračun režima u mreži nakon delovanja prvog od dva releja

Pri delovanju prvog od dva releja, dolazi do promene strukture (uklopnog stanja) distributivne

⁴⁾ Važno je istaći da predmet ovih razmatranja nije kaskadno delovanje kod poprečnih diferencijalnih zaštita vodova.

⁵⁾ Uticaj generatora na rad zaštita se razmatra u prilogu.

mreže, jer nestaje petlja i uspostavlja se radijalno napajanje. Za proračun režima sa kvarom koji se i dalje napaja preko drugog kraja bivše petlje potrebno je formirati novu strukturu mreže, što u nekim slučajevima može biti u računskom smislu dosta zahtevna operacija. To bi, bez obzira na visoku efikasnost postupka za proračune iziskivalo relativno veliko vreme za proračun, pa je u nastavku ovog dela rada predloženo jedno aproksimativno rešenje kojim se omogućuje da se do vrednosti struje kroz drugi relej dode na vrlo jednostavan način, a sa praktično zanemarivom greškom. Greška koja se pri tome čini je na strani sigurnosti.

Da bi se proračunala vrednost struje kroz drugi relej nakon promene strukture distributivne mreže, potrebno je poći od proračuna režima sa petljom. U slučaju da u nekoj distributivnoj mreži postoje petlje, njihovim otvaranjem mreže se prevode u radijalne. Efekat otvaranja petlji se kompenzuje insertovanjem idealnih strujnih izvora - kompenzacionog generatora upravo na mestu otvaranja petlje, a vrednosti struje kompenzacionog generatora i na mestu kvara se izračunavaju primenom sledećeg izraza [8]:

$$\begin{matrix} V_p & 0 & Z_p & Z_{mpk} & I_p \\ V_k & V_k & Z_{mpk} & Z_k & I_k \end{matrix} \quad (7)$$

gde su: V_p - napon između čvorova otvaranja petlje (on je jednak nuli, jer režim mora ostati isti i nakon otvaranja petlji), V_k - napon na mestu kvara pre kvara, Z_p - sopstvena impedansa petlje, Z_{mpk} - međusobna impedansa petlja - kvar, Z_k - impedansa „gledana” sa mesta kvara, I_p - struja kompenzacionog generatora, I_k - struja na mestu kvara, pri čemu su Z_p , Z_{mpk} i Z_k elementi Tevenenove matrice impedansi Z .

Neka su pri nastanku kvara $K1$ na deonici 1 - slika 4 ispunjeni uslovi za kaskadno delovanje zaštita. Tada nakon delovanja releja 1 kvar neće biti eliminisan, pošto je preostalo napajanje mesta kvara sa druge strane (preko deonica 2 i 3). U tom novom stanju topologija mreže se menja, pošto mesto kvara više nije na petlji, nego je na kraju novonastalog radijalnog dela. Sada je potrebno izračunati struju kroz relej 2 sa datim mestom kvara i proveriti da li postoje uslovi za pobuđivanje i delovanje tog releja. U radu se predlaže da se za taj proračun iskoristi sistem jednačina (7) u kojem se koriste modifikovane vrednosti matrice Z iz režima sa petljom. Te modifikacije su rezultat modelovanja efekta otvaranja prekidača na početku deonice 1 pomoću značajnog povećanja impedanse te deonice. Neka to povećanje impedanse iznosi DZ . Ovo povećanje impedanse deonice se reflektuje u jednačini 7 na sledeći način:

$$\begin{matrix} V_p & 0 & Z_p & Z & Z_{mpk} & Z & I_p \\ V_k & V_k & Z_{mpk} & Z & Z_k & Z & I_k \end{matrix} \quad (8)$$

Ukoliko je DZ veće, utoliko je modelovanje tačnije, jer manje struje sa mesta kvara protiče kroz deonicu 1 , a struja na mestu kvara I_k i kompenzaciona struja petlje I_p su sve sličnije. Jedini problem je što povećanje vrednosti DZ vodi ka singularitetu matrice iz izraza (8). U realnim mrežama je DZ moguće povećavati tako da i do 10^4 puta bude veće od vrednosti Z_p , a da pri tome nema problema sa singularitetom matrice. Razlike struja I_p i I_k su zanemarljive, a praktično identične sa vrednošću struje koja bi se dobila kada bi se potpuno ponovio proračun sa promenjenom strukturom mreže.

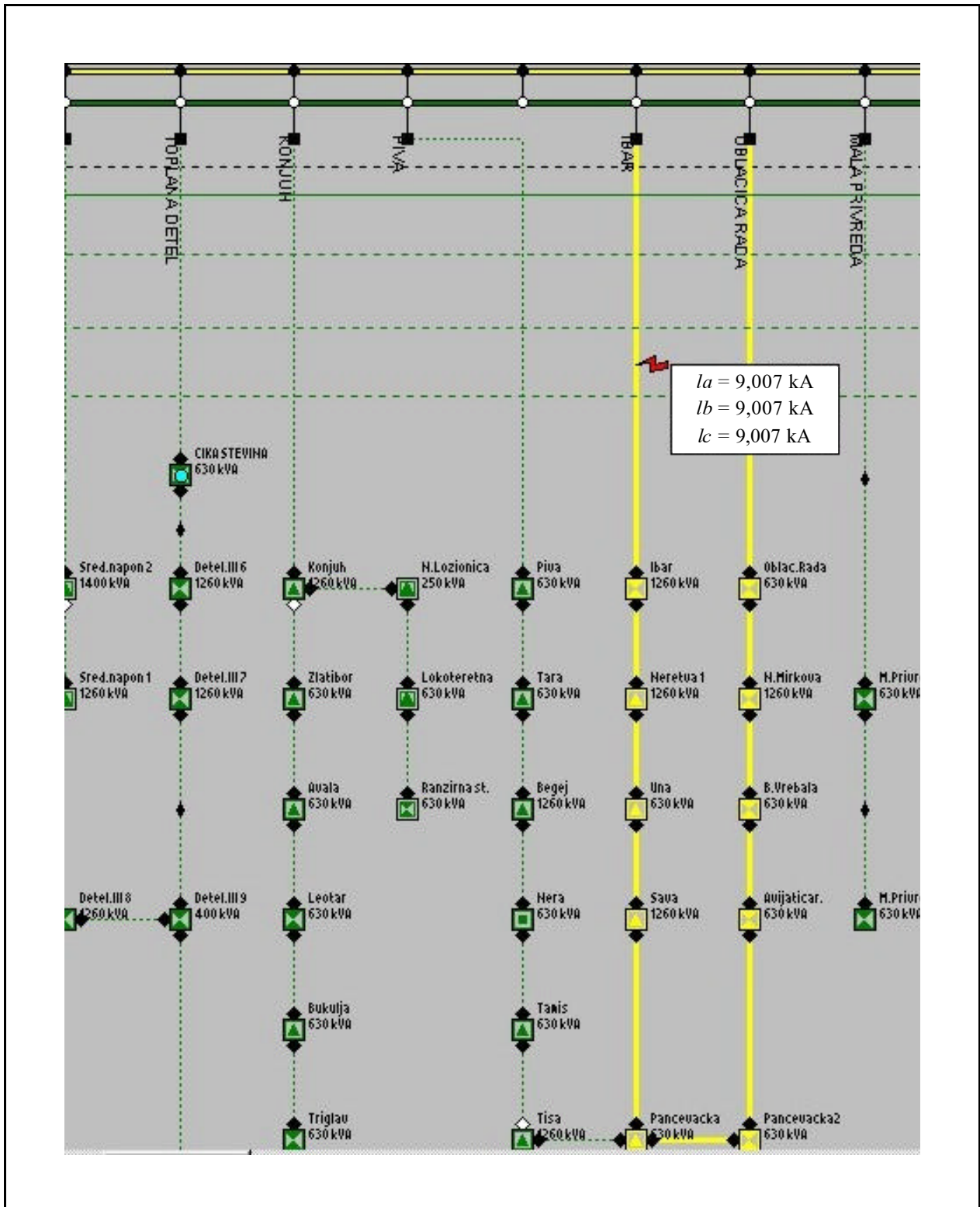
Ovim veoma jednostavnim i izuzetno efikasnim rešenjem se dobija rezultat na strani sigurnosti i u njemu se koristi sistem jednačina kojom se opisuju delovi mreže sa petljom i kvarom, pri čemu se matrica Z veoma jednostavno modifikuje. Ovakvim rešenjem se izbegava relativno obiman proračun, ako bi se promena uklopnog stanja tretirala kao obična promena uklopnog stanja i omogućuje se lako dobijanje konačnog odgovora - da li će nastupiti kaskadno delovanje tj. da li će kvar biti eliminisan.

3.2. Primer

U ovom delu rada je prikazan primer proračuna kaskadnog delovanja. Kao podloga za ove proračune je korišćena mreža grada Novog Sada, gde je za potrebe ovog proračuna simulirana prosta petlja napravljena između dva izvoda - slika 5. Za zaštitu ovih izvoda od međufaznih kratkih spojeva se koristi trenutna $I >>$ zaštita podešena na $1\ 200\ A$, dok se za zaštitu od kratkih spojeva sa zemljom koristi $I_0 >$ podešena na $60\ A$. Pomenuta petlja je napravljena između izvoda Ibar i Oblačića Rada (treći i četvrti izvod sa desne strane). Mesto kvara (tropolni kratak spoj) se nalazi na polovini deonice između transformatorske stanice Novi Sad 5 i transformatorske stanice TS Ibar (mesto kvara je na slici 5 označeno strelicom). Elementi matrice Z imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{matrix} Z_p = (0,930 + j0,499)\ \Omega; & Z_{mpk} = (0,084 + j0,047)\ \Omega; \\ Z_k = (0,273 + j1,389)\ \Omega. \end{matrix}$$

Napon na mestu kvara pre kvara je $V = 20\ kV$. Kada se izračuna vrednost režima sa ovim kvarom, dobija se da je vrednosti struja u petlji: na mestu kvara $9,007\ kA$, dok je na kraju petlje kod izvoda Ibar $8,194\ kA$ i na kraju kod izvoda Oblačića Rada $0,813\ kA$. Kako je zaštita izvoda od međufaznih kratkih spojeva realizovana pomoću trenutne prekostrujne zaštite koja je podešena na $1\ 200\ A$, to će do delovanja zaštitom doći samo na izvodu Ibar, dok se na drugom kraju zaštita neće pobuditi.



Slika 5. Razmatrani deo mreže grada Novog Sada

Da bi se proverilo da li će i zaštita na izvodu Oblačića Rada delovati nakon delovanja prve zaštite potrebno je ponoviti proračun za dato mesto kvara pri čemu je sada prekidač na izvodu Ibar otvoren. Za ovaj

proračun se koristi izraz (8). U prvoj varijanti je usvojeno da je vrednost $DZ=1\ 000\ \Omega$, a nakon rešavanja izraza (8) dobija se da je struja na mestu kvara i struja kroz petlju jednaka 6,375 kA, što znači da će se delo-

vati i drugom zaštitom. Za proveru same metode vrednost DZ je povećana na sledeće vrednosti: 10 000 i 100 000, pri čemu su kao rezultat dobijane sledeće vrednosti struja kroz petlju: 6,382 kA i 6,403 kA, respektivno. Na osnovu dobijenih rezultata se može konstatovati da se vrednosti struja vrlo malo razlikuju.

Kada bi se nakon formiranja pomenute petlje otvorio prekidač na izvodu Ibar i uobičajenim postupkom formirala nova struktura mreže i izračunala struja koja teče na izvodu Oblačića Rada, dobila bi se vrednost od 6,371 kA koja se praktično ne razlikuje od vrednosti 6,375 kA, a koja se dobija približnim postupkom koji je predložen u ovom radu.

Na ovaj način je u potpunosti verifikovan postupak za približni proračun struja kroz releje pri kaskadnom delovanju releja.

4. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena problematika rada prekostrujnih zaštita u slaboupetljanim distributivnim mrežama. U radu je ukazano na složenost i poteškoće na koje se nailazi pri strujnom i vremenskom podešenju i koordinaciji prekostrujnih releja u slaboupetljanim srednjenaponskim distributivnim mrežama. Za izbor vrednosti struje pri kojoj se izvodi koordinacija razmatrana su dva postupka i obrazloženi uslovi za njihovu primenu. Za koordinaciju/vremensko podešenje releja prikazane su dve metode: direktna koja je zasnovana na optimizacionim procedurama i iterativna - „contact travel”. Za svaku od pomenutih metoda, date su napomene vezane za mogućnost primene, kao i prednosti i nedostaci koji se pri tome mogu očekivati. U radu je detaljno razmotren problem kaskadnog delovanja prekostrujnih zaštita, gde je dat jedan nov, jednostavan postupak za proračun struje releja nakon delovanja prvog od dva releja. Na ovaj način je u značajnoj meri zaokružen problem rada prekostrujnih zaštita u slaboupetljanim mrežama.

5. LITERATURA

- [1] Bijoy Chattopadhyay, M. S. Sachdev, T. S. Sidhu: AN ON-LINE RELAY COORDINATION ALGORITHM FOR ADAPTIVE PROTECTION USING LINEAR PROGRAMMING TECHNIQUE, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 165-171.
- [2] J. M. Gers, E. J. Holmes: PROTECTION OF ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS, IEE, 1998, London.
- [3] D. Bekut, RELEJNA ZAŠTITA, Stylos, Novi Sad, 1999.
- [4] D. Bekut, I. Berić, A. Parkamović: IZBOR PODEŠENJA I KOORDINACIJA RELEJA U SLABOU-

PETLJANIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA, JUKO CIGRE, 2002, referat R. 4. 9.

- [5] V. Levi, D. Bekut: PRIMENA RAČUNARA U ELEKTROENERGETICI, Stylos, Novi Sad, 1998.
- [6] D. Bekut, R. Bibić, I. Berić: PROGRAMSKI PAKET ZA MENADŽMENT DISTRIBUTIVNIH SISTEMA - I DEO: KRATKI SPOJEVI I LOKACIJA KVARA, Elektrodistribucija, br. 2, 2001, str. 120-126.
- [7] D. Bekut, R. Bibić, I. Berić: PROGRAMSKI PAKET ZA MENADŽMENT DISTRIBUTIVNIH SISTEMA - II DEO: RELEJNA ZAŠTITA, Elektrodistribucija, br. 1, 2002, str. 26-34.
- [8] X. Zhang, F. Soudi, D. Shirmohammadi, C. S. Cheng: A DISTRIBUTION SHORT CIRCUIT ANALYSIS APPROACH USING HYBRID COMPENSATION METHOD, IEEE Trans. on PS, Vol. 10, No. 4, November 1995, pp. 2053-2059.
- [9] A. G. Phadke, J. S. Thorp: EXPOSE HIDDEN FAILURES TO PREVENT CASCADING OUTAGES, IEEE Computer Application in Power, Vol. 9, No. 3, 1996, pp. 20-23.

6. PRILOG - UTICAJ GENERATORA NA RAD ZAŠTITE

Savremeni trend u eksploataciji distributivnih mreža je uključivanje i korišćenje generatora relativno malih snaga (od nekoliko kW do nekoliko MW) u distributivnu mrežu. U ovom prilogu ukratko je izloženo šta sa stanovišta zaštite distributivne mreže znači uključivanje i korišćenje tih generatora.

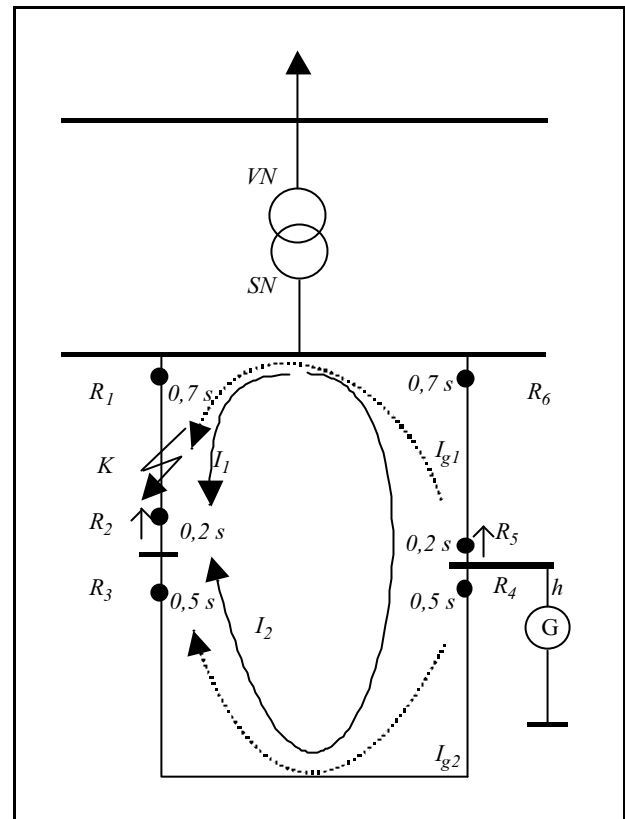
Prisustvo generatora na nekom od krajeva radijalnog izvoda suštinski menja pogonske prilike na tom izvodu. Situacija se u tom slučaju menja, pa izvod iz radijalnog prelazi u pogon sa dvostranim napajanjem. Jedna napojna tačka su srednjenaponske sabirnice sa kojih polazi izvod, a druga je čvor u kome je priključen generator. Na taj način je situacija slična kao kod proste petlje, s tom razlikom da snage kratkog spoja na napojnim tačkama nisu iste, što je bio slučaj kod proste petlje.

Prisustvo generatora u petljama dovodi do značajnog uslozňavanja postupka za podešenje i koordinaciju prekostrujnih releja u petljama, jer je u ovakvim uslovima teže ostvariti selektivnost rada usmerene prekostrujne zaštite. Za ilustraciju ovog problema je prikazan deo distributivne mreže na slici *PI*. Na ovoj slici je prikazana jedna prosta srednjenaponska petlja koja se napaja preko jednog napojnog transformatora visoki/srednji napon (VN/SN). Petlja se sastoji iz tri deonice. Na svakoj od deonica su kružićima predstavljeni releji R_1 do R_6 . Uz releje koji moraju biti usmereni, postavljene su strelice sa odgovarajućim usmerenjem. Generator G je priključen u čvoru h . Uz releje su data i odgovarajuća vremen-

ska podešenja uz uvažavanje da je $D_t=0,3$ s. Mesto kvara K na prvoj deonici prikazano je strelicom.

Kada se dogodi kvar K i kada u petlji nema generatora, smerovi struja I_1 i I_2 u petlji su tada od krajeva petlji (izvor struja je na SN sabirnica) ka mestu kvara. Kvar K se eliminiše relejima R_1 i R_2 . Na slici $P1$ ove struje su označene punom linijom. Međutim, kada se na sabirnicama h priključi generator G , tada se u petlji pojavljuje još jedan aktivan izvor od koga ka mestu kvara teku struje I_{g1} i I_{g2} koje su na slici označene isprekidanim linijama. U zavisnosti od snage generatora, snage mreže koja je priključena sa strane VN sabirnica napojnog transformatora kao i mesta kvara, može se dogoditi da na deonici na čijim se krajevima nalaze releji R_5 i R_6 rezultujući smer struje bude određen prema struji I_2 ili I_{g1} . Ako je struja I_2 veća, onda će relej R_5 biti blokiran i kvar će se eliminisati na isti način kao da generatora nema. Treba samo konstatovati da struja kroz relej R_6 ima drugačiju vrednosti nego kroz releje R_4 i R_2 i da je osetljivost ova tri releja drugačija nego što bi to bio slučaj kod proste petlje. Ako je struja I_{g1} veća od I_2 , tada se menja smer struje kroz relej R_5 i stiču se uslovi za njegovo deblokiranje i delovanje (ako je struja veća od vrednosti strujnog podešenja). Na taj način može doći do neselektivnog delovanja istovremeno sa relejom R_2 . Ovo je slučaj tzv. ispravnog, a nepotrebnog delovanja releja [9], koje se datim tipom releja (prekostrujni usmereni) u opštem slučaju ne može prevazići, te bi se to moralo rešavati nekim drugim i obično skupljim zaštitama.

Prema tome, generatori se u distributivnim mrežama, po pravilu, priključuju na radijalne izvođe, a u petljama bi njihov pogon bio nepoželjan.



Slika P1. Uticaj generatora na delovanje zaštita u petlji

Rad je primljen u uredništvo 02. 09. 2002. godine



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



Izabela Berić je rođena 1976. godine u Parizu. Fakultet tehničkih nauka je završila 2001. godine u Novom Sadu. Od 2002. godine je zaposlena u DMS Grupi u Novom Sadu. Oblasti rada i angažovanja su vezane za relejnu zaštitu.



Aleksandar Parmaković je rođen 1976. godine u Sremskoj Mitrovici. Fakultet tehničkih nauka je završio 2001. godine u Novom Sadu. Od 2002. godine je zaposlen u DMS Grupi u Novom Sadu. Oblasti rada i angažovanja su vezane za kratke spojeve, relejnu zaštitu, lokaciju kvara na vodovima, distributivni menadžment sistem, itd.

Dragan S. Popović,
Željko Popović i Vojin Kerleta

Izbor rizika u procesu restauracije opterećenja u distributivnim mrežama

Originalni naučni rad
UDK: 621.311.1; 621.316

Rezime:

U ovom radu je izložena procedura za restauraciju opterećenja u distributivnim mrežama zasnovana na fazi upravljanju rizikom. Uvođenje fazi logike omogućuje realnije modelovanje neizvesnosti koja se javlja pri definisanju opterećenja i efekata povratnog opterećenja, dok upravljanje rizikom obezbeđuje veći kvalitet donesenih odluka u procesu restauracije u prisustvu neizvesnosti. Predloženi algoritam je testiran na nekoliko realnih distributivnih mreža. Dobijeni rezultati pokazuju da prihvatanje određenog rizika omogućuje smanjenje troškova zbog neisporučene električne energije u procesu restauracije opterećenja.

Ključne reči: deregulacija, distributivni sistem upravljanja, restauracija napajanja, fazi logika, upravljanje rizikom

Abstract:

DISTRIBUTION NETWORK RESTORATION SUPPLY BASED ON RISK SELECTION

A procedure for supply restoration in distribution network based on fuzzy risk management is proposed in this paper. Introduction of fuzzy logic enables more realistic modeling of uncertainty in acquaintance of network load and payback effect, while risk management provides higher quality of decision-making in restoration process in such uncertainty environment. The proposed algorithm is tested on several real-life distribution networks. Obtained results show that acceptance of a risk provides costs reduction due to undelivered energy during the supply restoration.

Key words: deregulation, distribution management system, supply restoration, fuzzy logic and risk management

1. UVOD

Restauracija opterećenja je jedan od najvažnijih operativnih problema u distributivnim mrežama sa kvarom. Sa uvođenjem otvorenog i konkurentnog tržišta u elektroprivredi, kao i sa jasnim definisanjem koštanja neisporučene električne energije za određene grupe potrošača, ova distributivno upravljачka funkcija dobija sve više na značaju. Problem defini-

sanja plana restauracije u distributivnim mrežama je višekriterijumski, kombinatorni, nelinearni problem sa ograničenjima u prisustvu neizvesnosti. Takođe, u praktičnoj primeni ovi problemi imaju velike dimenzije, čime se oni još više komplikuju. Za rešavanje ovih problema restauracije koristi se više pristupa: 1) optimizacioni pristup [1–9], 2) heuristički pristup [10–21], 3) pristup preko ekspertskih sistema [22–26], probablistički pristup [27–31].

*Prof. dr Dragan S. Popović, Univerzitet u Novom Sadu, Institut za energetiku i elektroniku, 21000 Novi Sad, Fruškogorska 11
Mr Željko Popović, – „EPS”, JP „Elektrovojvodina”, 24300 Bačka Topola, Rade Končara 59
Vojin Kerleta, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, 23000 Zrenjanin, Đure Đakovića bb*

Navedeni algoritmi najčešće koriste deterministički pristup pri modelovanju opterećenja. Međutim, u realnim problemima, značajan broj podataka vezanih za opterećenja u srednjenaponskim distributivnim mrežama nije deterministički. Iz ekonomskih razloga, u distributivnim mrežama se vrše merenja u manje od 10 % čvorova, što je daleko od dovoljnog da bi se postigla pouzdana i kvalitetna estimacija opterećenja u svim čvorovima mreže. Zbog toga, opterećenja dobijena kao rezultat estimacije, u praksi uvek sadrže određenu meru neizvesnosti. Ova neizvesnost je naročito primetna kod efekta povratnog opterećenja (payback effect), tj. dodatnog opterećenja koje se pojavljuje nakon ponovnog uključanja potrošača koji su bili bez napajanja izvesno vreme. Fazi pristup se pokazao kao veoma pogodan za modelovanje neizvesnosti opterećenja u problemima estimacije i restauracije [28]. U prisustvu neizvesnosti, donosilac odluke teži da nađe robustan plan restauracije koji smanjuje (minimizira) rizik od značajnih troškova restauracije. Ovaj cilj može biti postignut primenom adekvatnih alata za merenje i upravljanje rizikom [32].

Procedura upravljanja rizikom primenjena na restauraciju opterećenja, koja je izložena u ovom radu, bazirana je na fazi konceptu, kao i na konceptu lokalne mreže. Ona je razvijena u cilju prevazilaženja ranije navedenih problema. Suština procedure je višekriterijumski fazi mešovito-celobrojni model. Objektivna funkcija predstavlja kompromis između troškova neisporučene električne energije i zahtevanog broja operacija prekidačke opreme [7,24]. Opterećenja potrošača i tokovi snaga u mreži su predstavljeni kao trougaoni fazi brojevi, čime je ceo model preveden u fazi domen [33,34]. Fazi pristup omogućuje realnije modelovanje neizvesnosti koja se javlja pri definisanju opterećenja i povratnog opterećenja. Štaviše, on omogućuje da se termička ograničenja vodova i napojnih transformatora tretiraju kao „meka” ograničenja. Na taj način se jednostavno može definisati „prihvatljiv rizik” od narušavanja tih ograničenja u procesu restauracije. Konačno, uključujući koncept lokalne mreže, dimenzije problema se drastično smanjuju [20], čime se omogućuje primena sofisticiranih i vremenski zahtevnih fazi optimizacionih procedura u realnim mrežama.

Predložena procedura obezbeđuje donosiocu odluke sredstvo za analize različitih scenarija restauracije opterećenja, kao i sredstvo za definisanje prihvatljivog (optimalnog) stepena rizika koji obezbeđuje minimalne očekivane troškove neisporučene električne energije uz zadovoljavanje skupa „mekih” ograničenja. Na osnovu predložene procedure je razvijen softverski paket koji je testiran na

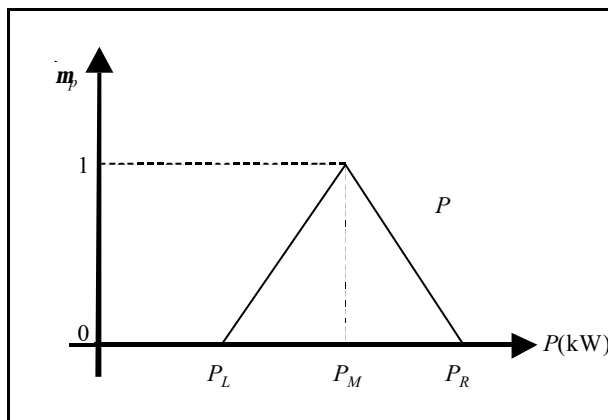
više realnih distributivnih mreža. Dobijeni rezultati pokazuju da fazi pristup i prihvatanje određenog rizika kroz kriterijum maksimalne novčane dobiti u procesu restauracije omogućuje efikasnije korišćenje postojećih kapaciteta i maksimalno smanjenje (minimizaciju) troškova usled neisporučene električne energije u procesu restauracije opterećenja.

Ovaj rad ima šest poglavlja. U drugoj glavi su opisani matematički modeli koji se koriste. U trećoj glavi je izložena procedura upravljanja rizikom. U četvrtoj glavi su dati rezultati primene algoritma za restauraciju opterećenja na realnoj distributivnoj mreži. U petoj glavi je zaključak, a u poslednjem poglavlju je data literatura.

2. MATEMATIČKI MODELI

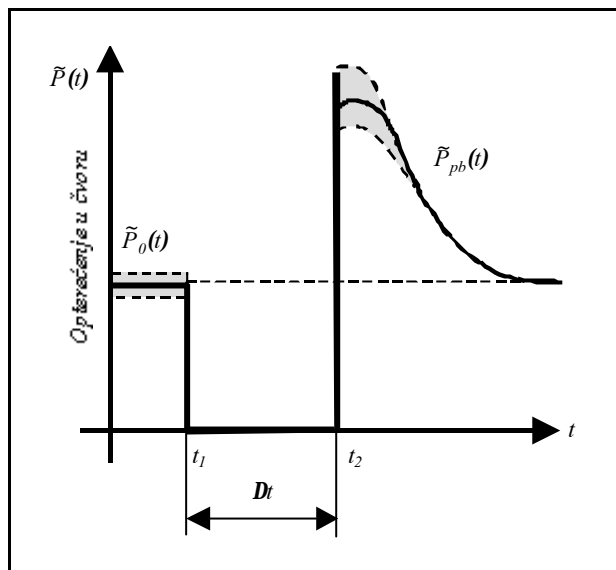
2.1. Modelovanje opterećenja i efekta povratnog opterećenja

Jedan od efikasnih načina da se modeluje neizvesnost u poznavanju opterećenja u distributivnoj mreži je da se ono opiše fazi brojem. Za predstavu opterećenja u distributivnoj mreži se uobičajeno koriste trougaoni fazi brojevi. Na slici 1 je snaga (opterećenje) predstavljena kao trougaoni fazi broj P , koji se simbolički piše kao $\tilde{P} = (P_L, P_M, P_R)$, gde je P_M srednja vrednost, a P_L i P_R su leva i desna granica fazi broja, respektivno.



Slika 1. Trougaona funkcija pripadnosti snage (opterećenja)

Međutim, u procesu restauracije je potrebno proceniti i veličinu povratnog opterećenja kod potrošača koji su izvesno vreme bili bez napajanja. Dobro je poznato da efekat povratnog opterećenja može značajno povećati opterećenje u potrošačkim čvorovima u odnosu na opterećenja koja su bila u tim čvorovima pre prekida napajanja.



Slika 2. Efekat povratnog opterećenja

Veličina povratnog opterećenja zavisi od veličine broja faktora kao što su: dužina trajanja prekida, tip potrošača, period godine, dan u nedelji, period dana i sl. [35,36]. Zbog toga postoji i značajan stepen neizvesnosti u pogledu veličine povratnog opterećenja. Da bi se uvažila neizvesnost u modelovanju povratnog opterećenja, koristi se fazi logika. Na slici 2 je predstavljen potrošački čvor sa fazi opterećenjem $\tilde{P}_0(t)$ koji je isključen Dt vremena. U trenutku t_2 taj potrošački čvor je ponovo uključen. Povratno opterećenje za taj potrošački čvor je predstavljeno fazi krivom povratnog opterećenja ($\tilde{P}_{pb}(t)$). Na osnovu slike 2 se može napisati:

$$\tilde{P}(t_2) = \tilde{P}_0(t) + \tilde{P}_{pb}(t_2) = \tilde{P}_0(t) + \tilde{k}_{pb} \tilde{P}_0(t) \quad (1)$$

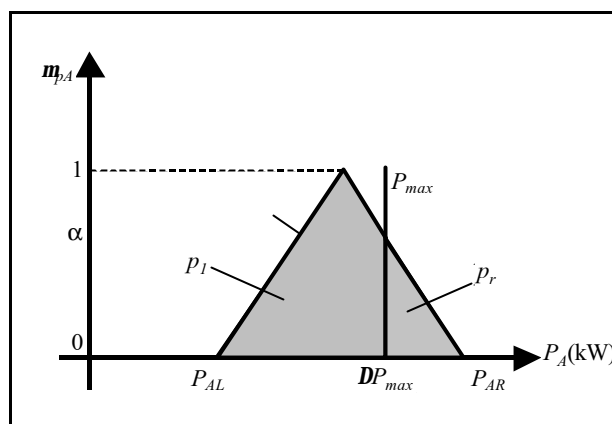
gde je:

- $\tilde{P}(t_2)$ - fazi snaga opterećenja u trenutku povratka napajanja t_2 ,
- $\tilde{P}_0(t)$ - fazi snaga u potrošačkom čvoru pre prekida napajanja,
- \tilde{k}_{pb} - fazi koeficijent povratnog opterećenja koji određuje iznos povećanja snage nakon povratka opterećenja.

2.2. Modelovanje termičkih ograničenja

Modelovanjem opterećenja u čvorovima SN distributivne mreže preko fazi brojeva, ceo model mreže prelazi u fazi domen. Na taj način, i tokovi snaga po granama postaju fazi brojevi. Na slici 3 je

predstavljen tok snage po grani A kao trougaoni fazi broj (\tilde{P}_A), dok maksimalno dozvoljni tok snage po toj grani ima determinističku vrednost (P_{max}).



Slika 3. Predstava termičkih ograničenja u fazi domenu

Ovakvo termičko ograničenje snage se može predstaviti u fazi notaciji sledećim izrazom:

$$\tilde{P}_A \sim P_{max} \quad (2)$$

Međutim, gornja relacija važi sa određenom izvesnošću. Ova izvesnost se definiše izrazom [30]:

$$S_{\tilde{P}} = \frac{p_l}{p_l + p_r} 100 \quad (\%), \quad (3)$$

gde su p_l i p_r odgovarajuće šrafirane površine levo i desno od granice P_{max} respektivno (slika 3).

Praktično, ovo fazi ograničenje znači da sa izvesnošću $S_{\tilde{P}}$ neće biti prekoračenja termičke granice. Pri tome je maksimalno moguće prekoračenje označeno sa DP_{max} .

Vrednost parametra α definiše nivo izvesnosti zadovoljenja fazi ograničenja (2). Ove vrednosti imaju različita značenja u zavisnosti od toga da li granica P_{max} preseca levu ili desnu stranu trougaonog fazi broja (TFB). U slučaju kada se P_{max} nalazi sa desne strane TFB, vrednost $\alpha=0$ znači da sa izvesnošću od 100 % neće biti preopterećenja na datom elementu ($DP_{max}=0$). U slučaju kada se P_{max} nalazi sa leve strane, TFB vrednost $\alpha=0$, znači da će se preopterećenje na datom elementu pojaviti sa izvesnošću od 100 % ($DP_{max}=P_{AR}-P_{AL}$). Promenom vrednosti parametra α , menja se presečna tačka između desne (leve) ivice fazi broja P i granice P_{max} , odnosno menja se maksimalno moguće prekoračenje DP_{max} . Na taj način se menja i odnos između površina p_l i p_r , čime se menja i odgovarajuća izvesnost. Da bi se mogle dobiti vrednosti za $S_{\tilde{P}}$ iz celog opsega (od 0 do 100 %), potrebno je menjati vrednosti parametra α u opsegu od 0 do 1 i za leve i za desne strane TFB.

2.3. Model zasnovan na fazi mešovitom celobrojnom programiranju

Objektivna funkcija:

$$\min \tilde{w} \left\{ \sum_{p=1}^{N_{cp}} (I z_p) c_p \tilde{L}_p d_F \right\} \left\{ \sum_{k=1}^{N_{cp}} \{(x_s x'_s)_k\} \right. \\ \left. c_k z_k c_k \right\} \left\{ \sum_{l=1}^{N_{nc}} \{I (x_l x'_l)\} c_l \right\} \left\{ \sum_{m=1}^{N_{no}} (x_m x'_m) c_m \right\} \quad (4)$$

Ograničenja:

Balans opterećenja u svakom čvoru:

$$\sum_{k \in T_i} (\tilde{P}_k \tilde{P}'_k) - \sum_{k \in F_i} (\tilde{P}_k \tilde{P}'_k) - \tilde{L}_i \tilde{K}_{pb} z_i, \quad (i = 1, \dots, N), \quad (5)$$

Ograničenja kapaciteta napojnih transformatora:

$$\sum_{k \in F_q} (\tilde{P}_k \tilde{P}'_k) \sim \tilde{G}_q, \quad (q = 1, \dots, N_s), \quad (6)$$

Ograničenja kapaciteta vodova:

$$\tilde{P}_k \sim P_{\max k} x_k \sim 0, \\ \tilde{P}'_k \sim P_{\max k} x'_k \sim 0, \quad (k = 1, \dots, M), \quad (7)$$

Ograničenja radikalnosti:

$$(x_k x'_k) \leq 1, \quad (k = 1, \dots, M), \quad (8)$$

Isključivost grana:

$$(x_k x'_k) \leq 1, \quad (k = M) \quad (9)$$

gde su:

- \tilde{w} - fazi kriterijumska funkcija,
- \mathbf{gb} - težinski faktori,
- d_F - trajanje prekida napajanja (vreme potrebno da se otkloni kvar),
- N, M - broj čvorova i orijentisanih grana u mreži, respektivno,
- N_S, N_{cp} - broj napojnih i potrošačkih čvorova u mreži, respektivno,
- N_{nc}, N_{no} - broj normalno zatvorenih i normalno otvorenih prekidača u mreži,
- F_q - skup napojnih čvorova,
- F_i, T_i - skup orijentisanih grana čiji je početni čvor i i čiji je krajni čvor i , respektivno,
- x_p, x_m - celobrojne promenljive koje označavaju status prekidača „ l ” i „ m ” nakon završetka procesa restauracije (pre početka restauracije prekidač „ l ” je bio zatvoren, a prekidač „ m ” je bio otvoren); $x_l=1$ i $x_m=1$ ako je prekidač zatvoren, ili

$x_l=0$ i $x_m=0$ ako je prekidač otvoren nakon završetka procesa restauracije,

- z_p - status potrošača p nakon procesa restauracije; $z_p = 1$ ako je opterećenje p restaurirano, $z_p=0$ ako ono nije restaurirano,
- \tilde{P}_k - fazi tok snage kroz granu k ,
- $P_{\max k}$ - termičko ograničenje kapaciteta grane k ,
- \tilde{L}_p - fazi opterećenje u čvoru p ,
- G_q - ograničenje kapaciteta napojnog transformatora q ,
- c_l, c_m - troškovi manipulacija,
- c_p - troškovi nerestauriranog opterećenja u čvoru p ,
- c_k - troškovi isključenja opterećenja u čvoru k , $(x_s + x'_s)_k$ - „osnovni prekidač” za čvor k ; njega čini skup svih prekidača susednih čvoru k preko kojih je moguće napajati taj čvor.

Kriterijumska funkcija (4) se sastoji od četiri člana. Prvi član definiše troškove neisporučene električne energije. Drugi član definiše troškove manipulacija isključenja potrošača u potrošačkim čvorovima. Treći i četvrti član predstavljaju troškove manipulacija NO i NZ prekidača u mreži, respektivno. Objektivna funkcija lako može biti usklađena sa aktuelnim tržišnim uslovima promenom vrednosti odgovarajućih težinskih faktora (\mathbf{g} i \mathbf{b}).

U gornjem modelu su uvedena sledeća ograničenja. Fazi jednačina (5) definiše balans snage u svakom čvoru. Fazi ograničenjima tipa (6) i (7) su definisani kapaciteti napojnih transformatora i vodova, respektivno. Fazi ograničenja (6), i (7) se tretiraju kao „meka”, što je i naglašeno uvođenjem oznake „ \sim ”. Konačno, ograničenjima (8) i (9) su definisani uslovi radikalnosti odnosno mogućnost dvosmernog toka snaga po granama, respektivno.

Nakon defazifikacije [6], gornji fazi model se može napisati u sledećem obliku:

Objektivna funkcija:

$$\min w \left\{ \sum_{p=1}^{N_{cp}} (I z_p) c_p d_F \left\{ L_p \frac{1}{3} (r_{\tilde{L}_p} l_{\tilde{L}_p}) \right\} \right\} \\ \left\{ \sum_{l=1}^{N_{nc}} \{I (x_l x'_l)\} c_l \right\} \\ \left\{ \sum_{m=1}^{N_{no}} (x_m x'_m) c_m \right\} \left\{ \sum_{p=1}^{N_{cp}} \{(x_s x'_s)_p\} c_p z_p c_p \right\} \quad (10)$$

Ograničenja:

Balans opterećenja u svakom čvoru:

$$\sum_{k \in T_i} (P_k \tilde{P}'_k) - \sum_{k \in F_i} (P_k \tilde{P}'_k) - K_{pb} L_i z_i \\ \sum_{k \in T_i} (P_k l_{\tilde{P}_k} \tilde{P}'_k l_{\tilde{P}'_k}) - \sum_{k \in F_i} (P_k l_{\tilde{P}_k} \tilde{P}'_k l_{\tilde{P}'_k}) \\ (L_i l_{\tilde{L}_i}) (K_{pb} l_{\tilde{K}_{pb}}) z_i$$

$$\begin{pmatrix} P_k & r_{\tilde{P}_k} & P'_k & r_{\tilde{P}'_k} \end{pmatrix}_{k \in T_i} \quad \begin{pmatrix} P_k & r_{\tilde{P}_k} & P'_k & r_{\tilde{P}'_k} \end{pmatrix}_{k \in F_i} \quad (L_i \\ r_{\tilde{L}_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{pb} & r_{\tilde{K}_{pb}} \end{pmatrix} z_i, \quad (i=1, \dots, N) \quad (11)$$

Ograničenja kapaciteta napojnih transformatora:

$$\begin{pmatrix} P_k & l_{\tilde{P}_k} & P'_k & l_{\tilde{P}'_k} \end{pmatrix}_{k \in F_q} \quad G_q, \quad (q=1, \dots, N_s) \quad (12a)$$

$$\begin{pmatrix} P_k & l_{\tilde{P}_k} & P'_k & l_{\tilde{P}'_k} \end{pmatrix}_{k \in F_q} \quad G_q, \quad (q=1, \dots, N_s) \quad (12b)$$

Ograničenja kapaciteta vodova:

$$P'_k - 2 r_{\tilde{P}'_k} P_{\max k} x'_k = 0,$$

$$P_k - 2 r_{\tilde{P}_k} P_{\max k} x_k = 0, \quad (k=1, \dots, M), \quad (13a)$$

$$P'_k - 2 l_{\tilde{P}'_k} P_{\max k} x'_k = 0,$$

$$P_k - 2 l_{\tilde{P}_k} P_{\max k} x_k = 0, \quad (k=1, \dots, M) \quad (13b)$$

Ograničenja radijalnosti:

$$\begin{pmatrix} x_k & x'_k \end{pmatrix}_{k \in T_i} \leq 1, \quad (k=1, \dots, N) \quad (14)$$

Isključivost grana:

$$\begin{pmatrix} x_k & x'_k \end{pmatrix} \leq 1, \quad (k=1, \dots, M) \quad (15)$$

U gornjem defazifikovanom modelu su sa $l_{\tilde{P}}$ i $r_{\tilde{P}}$ označeni levi i desni opseg fazi broja ($l_{\tilde{P}} = P_M - P_L$, $r_{\tilde{P}} = P_R - P_M$). Pored toga, proizvod dva TFB (\tilde{L} i \tilde{K}_{pb}) je definisan kao TFB, zbog toga što su levi i desni opsezi tih TFB mali u odnosu na njihove srednje vrednosti (K i L) [34]. Takođe su uvedeni i parametri \mathbf{d} gde je ($\mathbf{d} = \mathbf{I} - \mathbf{a}$). Parametri \mathbf{d}_1 i \mathbf{d}_2 definišu nivo izvesnosti zadovoljenja fazi termičkih ograničenja za napojne transformatore (12a i 12b) i vodove (13a i 13b), respektivno. Praktično, menjajući vrednosti parametara \mathbf{d}_1 i \mathbf{d}_2 , donosilac odluke menja nivo izvesnosti zadovoljenja termičkih ograničenja vodova i napojnih transformatora. Ograničenja (12a) i (13a) omogućuju promene nivoa izvesnosti zadovoljenja termičkih ograničenja za desne strane TFB, a ograničenja (12b) i (13b) za leve strane TFB. Ograničenja (12a) i (12b), kao i (13a) i (13b) nikada nisu aktivna u isto vreme (npr. kada su aktivna ograničenja (12a), ne uzimaju se u obzir ograničenja (12b)).

Na ovaj način, promenom vrednosti parametara \mathbf{d} , donosilac odluke može analizirati više različitih scenarija restauracije opterećenja. U sledećem delu je opisana procedura upravljanja rizikom za izbor optimalnog nivoa rizika koji obezbeđuje minimalne troškove restauracije.

3. PROCEDURA ZA UPRAVLJANJE RIZIKOM U RESTAURACIJI OPTEREĆENJA

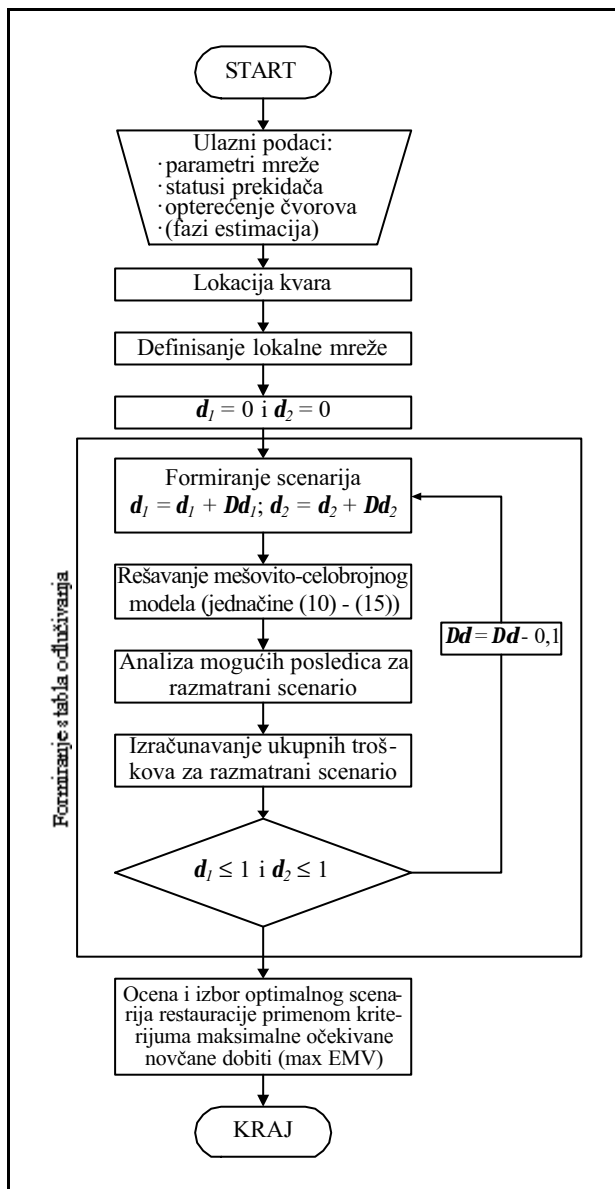
Procedura za upravljanje rizikom pri izboru najboljeg scenarija restauracije u distributivnim mrežama u prisustvu neizvesnosti je prikazana na slici 4. Ova procedura se sastoji iz nekoliko globalnih koraka. U prvom koraku se vrši učitavanje aktuelnih podataka o razmatranoj mreži (parametri, statusi preki-dača, itd.), dok se od fazi estimatora preuzimaju fazi opterećenja u svim čvorovima mreže. Zatim se vrši lokalizacija kvara i njegovo izolovanje. Na osnovu poznate topologije mreže nakon izolacije kvara, kao i opterećenja i očekivanog povratnog opterećenja u potrošačkim čvorovima, određuje se lokalna mreža [20].

Sledećih nekoliko koraka se odnose na formiranje stabla odlučivanja. Najpre se vrši zadavanje mogućih scenarija restauracije. Jedan scenario se zadaje specificiranjem para vrednosti za parametare \mathbf{d}_1 i \mathbf{d}_2 . Za tako definisane parametre \mathbf{d} se rešava mešovito-celobrojni model. Međutim, dobijeno rešenje je u fazi domenu, odnosno svi tokovi snaga po granama su fazi brojevi u određenom opsegu. Zbog toga je potrebno analizirati sve moguće posledice (sub-scenarije) u takvom fazi rešenju. Moguće posledice u opštem slučaju restauracije sa dva susedna fidera mogu biti:

- O_1 - ni jedan susedni fider nije preopterećen;
- O_2 - samo je prvi fider preopterećen;
- O_3 - samo je drugi fider preopterećen;
- O_4 - oba susedna fidera su preopterećena.

Ove posledice se dobijaju poređenjem fazi to-kova snaga po granama sa odgovarajućim termičkim granicama. Zatim se na osnovu izraza (3) računa izvesnost pojave svake od ovih mogućih posledica. Izvesnosti ovih posledica su označene sa $P(O_j, SCR_j)$. S obzirom na to da se u opštem slučaju jedan fider sastoji od više deonica koje mogu imati različite termičke granice, takav fider se tretira kao skup redno povezanih deonica. Izvesnost da jedna deonica neće biti preopterećena, određuje se na osnovu izraza (3). Izvesnost da ceo fider neće biti preopterećen, određuje se kao proizvod izvesnosti da sve njegove deonice neće biti preopterećene. Konačno, izvesnost da će neki fider biti preopterećen se računa kao $\{1 - (\text{izvesnost da fider neće biti preopterećen})\}$.

Na slici 5 je prikazano stablo odlučivanja (decision tree) za problem restauracije opterećenja u kome dva susedna fidera napajaju potrošače koji su zbog kvara srednjeg fidera ostali bez napajanja. Osnovne komponente jednog stabla odlučivanja su tačke grananja. Postoje dva tipa tačaka grananja:



Slika 4. Proces donošenja odluke u restauraciji opterećenja

čvor odluke (crta se kao kvadrat) i čvor prilika (crta se kao krug). U čvoru odluke se vrši izbor scenarija zadavanjem odgovarajuće vrednosti za parametre d . Iz čvora odluke polazi više grana, po jedna za svaki scenario. Grane koje polaze iz čvora odluke se završavaju u čvoru prilika. U čvoru prilika se analiziraju moguće posledice za taj scenario i iz svakog čvora prilika polazi onoliko grana koliko ima mogućih različitih slučajnih posledica.

Zatim se računaju troškovi svake posledice ($u(SCR_j, O_j)$). Troškovi jedne posledice sastoje se od troškova neisporučene električne energije i troškova manipulacija koji su potrebni za realizaciju razmatranog scenarija restauracije. Za neke od posledica

to su i jedini troškovi restauracije. Međutim, neke od posledica mogu imati i dodatne troškove restauracije. Ovi dodatni troškovi nastaju kada se u nekim posledicama pojavi prepterećenje na određenim deonicama. Tada je potrebno izvršiti dodatne manipulacije radi rasterećenja ili isključenja prepoterećenih deonica. Troškovi ovih dodatnih manipulacija zajedno sa eventualno dodatnim troškovima neisporučene električne energije, se dodaju troškovima restauracije za razmatrani scenario. U razmatranom primeru dodatni troškovi restauracije sigurno ne postoje u varijanti O_1 , ali se mogu pojaviti u varijantama O_2, O_3 i O_4 .

Ukupni očekivani troškovi restauracije za i -ti scenario $E(SCR_i)$ se dobijaju sumiranjem troškova za sve moguće posledice u tom scenariju:

$$E(SCR_i) = \sum_j P(O_j, SCR_i) u(SCR_i, O_j), \quad j = 1, \dots, M_i \quad (16)$$

gde je:

N - broj mogućih scenarija restauracije,

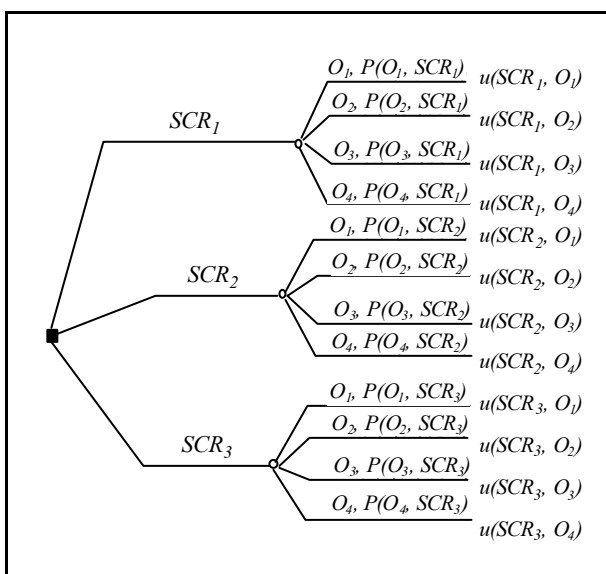
M_i - broj mogućih posledica za i -ti scenario,

$E(SCR_i)$ - očekivani trošak restauracije za scenario SCR_i .

Praktično, troškovi restauracije za svaku posledicu se penališu tako što se množe odgovarajućim izvesnostima da se takva posledica pojavi.

Kao optimalan scenario resturacije se bira onaj u kome je maksimalna očekivana novčana vrednost (maximal Expected Monetary Value - maxEMV) najveća. U slučaju restauracije maksimalna očekivana novčana vrednost odgovara scenariju u kome se minimalni ukupni očekivani troškovi resturacije i takav scenario se bira kao optimalan ($d(SCR_{opt})$):

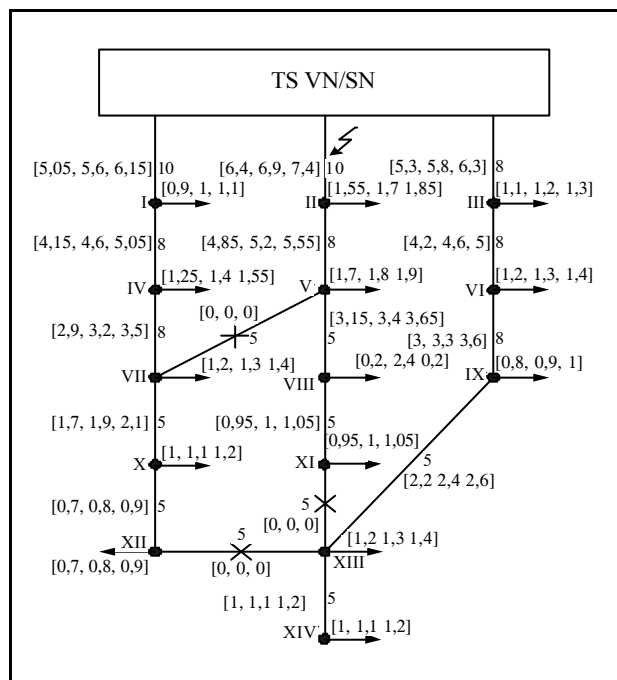
$$d(SCR_{opt}) = \min_i E(SCR_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (17)$$



Slika 5. Stablo odlučivanja

4. PRIMER PRIMENE

Predložena procedura upravljanja rizikom je testirana na realnoj gradskoj srednjenaponskoj distributivnoj mreži sa oko 2 000 čvorova. U prvom koraku, nakon lokalizacije i izolacije kvara, određena je lokalna mreža koja je prikazana na slici 10. U razmatranom slučaju lokalna mreža se sastoji od 14 čvorova (numerisanih rimskim brojevima) i 17 grana. Termički kapaciteti vodova su prikazani u relativnim jedinicama (*r.j.*) sa zadebljanim brojevima sa desne strane svakog voda. Normalno otvoreni prekidači su označeni sa „x” u sredini grana gde su locirani.



Slika 6. Lokalna mreža za kvar na prvoj deonici srednjeg fidera

Potrošači u čvorovima I, II, V i VIII su komercijalni, u čvorovima X i XI su industrijski, a u svim ostalim čvorovima su iz kategorije domaćinstava. Opterećenja u svim čvorovima su predstavljena kao trougaoni fazi brojevi (brojevi u uglastim zagradama iznad strelice koje simbolizuje potrošača). Cena neisporučenog kWh varira u zavisnosti od tipa ugovora koje potrošači imaju sa dobavljačem električne energije. Cene neisporučenog kWh za industrijske potrošače je $c_i=1,2$ r.n.j. (relativne novčane jedinice), za komercijalne potrošače je $c_c=1,7$ r.n.j., a za domaćinstva je $c_h=0,35$ r.n.j.. Smatra se da su troškovi otvaranja i zatvaranja kod svih prekidača jednaki. Troškovi manipulacija sa neautomatizovanim prekidačima su $c_{no}=c_{nc}=c_d=0,05$ r.n.j., a troškovi

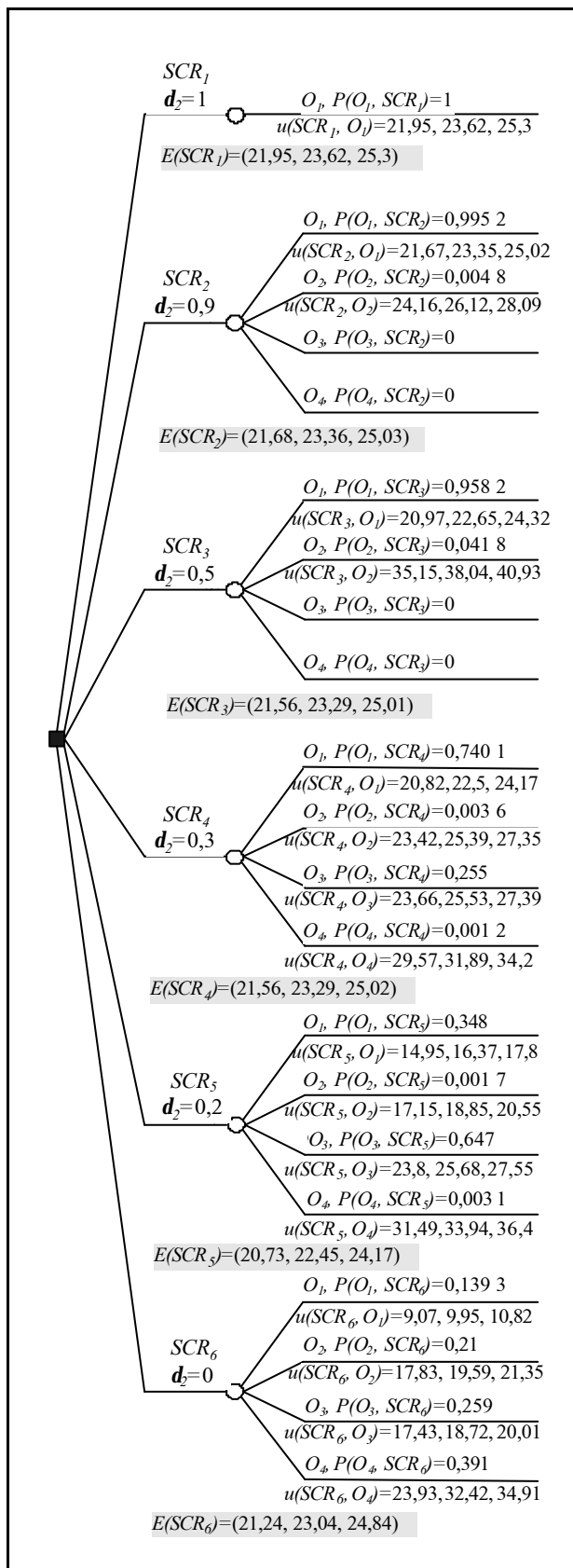
manipulacije sa daljinski kontrolisanim prekidačima su $c_{no}=c_{nc}=c_d=0,005$ r.n.j.

Stablo odlučivanja za izbor najboljeg scenarija restauracije za razmatrani slučaj kvara je prikazano na slici 7. Zbog preglednosti su prikazani samo rezultati dobijeni rešavanjem mešovitog celobrojnog modela (10-15) za desne strane TFB, odnosno kada su ograničenja (12a) i (13a) aktivna. U ovome slučaju vrednosti parametra d_2 su menjana u opsegu od 0 do 1, sa korakom od $\Delta d_2=0,1$. Pri tome je fiksirana vrednost parametra na $d_1=1$, jer je usvojena pretpostavka da napojni transformator ima dovoljan kapacitet i da ne postoji mogućnost njegovog preopterećenja. Mešovito-celobrojnim modelom je dobijeno jedanaest rešenja među kojima je identifikovano šest mogućih scenarija restauracije (SCR_1, \dots, SCR_6), zbog toga što se pet scenarija ponavlja. Na isti način, za leve strane TFB je dobijeno devet rešenja koja daju tri moguća scenarija restauracije (SCR_7, SCR_8, SCR_9).

Na slici 7 je svaki od šest scenarija označen sa odgovarajućom granom iznad koje je naznačena pripadajuća vrednost parametra d_2 . Pošto u procesu restauracije učestvuju dva susedna fidera, maksimalan broj mogućih posledica za svaki scenario je četiri (O_1, \dots, O_4 , kao što je i objašnjeno u prethodnom delu). Svaka posledica (subscenarij) je označena odgovarajućom granom. Izvesnosti za sve moguće posledice (subscenarije) restauracije ($P(O_i, SCR_j)$) su date iznad odgovarajućih grana, a fazi troškovi restauracije za takve subscenarije ($u(O_i, SCR_j)$) su dati ispod odgovarajuće grane, pri čemu je usvojeno da je vreme potrebno da se otkloni kvar 5 časova. Konačno, u zatamnjenim pravougaonicima su dati ukupni očekivani fazi troškovi restauracije za svaki scenario.

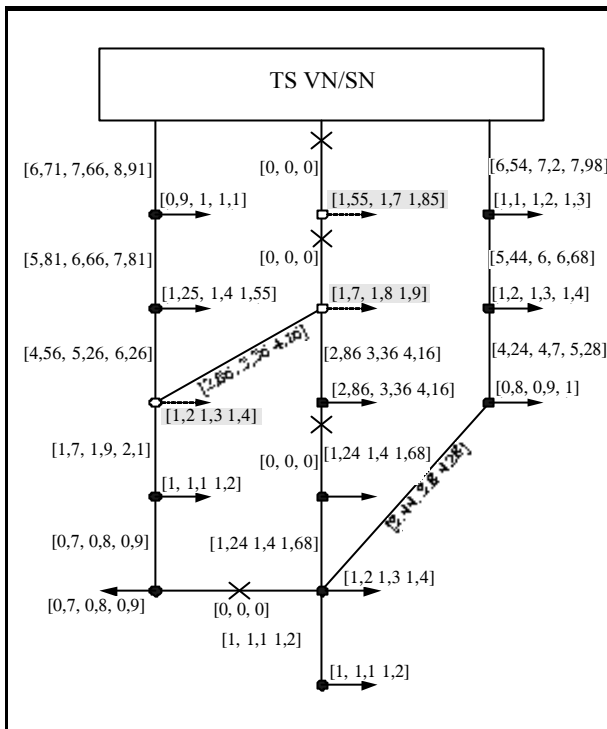
Poređenjem ukupnih očekivanih fazi troškova restauracije svih dobijenih scenarija je izabran optimalni scenario SCR_5 ($d_2=0,2$), koji je na slici 7 označen sa „*”. U narednom delu su detaljnije analizirani scenario SCR_7 ($d_2=1$) i optimalni scenario sa minimalnim ukupnim očekivanim troškovima restauracije SCR_5 ($d_2=0,2$).

U scenariju restauracije SCR_7 ($d_2=1$) ne postoji mogućnost da bilo koji fider bude preopterećen, odnosno postoji samo jedna moguća posledica O_7 čija izvesnost je jednaka jedinici ($P(O_7, SCR_7)=1$). Konfiguracija mreže za ovaj scenario restauracije je prikazana na slici 8. U fazi opterećenjima čvorova je uvažen efekat povratnog opterećenja pomoću fazi koeficijenta povratnog opterećenja čija je vrednost $\tilde{K}_{pb}=(1,3, 1,4, 1,6)$. Čvorovi u kojima nije restaurirano opterećenje su označeni svetlim krugovima i isprekidanim strelicama (čvorovi II, V i VII), a odgovarajući iznos nerestauriranog opterećenja je dat u



Slika 7. Stablo odlučivanja za razmatrani problem restauracije napajanja (za desne strane TFB)

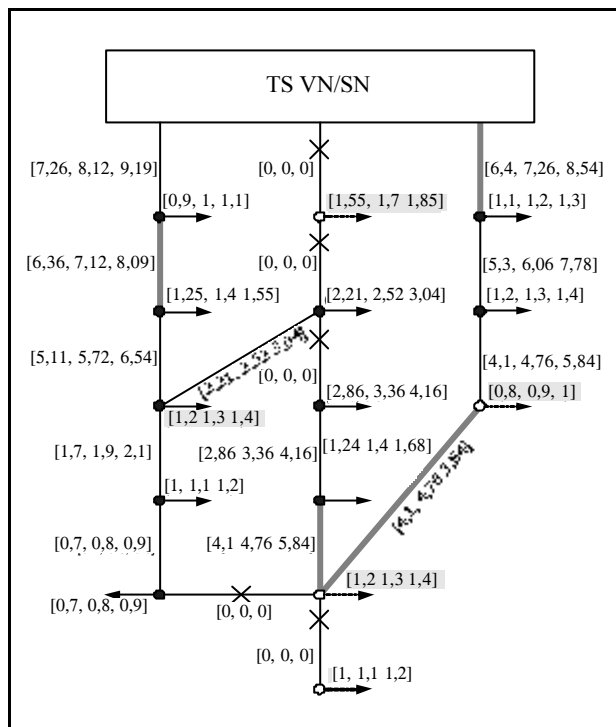
zatamnjenom pravougaoniku. Ukupni iznos nerestauriranog fazi opterećenja je (4,45, 4,8, 5,15) r.j., dok su ukupni očekivani fazi troškovi restauracije (21,95, 23,62, 25,30) r.n.j.. U ovom scenariju maksimalno je favorizovana sigurnost, što je najbliže klasičnom determinističkom pristupu.



Slika 8. Scenario restauracije SCR₁ (za $d_1=d_2=1$)

Prihvatanjem mogućnosti da neke grane (fide-ri) budu preopterećene pronađen je scenario restauracije SCR₅ u kome je postignut optimalan balans između nivoa izvesnosti tih preopterećenja i dodatnih troškova koje ona prouzrokuju. Grane koje u ovom slučaju mogu biti preopterećene su prikazane zadebljanim linijama na slici 9. Opterećenje nije restaurirano u čvorovima (II, IX, XIII i XIV). Ukupni iznos nerestauriranog fazi opterećenja je (4,55; 5; 5,45) r.j. dok su ukupni očekivani fazi troškovi restauracije (20,73; 22,45; 24,17) r.n.j. Ovi troškovi su manji u odnosu na klasični pristup iz scenarija SCR₁, pa je zbog toga u scenariju SCR₅ i rizik od finansijskih gubitaka (troškova restauracije) manji.

Daljim povećanjem izvesnosti preopterećenja grana dobijeni su scenariji SCR₆-SCR₉. U takvim scenarijima je i veća izvesnost da će se pojaviti dodatni troškovi manipulacija (dodatne manipulacije i dodatna isključenja potrošača) koje su potrebne da bi se rešio problem takvih preopterećenja. Na taj način ti scenariji su rizičniji, odnosno imaju veću vrednost ukupnih očekivanih fazi troškova restauracije od optimalnog scenarija SCR₅.



Slika 9. Optimalni scenario restauracije SCR₅

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izložena nova optimizaciona procedura, zasnovana na upravljanju rizikom, za restauraciju opterećenja distributivnih mreža u prisustvu neizvesnosti. Cilj ove procedure je smanjivanje (minimizacija) rizika od značajnih troškova restauracije odnosno minimizacija očekivanih troškova restauracije. Ovaj cilj je postignut primenom fazi logike i odgovarajućih alata za merenje i upravljanje rizikom. Pokazano je da predložena procedura predstavlja veoma dobar alat za donošenje odluke u procesu restauracije opterećenja i može značajno poboljšati taj proces u uslovima otvorenog (konkurentnog) tržišnog okruženja.

6. LITERATURA

- [1] C. H. Castro, J. B. Bunch, Terry M. Topka, GENERALIZED ALGORITHMS FOR DISTRIBUTION FEEDER DEPLOYMENT AND SECTIONALIZING, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -99, No. 2, March-April 1980.
- [2] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi, OUTAGE STATE OPTIMAL LOAD ALLOCATION BY AUTOMATIC SECTIONALIZING SWITCHES OPERATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, October 1987.

- [3] Felix F. Wu, A. Monticelli, ANALYTICAL TOOLS FOR POWER SYSTEMS RESTORATION - CONCEPTUAL DESIGN, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 3, No. 1, February 1988.
- [4] K. Aoki, T. Satoh, M. Itoh, H. Kuwabara, H. Kanezashi VOLTAGE DROP CONSTRAINED RESTORATION OF SUPPLY BY SWITCH OPERATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 1267-1274, July 1988.
- [5] K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satoh, H. Kuwabara, A NEW ALGORITHM FOR SERVICE RESTORATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1832-1839, July 1989.
- [6] J. Nahman, G. Strbac, A NEW ALGORITHM FOR SERVICE RESTORATION IN LARGE-SCALE URBAN DISTRIBUTION SYSTEMS, Electric Power Systems Research, No. 29, pp. 181-192, 1994.
- [7] T. Nagata, H. Sasaki, M. Kitagawa, A METHOD OF DETERMINING TARGET CONFIGURATION FOR POWER SYSTEMS RESTORATION BY MEANS OF MIX INTEGER PROGRAMMING APPROACH, TRANS. IEE Japan, Vol. 114-B, No. 2, pp. 179-185, 1994.
- [8] D. S. Popović, R. M. Ćirić, Z. A. Gorečan, AN EFFICIENT MULTI-OBJECTIVE ALGORITHM FOR DISTRIBUTION NETWORK RESTORATION; DA/DSM DistribuTECH Europe 98; London, UK, Session 21, Paper 199, October 1998.
- [9] K. N. Miu, H-D. Chiang and R. J. McNulty, MULTI-TIER SERVICE RESTORATION THROUGH NETWORK RECONFIGURATION AND CAPACITOR CONTROL FOR LARGE-SCALE AND RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1001-1007, August 2000.
- [10] A. L. Morelato, A. Monticelli, HEURISTIC SEARCH APPROACH TO DISTRIBUTION SYSTEM RESTORATION, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2235-2241, October 1989.
- [11] E. N. Dialynas, D. G. Michos, INTERACTIVE MODELING OF SUPPLY RESTORATION PROCEDURES IN DISTRIBUTION SYSTEM OPERATION, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1847-1854, July 1989.
- [12] N. D. R. Sarma, V. C. Prasad, K. S. Prakasa Rao, V. Sankar, A NEW NETWORK RECONFIGURATION TECHNIQUE FOR SERVICE RESTORATION IN DISTRIBUTION NETWORKS, IEEE, 91 SM 401-0, PWRD.
- [13] J. S. Wu, K. L. Tomsovic, C. S. Chen, A HEURISTIC SEARCH APPROACH TO FEEDER SWITCHING OPERATIONS FOR OVERLOAD, FAULTS, UNBALANCED FLOW AND MAINTENANCE

- NANCE, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1579-1585, October 1991.
- [14] D. Shirmohammadi, SERVICE RESTORATION IN DISTRIBUTION NETWORKS VIA NETWORK RECONFIGURATION, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 952-958, April 1992.
- [15] Yuan-Yih Hsu, H. M. Huang, H. C. Kuo, S. K. Peng, C. W. Chang, K. J. Chang, H. S. Yu, C. E. Chow, R. T. Kuo, DISTRIBUTION SYSTEM SERVICE RESTORATION USING A HEURISTIC SEARCH APPROACH, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 734-740, April 1992.
- [16] N. D. R. Sarma, S. Ghosh, K. S. Prakasa Rao, Manda Srinivas, REAL TIME SERVICE RESTORATION IN DISTRIBUTION NETWORKS - A PRACTICAL APPROACH, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2064-2070, October 1994.
- [17] C. Ucak, A. Pahwa, AN ANALYTICAL APPROACH FOR STEP-BY STEP RESTORATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS FOLLOWING EXTENDED OUTAGES, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1717-1723, July 1994.
- [18] Qin Zhou, Darius Shirmohammadi, W. -H. Edwin Liu, DISTRIBUTION FEEDER RECONFIGURATION FOR SERVICE RESTORATION AND LOAD BALANCING, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 724-729, May 1997.
- [19] Karen Nan Miu, Hsiao-Dong Chiang, Bentao Yuan, Gary Darling, FAST SERVICE RESTORATION FOR LARGE-SCALE DISTRIBUTION SYSTEMS WITH PRIORITY CUSTOMERS AND CONSTRAINTS, IEEE Trans. Power Systems, 0-7803-3713-1/97.
- [20] D. S. Popovic, R. M. Ciric, A Multi OBJECTIVE ALGORITHM FOR DISTRIBUTION NETWORKS RESTORATION; IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 3, pp. 1134-1141, July 1999.
- [21] S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, COMPARATIVE STUDY OF MODERN HEURISTIC ALGORITHMS TO SERVICE RESTORATION IN DISTRIBUTION SYSTEM, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No. 1, pp. 173-181, January 2002.
- [22] C. C. Liu, S. J. Lee, S. S. Venkata, An Expert SYSTEM OPERATIONAL AID FOR RESTORATION AND LOSS REDUCTION OF DISTRIBUTION SYSTEM, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 619-626, May 1988.
- [23] Y. Y. Hsu, H. M. Huang, DISTRIBUTION SYSTEM SERVICE RESTORATION USING THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPROACH AND PATTERN RECOGNITION METHOD, IEE Proc. Gener. Transm. Distribut. , Vol. 142, No. 3, May 1995.
- [24] T. Nagata, H. Sasaki, R. Yokoyama, POWER SYSTEMS RESTORATION BY JOINT USAGE OF EXPERT SYSTEM AND MATHEMATICAL PROGRAMMING APPROACH, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1473-1479, August 1995.
- [25] Y-T. Hsiao, C-Y. Chien, ENHANCEMENT OF RESTORATION SERVICE IN DISTRIBUTION SYSTEM USING A COMBINATION FUZZY-GA METHOD, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1394-1400, November 2000.
- [26] C-S. Chen, Y-L. Ke, J-S. Wu, M-S. Kang, APPLICATION OF PETRI NETS TO SOLVE DISTRIBUTION SYSTEM CONTINGENCY BY CONSIDERING CUSTOMER LOAD PATTERNS, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 417-423, May 2002.
- [27] E. N. Dialynas, D. G. Michos, PROBABILISTIC ASSESSMENT OF SERVICE RESTORATION IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1891-1898, October 1991.
- [28] Han-Ching Kuo, Yuan-Yih Hsu, DISTRIBUTION SYSTEM LOAD ESTIMATION AND SERVICE RESTORATION USING A FUZZY SET APPROACH, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, No. 4, pp. 1950-1957, October 1993.
- [29] S-J. Lee, S-I. Lim, B-S. Ahn, SERVICE RESTORATION OF PRIMARY DISTRIBUTION SYSTEMS BASED ON FUZZY EVALUATION OF MULTI-CRITERIA, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163, August 1998.
- [30] J. Nahman, D. Peric, THE QUALITY OF SUPPLY ASSESSMENT OF THE TECHNICAL LIMITS OF A DISTRIBUTION NETWORK, Proceedings of the 16th conference on electricity distribution CIRED, Nice, 3-6 June 1999.
- [31] R. E. Brown, A. P. Hanson, IMPACT OF TWO-STAGE SERVICE RESTORATION ON DISTRIBUTION RELIABILITY, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 624-629, November 2001.
- [32] G. Anderson, R. Entriken and P. Nitu, RISK ASSESSMENT AND FINANCIAL MANAGEMENT, Tutorial at IEEE PES Winter Meeting, pp. 36-51, 1999.
- [33] G. J. Klir, B. Yuan, FUZZY SETS AND FUZZY LOGIC, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [34] M. E. El-Hawary, ELECTRIC POWER APPLICATIONS OF FUZZY SYSTEMS, New York: IEEE PRESS, 1998.
- [35] J. E. McDonald, A. M. Bruning, W. R. Mahieu, COLD LOAD PICKUP, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp. 1384-1386, July/August 1979.

Rad je primljen u uredništvo 07. 02. 2003. godine



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



Željko N. Popović (1963) je diplomirao na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1988. godine, a magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1999. godine. Od 1992. godine radi u JP „Elektrovojvodina”, u Bačkoj Topoli. Oblasti njegovog stručnog rada su upravljanje opterećenjem i planiranje razvoja distributivnih mreža. Trenutno radi doktorsku tezu iz oblasti planiranja i upravljanja u distributivnim mrežama.



Vojin Đ. Kerleta (1971) je diplomirao 1998. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smer - elektroenergetika. Radio je u JP „Elektrovojvodina”, u Zrenjaninu, a zatim na Tehničkom fakultetu „Mihajlo Pupin” u Zrenjaninu kao asistent na predmetu Osnovi elektrotehnike, gde je i danas zaposlen. Njegovo stručno interesovanje čine planiranje i operativno upravljanje u distributivnim mrežama. Trenutno radi magistarski rad iz oblasti restauracije u distributivnim mrežama.

Proračuni struja nesimetričnih kratkih spojeva u nadzemnim elektrodistributivnim mrežama na konzumu JP „Elektrodistribucija Beograd”

Stručni rad
UDK: 621.3.064.1

Rezime:

Ovaj rad iznosi proračunima dobijene vrednosti nesimetričnih struja kratkih spojeva i stacionarnih prenapona u elektrodistributivnim mrežama sa radijalnim nadzemnim vodovima 110 kV, 35 kV i 10 kV, tip-skih preseka, a u zavisnosti od tretmana neutralne tačke mreža i dužine vodova. Proračuni su rađeni za vrednost prelazne impedanse na mestu kvara $Z_k=0 \text{ W}$ (tzv. metalni zemljospoj).

U drugom delu rada određene su maksimalne vrednosti prelaznog otpora na mestu kvara, $R_k \text{ (W)}$, koje može da obuhvati klasična relejna zaštita u izvornim TS, u zavisnosti od dužine vodova, podešenosti reagovanja relejne zaštite, kao i tretmana neutralne tačke mreža.

Zaključuje se da pri izgradnji perspektivne elektrodistributivne mreže treba voditi računa o tome da na svim naponskim nivoima dužine vodova budu optimalne - s obzirom na mogućnosti zaštitnih uređaja da selektivno registruju kvar i da se sekcionisanjem radijalne mreže omogući adekvatno redukovanje obima ispada usled kvarova.

Ključne reči: nadzemne mreže, nesimetrične struje kratkih spojeva, prelazna otpornost na mestu kvara, prenaponi pri jedнопolnim zemljospojevima

Abstract:

CALCULATION OF NON-SYMMETRICAL SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN OVERHEAD ELECTRIC POWER DISTRIBUTION NETWORKS OF „ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD”

This paper deals with calculated values of non-symmetrical short-circuit currents and their respective overvoltages in electric distribution networks with radial overhead lines 110 kV, 35 kV and 10 kV, with typical sections depending on the treatment of neutral network point and lines length. The calculations were made for the value of the transient impedance at the faulty place $Z_k=0 \text{ W}$ (so-called metal earthing).

The second part of the paper presents maximum values of transient resistance at the faulty place $R_k \text{ (W)}$, which may be covered by the conventional relay protection in substations, depending on the line length, adjustment of relay protection reaction, as well as the neutral network point treatment.

It is concluded that in construction of the scheduled electric power distribution network, it should be taken into account that the line lengths should be optimal at all voltage levels, with respect to the possibilities of selective fault control by protective devices, where the radial network sectioning enables adequate reduction of outages due to faults.

Key words: overhead networks, non-symmetrical short-circuit currents, transient resistance at faulty place, overvoltage in single-pole earthing

1. UVOD

Beogradski elektroenergetski čvor, sa mrežama 110 kV i 35 kV, počeo je da se izgrađuje počev od 1953. godine sa prvom transformatorskom stanicom (TS) 110/35 kV/kV (Beograd II) i čitavim nizom TS 35/10 kV/kV. Intenzivan razvoj potrošnje električne energije implicirao je izgradnju prve TS 220/110 kV/kV oko 1960. godine (Beograd III) i prve TS 400/220 kV/kV oko 1970. godine (Beograd VIII). Te iste, 1970. godine u elektrodistributivnoj mreži u pogonu je i prva TS sa direktnom transformacijom 110/10 kV/kV. Danas je u pogonu oko stotinak visokonaponskih TS, i oko 6 000 TS 10/0,4 kV/kV sa cca 600 000 potrošača, na površini konzuma od cca 2 500 km².

Sa aspekta proračuna nesimetričnih struja kratkih spojeva treba napomenuti da je tretman neutralne tačke mreža danas različit, te su mreže 400 kV, 220 kV, 110 kV i 0,4 kV sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom, neutralna tačka mreže 35 kV uzemljena preko male otpornosti u TS 110/35 kV/kV sa ograničenjem struje jednofaznog zemljospoja na 300 A (u kablovskim mrežama 35 kV) do 1 000 A (na područjima sa ekstremno dugačkim nadzemnim vodovima 35 kV), a neutralna tačka mreže 10 kV takođe uzemljena preko male otpornosti od 20 Ω u TS 110/10 kV/kV i 35/10 kV/kV sa ograničenjem struje jednofaznog zemljospoja na 300 A (kablovska mreža 10 kV, kao i neizbežno pripadajuća nadzemna mreža zanemarljive prostranosti), deo mreže na nekoliko mikrореона uzemljen preko otpornosti od 400 Ω sa ograničenjem struje jednofaznog zemljospoja na 15 A (ekstremno dugačke nadzemne mreže 10 kV), dok se najveći deo nadzemnih mreža 10 kV i danas nalazi u pogonu sa izolovanom neutralnom tačkom. Ovakvo različiti tretmani neutralne tačke srednjenaponskih elektrodistributivnih mreža posledica su uslova koji

su postavljani pred pojedine naponske nivoe mreža u pogledu ograničenja prenapona pri zemljospojevima, kao i u pogledu ograničenja vrednosti struja kvara pri svim vrstama zemljospojeva.

Ovim radom će biti iznešeni rezultati proračuna nesimetričnih struja zemljospojeva u nadzemnim radijalnim elektrodistributivnim mrežama 110 kV, 35 kV i 10 kV u uslovima postojećih tretmana neutralne tačke mreža na konzumu JP „Elektrodistribucije-Beograd” (JP EDB). Na taj način će se doći do zaključaka o uslovima koji treba da budu ispunjeni još u fazi izrade dugoročnih planskih programa za izgradnju svih mreža da se tretmanom neutralne tačke nadzemnih mreža postignu adekvatni efekti na ograničenju i vrednosti nesimetričnih struja zemljospojeva i pripadajućih prenapona u elektrodistributivnim mrežama. Takođe, u uslovima jednofaznih zemljospojeva, biće prikazane maksimalne vrednosti prelazne otpornosti na mestu kvara koje mogu da budu registrovane tj. obuhvaćene podešenošću klasične relejne zaštite na vodovima.

2. VREDNOSTI NESIMETRIČNIH STRUJA KRATKIH SPOJEVA U NADZEMNIM ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA NA KONZUMU JP EDB

Proračuni nesimetričnih struja svih vrsta zemljospojeva baziraju se na rešavanju opštih i dopunskih jednačina kratkih spojeva sa impedansama direktnog, inverznog i nultog redosleda od napojne TS do mesta kvara [3, 4]. Ovde su u priloženim tabelama 1, 2 i 3 prikazani rezultati proračuna vrednosti struja zemljospojeva u zavisnosti od tretmana neutralne tačke mreža te dužine radijalnih nadzemnih vodova 110 kV, 35 kV i 10 kV. Proračuni su rađeni za slučaj da prelazna impedansa na mestu kvara ima vrednost $Z_k=0 \Omega$ (tzv. „metalni zemljospoj”).

Tabela 1.

Vrednosti struja simetričnih i nesimetričnih kratkih spojeva u zavisnosti od dužine dalekovoda 110 kV u radijalnom pogonu

Dužina dalekovoda 110 kV AIČ 3x240 mm ²	Trofazni kratki spoj (kA)	Dvofazni kratki spoj (kA)	Jednofazni zemljospoj (mreža direktno uzemljena) (kA)
0 km	13,75	11,90	7,02
5 km	8,40	7,27	4,76
10 km	7,66	6,63	3,96
50 km	2,73	2,36	1,44
100 km	1,51	1,31	0,65

Napomena: Vodovi 110 kV se napajaju iz TS 400/110 kV/kV sa energetske autotransformatorima sprege namotaja Yy0d5

Tabela 2.

Vrednosti struja simetričnih i nesimetričnih kratkih spojeva u zavisnosti od dužine dalekovoda 35 kV pri različitom tretmanu neutralne tačke mreže 35 kV

Dužina dalekovoda 35 kV AlČ 3x70 mm ²	Trofazni kratki spoj (A)	Dvofazni kratki spoj (A)	Jednofazni zemljospoj		
			Direktno uzemljena mreža (A)	Neutralna tačka uzemljena preko $R_{NT}=30 \Omega$ (A)	Neutralna tačka uzemljena preko $R_{NT}=67 \Omega$ (A)
0 km	4 920	4 260	2 964	690	300
3 km	4 150	3 590	2 470	649	295
10 km	2 370	2 050	1 431	558	277
20 km	1 490	1 280	924	469	257
25 km	1 250	1 080	784	433	247
30 km	1 080	930	680	402	238
35 km	950	820	598	375	229
40 km	850	730	538	351	221

Napomena: Vodovi 35 kV se napajaju iz TS 110/35 kV/kV sa energetske transformatorima sprege namotaja Yy0d5

Tabela 3.

Vrednosti struja simetričnih i nesimetričnih kratkih spojeva u zavisnosti od dužina dalekovoda 10 kV pri različitom tretmanu neutralne tačke mreže 10 kV

Dužina dalekovoda 10 kV AlČ 3x70 mm ²	Trofazni kratki spoj (A)	Dvofazni kratki spoj (A)	Jednofazni zemljospoj					
			Direktno uzemljena mreža		Mreža uzemljena preko $R_{NT} = 20 \Omega$		Mreža uzemljena preko $R_{NT} = 400 \Omega$	
			(A)	Z_o/Z_d	(A)	Z_o/Z_d	(A)	Z_o/Z_d
0 km	7 470	6 460	6 800	1 (0°)	298	67,98 (-84,7°)	14,99	1 357,5 (-84,8°)
1 km	4 960	4 290	3 600	1,77 (8,4°)	291	45,60 (-65,1°)	14,97	902,7 (-67,2°)
5 km	1 900	1 644	1 200	2,39 (22,47°)	263	18,20 (-42,2°)	14,91	347,5 (-49°)
10 km	1 060	917	640	2,52 (26,5°)	232	10,70 (-31,8°)	14,83	193,5 (-43,9°)
12 km	900	778	550	2,55 (27,2°)	221	9,30 (-28,8°)	14,77	164,3 (-42,9°)
14 km	780	675	480	2,56 (27,8°)	210	8,30 (-26,1°)	14,76	142,8 (-42,1°)
16 km	690	597	420	2,57 (28,3°)	200	7,50 (-23,7°)	14,73	126,3 (-41,5°)
18 km	620	536	380	2,57 (28,6°)	191	6,87 (-21,5°)	14,68	112,6 (-40,9°)
20 km	560	484	340	2,60 (28,9°)	183	6,40 (-19,4°)	14,60	102,6 (-40,4°)

Napomena: Mreža 10 kV se napaja iz TS 35/10 kV/kV sa energetske transformatorima sprege namotaja Dy5

Priložene tabele sa proračunatim vrednostima nesimetričnih struja zemljospojeva govore da se direktnim uzemljenjem neutralne tačke nadzemnih mreža postižu značajno veće vrednosti struja nesimetričnih zemljospojeva pri „bliskim kvarovima” do napojnih TS, dok se uzemljenjem neutralne tačke mreža preko male otpornosti postižu veoma stabilne vrednosti struja zemljospojeva maltene nezavisno od dužine vodova koji su pogođeni kvarom. Sa povećanjem vrednosti otpornosti u neutralnoj tački mreža (npr. za mrežu 10 kV na vrednost od 400 Ω) struje jednofaznih zemljospojeva se značajno redukuju i dobijaju vrednosti kao u uslovima da je neutralna tačka mreže izolovana. Međutim, u ovim uslovima se postiže pouzdano registrovanje i ovih malih vrednosti struja kvara odgovarajućom relejnom zaštitom (npr. vatmetarskim relejima tipa RE 55) kao i selektivno isključenje vodova pogođenih kvarom.

3. MAKSIMALNE VREDNOSTI PRELAZNE OTPORNOSTI NA MESTU KVARA KOJE MOGU BITI OBUHVACENE RELEJNOM ZAŠTITOM NA VODOVIMA U IZVORNIM TS

Vrednosti nesimetričnih struja zemljospojeva u radijalnim nadzemnim elektrodistributivnim mrežama, u zavisnosti od tretmana neutralne tačke mreža i dužine vodova, određene su za slučaj da prelazna impedansa na mestu kvara ima vrednost $Z_k=0 \Omega$ (tzv. „metalni zemljospoj”). Međutim, u realnim uslovima prelazna otpornost na mestu kvara može da ima i značajne vrednosti, od nekoliko Ω do nekoliko stotina Ω, kao što je dato u [3].

Kako je zemljospojna zaštita na nadzemnim vodovima na konzumu JP EDB podešena na prestrujnim relejima IR1, uključenih u sekundarna kola strujnih transformatora tako da registruju trostruke nulte komponente struja na vodovima na 60 A (odnosno 4 A na vatmetarskim relejima RE55 sa cos Fi spregom), to se maksimalna vrednost prelaznog otpora na mestu kvara, koja može da bude obuhvaćena

na zemljospojnom relejnom zaštitom, može odrediti prema relaciji:

$$I_z = \frac{3U_{fr}}{\sqrt{2R_d R_o + 3R_k^2 + 2X_d X_o^2}} \quad 0,06 \text{ kA (ili } 0,004 \text{ kA)}$$

odnosno, za 0,06 kA:

$$3R_k = \sqrt{\frac{3U_{fr}^2}{0,06^2} - 2X_d X_o^2 - 2R_d R_o}$$

Za nadzemne mreže 35 kV i 10 kV tipskih preseka, maksimalne vrednosti prelazne otpornosti na mestu kvara koje mogu biti obuhvaćene zemljospojnom relejnom zaštitom su date u tabeli 4 i 5.

4. MAKSIMALNE DUŽINE NADZEMNIH VODOVA 110 kV, 35 kV I 10 kV SA ASPEKTA SIGURNOG REGISTROVANJA I ISKLJUČENJA KVAROVA

Priložene tabele 1 do 3, te 4 i 5 govore da su sa aspekta registrovanja i isključenja struja trofaznog kratkog spoja stroži uslovi u pogledu dozvoljenih dužina vodova nego sa aspekta registrovanja i isključenja struja zemljospojeva. Naime, ukoliko se želi da se struje trofaznog kratkog spoja isključe bez vremenskog zatezanja, i da ne budu manje od 2 kA, dužine vodova 110 kV, 35 kV i 10 kV ne bi trebalo da budu veće od 70 km, 12 km i 5 km respektivno; ukoliko se, međutim, želi vremensko zatezanje pri isključenju struja trofaznog kratkog spoja (reda 0,5 do 1 sec), onda bi nadzemni radijalni vodovi 110 kV, 35 kV i 10 kV mogli da budu do dužina reda 150 km, 30 km i 10 km, respektivno (ove uslove nameću prelazne pojave kod uključenja energetskih transformatora u prijemnim TS na kraju vodova).

Uzemljavanjem neutralne tačke mreža, omogućava se dovoljno pouzdano i sigurno registrovanje jednofaznih i dvofaznih zemljospojeva i u uslovima značajno veće dužine pojedinačnih vodova koji polaze iz pripadajuće izvorne TS.

Tabela 4.

Maksimalna vrednost prelazne otpornosti na mestu kvara R_k (Ω) za vod 35 kV, koja može da bude registrovana klasičnom relejnom zaštitom

Dužina dalekovoda 35 kV AlČ 3x70 mm ²	Prelazna otpornost na mestu kvara R_k (Ω)	
	Mreža uzemljenja preko otpornosti od 30 Ω a zemljospojna zaštita podešena na 60 A	Mreža uzemljena preko otpornosti od 67 Ω a zemljospojna zaštita podešena na 60 A
0 km	max 308 Ω	max 270 Ω
2 km	max 307 Ω	max 269 Ω
10 km	max 303 Ω	max 265 Ω
20 km	max 298 Ω	max 260 Ω
30 km	max 293 Ω	max 255 Ω
40 km	max 288 Ω	max 250 Ω

Tabela 5.

Maksimalna vrednost prelazne otpornosti na mestu kvara R_k (Ω) za vod 10 kV, koja može da bude registrovana klasičnom relejnom zaštitom

Dužina dalekovoda 10 kV AIČ 3x70 mm ²	Prelazna otpornost na mestu kvara R_k (Ω)	
	Mreža uzemljenja preko otpornosti od 20 Ω a zemljospojna zaštita podešena na 60 A	Mreža uzemljena preko otpornosti od 400 Ω a zemljospojna zaštita podešena na 4 A
0 km	max 79,9 Ω	max 1 100 Ω
1 km	max 79,5 Ω	max 1 099 Ω
5 km	max 77,3 Ω	max 1 097 Ω
10 km	max 75,0 Ω	max 1 095 Ω
20 km	max 69,7 Ω	max 1 091 Ω

Maksimalne dozvoljene dužine vodova u uslovima izolovane neutralne tačke mreža su određene sasvim drugim relacijama, i ukupna kapacitivnost takve mreže određuje trenutak kada treba uzemljiti neutralnu tačku mreže.

5. NAPONI ISPRAVNIH FAZA NA MESTU KVARA PRI ZEMLJOSPOJEVIMA

Naponi ispravnih faza u stacionarnom režimu pri svim vrstama nesimetričnih kratkih spojeva u mrežama zavise od odnosa impedansi nultog i direktnog redosleda od napojne TS do mesta kvara. Vrednosti odnosa impedansi Z_o/Z_d u zavisnosti od dužine radijalnih nadzemnih vodova i tretmana neutralne tačke mreže su prikazane u tabeli 3 pri jednofaznim zemljospojevima za radijalne nadzemne vodove 10 kV; slična je situacija i sa radijalnim nadzemnim vodovima 110 kV i 35 kV.

Kako govori tabela 3, odnosi Z_o/Z_d u nadzemnoj mreži 10 kV su u opsegu od 1 do 2,6 u direktno

uzemljenoj mreži 10 kV sa vodovima dužine do 20 km, u mrežama uzemljenim preko otpornosti od 20 Ω u opsegu od 6,4 do 67, a u mreži uzemljenoj preko otpornosti od 400 Ω u opsegu od 102,6 do 1 357.

U priloženoj tabeli 6 su prikazane vrednosti napona ispravnih faza na mestu kvara pri jednofaznim zemljospojevima pri različitom tretmanu neutralne tačke mreže 10 kV, naravno u zavisnosti od dužine radijalnih nadzemnih vodova.

Kako priložene tabele pokazuju, pri direktno uzemljenoj neutralnoj tački nadzemne mreže 10 kV postižu se prenaponi na ispravnim fazama u granicama do 80 % vrednosti međufaznog radnog napona mreže, a mreže uzemljene preko otpornosti od 20 Ω i 400 Ω ponašaju se u ovom smislu kao mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, sa stabilnim naponima ispravnih faza skoro nezavisno od dužine vodova 10 kV.

Pri dvofaznim zemljospojevima i dvofaznim kratkim spojevima napon ispravne faze u stacionarnom režimu je svakako manji nego naponi ispravnih faza pri jednofaznom zemljospoju [4].

Tabela 6.

Naponi ispravnih faza na mestu kvara pri jednofaznom zemljospoju

Dužina dalekovoda 10 kV, AIČ 3x70 mm ²	Direktno uzemljena mreža		Mreža uzemljena preko $R_{NT}=20 \Omega$		Mreža uzemljena preko $R_{NT}=400 \Omega$	
	$U_b/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_c/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_b/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_c/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_b/\sqrt{3}U_{ra}$	$U_c/\sqrt{3}U_{ra}$
0 km	0,5	0,5	0,985	1,000	1,00	1,00
1 km	0,669 9	0,620 8	0,973	1,000	0,99	0,99
5 km	0,752 7	0,629 8	0,915	0,973	0,99	0,99
10 km	0,772 8	0,629 6	0,855	0,935	0,99	0,99
12 km	0,776 7	0,630 0	0,846	0,917	0,99	0,99
14 km	0,779 2	0,630 0	0,834	0,906	0,99	0,99
16 km	0,781 7	0,630 0	0,817	0,887	0,99	0,99
18 km	0,782 5	0,628 0	0,789	0,853	0,99	0,99
20 km	0,785 0	0,629 0	0,783	0,844	0,99	0,99

Vrednosti stacionarnih prenapona na ispravnim fazama pri jednofaznim i dvofaznim zemljospojevima su u dozvoljenim granicama u odnosu na izolacioni nivo mreže 10 kV - S_i 12.

6. NAPONI DODIRA I KORAKA U RAZLIČITO UZEMLJENIM MREŽAMA

Zbog nedostojućeg prostora, ovde će biti samo napomenuto da su naponi koraka i dodira u blizini objekata mreže u direktnoj zavisnosti od veličine struja kvara pri zemljospojevima. Zato se kod izgradnje uzemljenja stubova u nadzemnim mrežama i uzemljivača transformatorskih stanica (i izvornih i prijemnih TS) u mrežama sa većim vrednostima struja zemljospojeva postavljaju mnogo stroži uslovi koje treba ispuniti da ne bi bila ugrožena živa bića koja mogu biti u blizini objekata mreže [4].

Prema tome, u istim uslovima već izgrađenih sredjenaponskih nadzemnih mreža, ukoliko se želi najefikasnije rešavanje problema redukcije veličine napona dodira i koraka, tretman neutralne tačke nadzemne mreže treba da bude takav da optimalno ograniči vrednosti struja zemljospojeva u mreži, a to znači da se tada sa ugradnjom otpora u neutralnoj tački mreže 35 kV i 10 kV postižu male vrednosti napona koraka i dodira u blizini objekata mreže. Sa direktnim uzemljenjem neutralne tačke sredjenaponskih mreža ($R_{NT} = 0 \Omega$), kao npr. u Engleskoj, postižu se najveće vrednosti napona dodira i koraka u blizini objekata mreže, i pred eksploataciju takve mreže stavljaju najstroži uslovi.

7. NEKOLIKO NAPOMENA VEZANIH ZA TRETMAN NEUTRALNE TAČKE SREDNJENAPONSKIH NADZEMNIH MREŽA NA KONZUMU JP EDB

Radi donošenja opštih zaključaka vezanih za tretman neutralne tačke nadzemnih mreža 35 kV i 10 kV na konzumu JP EDB, ovde će, na osnovu izvedenih relacija u [4], biti prikazane relativne vrednosti struje jednofaznog zemljospoja koji pogađa fazu (a) trofazne mreže, i napona ispravnih faza (b) i (c); naime, struja jednofaznog zemljospoja može da se izračuna u odnosu na trofaznu simetričnu struju zemljospoja, a naponi ispravnih faza u odnosu na složeni radni napon mreže, u funkciji od odnosa impedansi Z_0/Z_d prema relacijama:

$$I_z/I_{(3)} = \text{Abs} (3 / (2 + Z_0 / Z_d))$$

$$U_b / 1,73 * U_{ra} = (1 / 1,73) * \text{Abs}(e^{i2p/3} + (1 - Z_0 / Z_d) / (2 + Z_0 / Z_d))$$

$$U_c / 1,73 * U_{ra} = (1 / 1,73) * \text{Abs}(e^{i2p/3} + (1 - Z_0 / Z_d) / (2 + Z_0 / Z_d))$$

Ovde su, kao i u [4], na slikama 1 i 2 prikazane funkcionalne zavisnosti struje jednofaznog zemljospoja i naponi ispravnih faza u funkciji od odnosa modula impedansi Z_0/Z_d i argumenta $Fi = -(Fi_0 - Fi_d)$ kao parametra; prostorni dijagrami na slikama 1.1. i 2.1. su oformljeni da bi se dobile projekcije zavisnosti napona ispravnih faza od struje zemljospoja (slike 1.4 i 2.4).

Ovi dijagrami očigledno govore da se sa direktnim uzemljenjem neutralne tačke nadzemnih mreža 35 kV i 10 kV postižu velike vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva, a da su prenaponi ispravnih faza naročito niski. Tada je ispunjen uslov da je odnos napona ispravnih faza prema međufaznom radnom naponu mreže (tzv. faktor uzemljenja) manji od 0,8. Kako kazuje dijagram na slici 1.3 i 2.3, pri ovakvom tretmanu mreže 10 kV, ovaj parametar je uvek manji od 0,8 - nezavisno od dužine vodova 10 kV.

Radi ograničenja vrednosti jednofaznih struja zemljospojeva u neutralnu tačku mreža 35 kV i 10 kV, postavlja se „mala otpornost”, pri čemu su prenaponi ispravnih faza manji od 0,8 međufaznog napona ukoliko je ispunjen uslov:

$$0 \leq Z_0 / Z_d = 3, \text{ pri } Fi_d - Fi_0 \leq 30^\circ$$

ili,

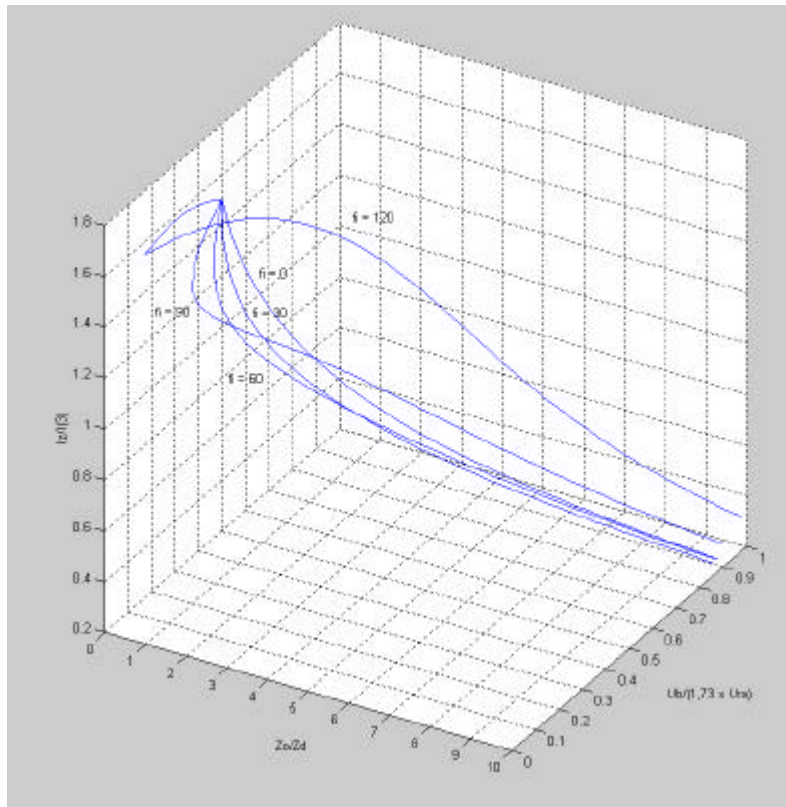
$$0 \leq Z_0 / Z_d = 1,5, \text{ pri } Fi_d - Fi_0 \leq 60^\circ$$

Do ovih relacija se dolazi sa dijagrama na slici 1.3 i slici 2.3.

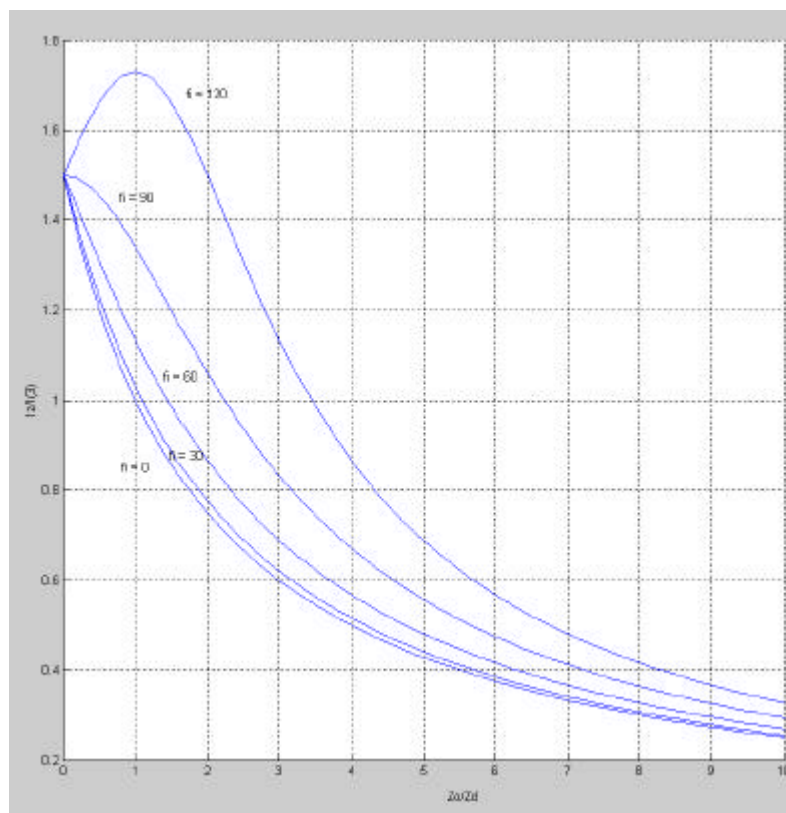
U uslovima nadzemnih mreža 35 kV i 10 kV, sa otpornostima u neutralnim tačkama mreža $R_{NT} \geq 20 \Omega$ ostvaruju se „umerene” vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva, ali i značajni prenaponi (slika 1.4 i slika 2.4). Naime, nezavisno od dužine vodova 35 kV i 10 kV, pri jednofaznim zemljospojevima, ispravne faze uvek dolaze bezmalo na složen radni napon mreže i „faktor uzemljenja” ima vrednost vrlo blizu 1. Sa otpornošću u neutralnoj tački nadzemne mreže 10 kV reda 400 Ω , prenaponi su tada maltene kao u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom.

Prema tome, rešavanje problema ograničenja i stacionarnih vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva i pripadajućih stacionarnih prenapona u mreži je veoma delikatno. Oba uslova nikako ne mogu da budu zadovoljena u potpunosti.

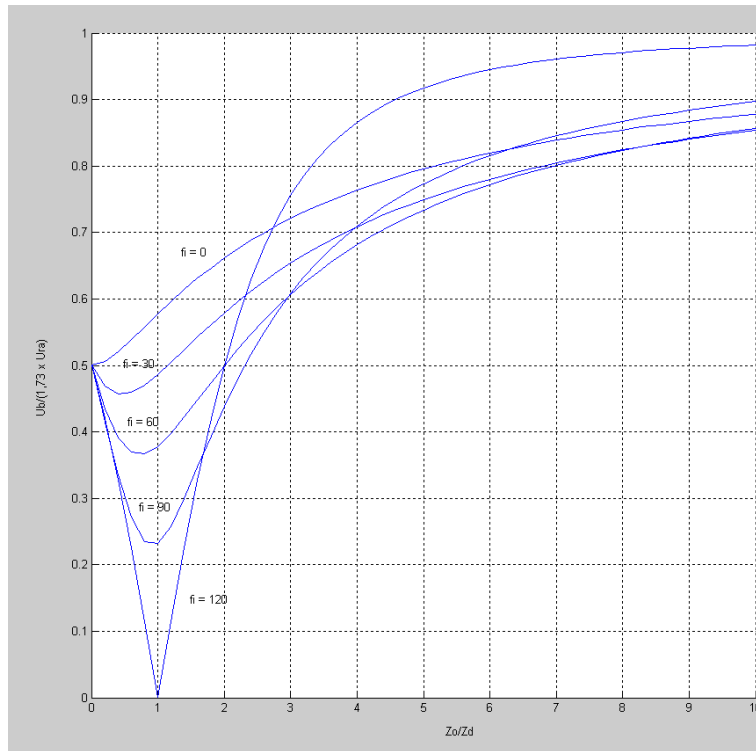
U uslovima beogradske nadzemne mreže 35 kV, s obzirom na to da se uzemljavanjem neutralne tačke mreže, putem male otpornosti postižu veoma ujednačene vrednosti struja jednofaznih zemljospojeva nezavisno od dužine vodova, onda bi se moglo



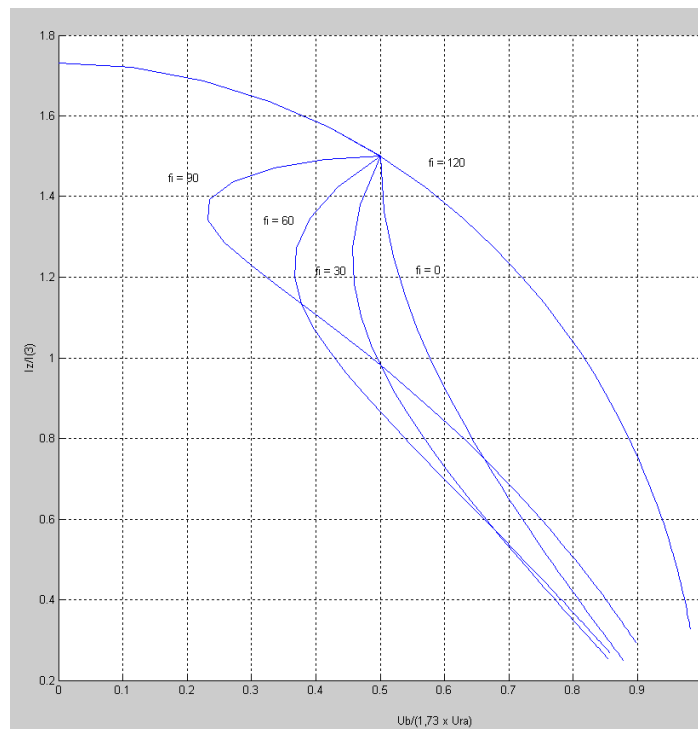
Slika 1.1 Prostorni dijagram



Slika 1.2 Struja jednofaznog zemljospoja u odnosu na struju trofaznog zemljospoja

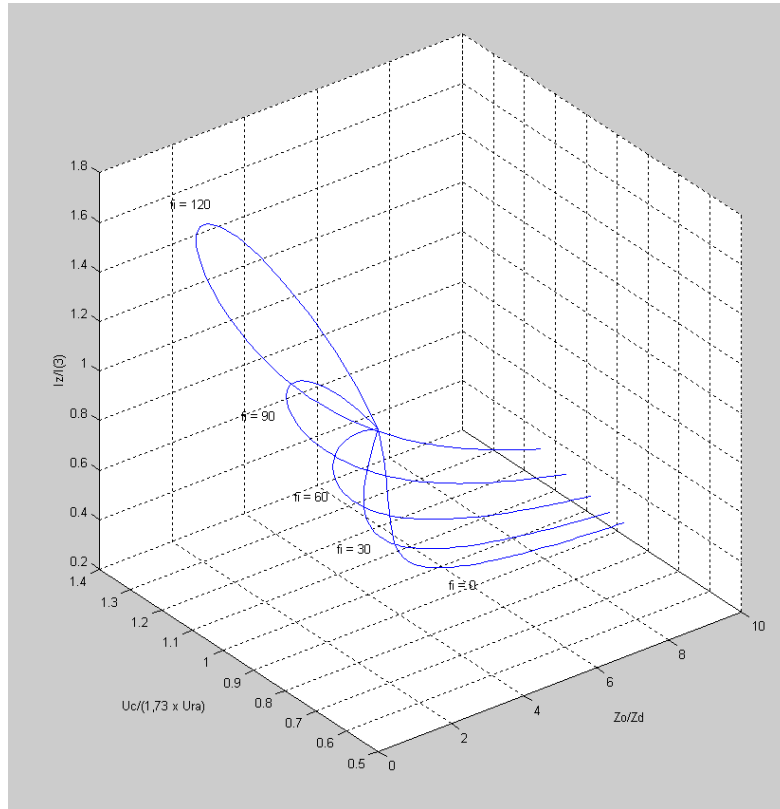


Slika 1.3 Napon faze b u odnosu na složeni radni napon mreže

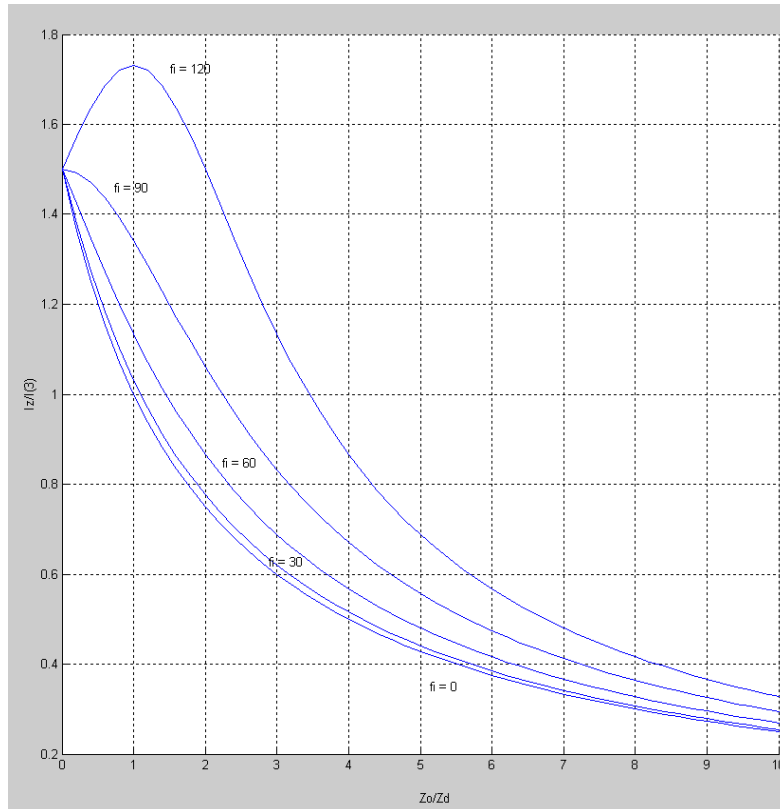


Slika 1.4 Struja jednofaznog zemljospoja u fazi a i napon ispravne faze b u uslovima istih vrednosti odnosa modula Z_0/Z_d i argumenta $Fi = - (Fi_0 - Fi_d)$ kao parametra

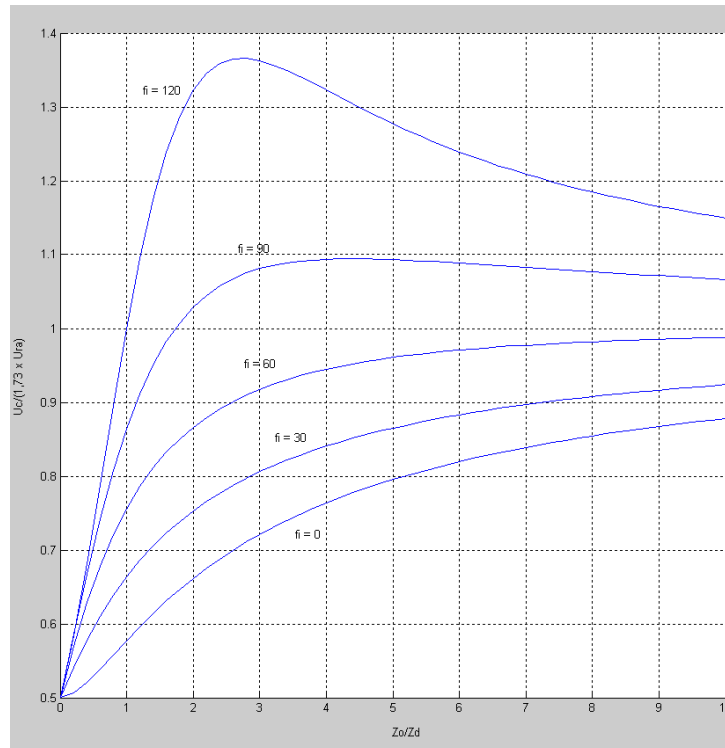
Slika 1. Relativne vrednosti struje jednofaznog zemljospoja (u fazi a) i napona ispravne faze (faza b - koja zaostaje za $2\sqrt{3}$ fazi pogodenoj kvarom) u funkciji od odnosa modula impedansi Z_0/Z_d i razlike argumenata impedansi $Fi = - (Fi_0 - Fi_d)$ kao parametara



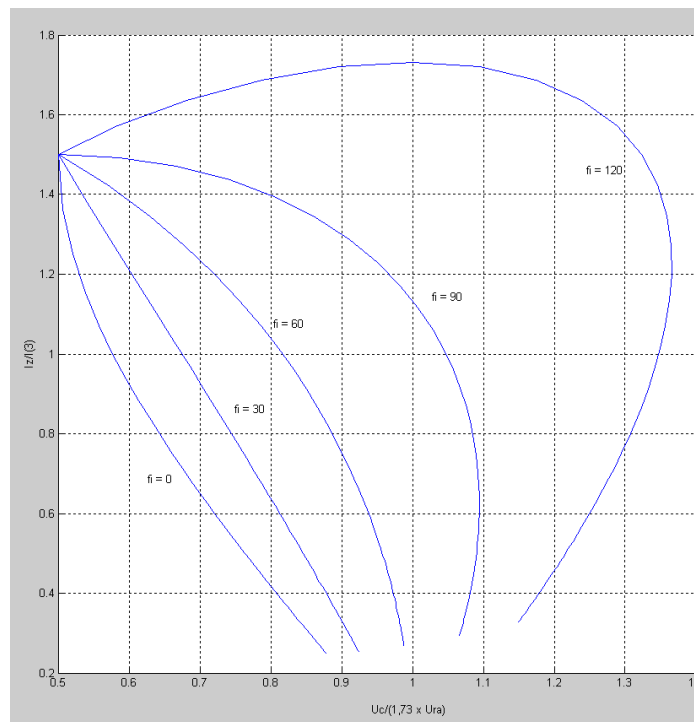
Slika 2.1 Prostorni dijagram



Slika 2.2 Struja jednofaznog zemljospoja u odnosu na struju trofaznog zemljospoja



Slika 2.3 Napon faze c u odnosu na složeni radni napon mreže



Slika 2.4 Struja jednofaznog zemljospoja u fazi a i napon ispravne faze c u uslovima istih vrednosti odnosa modula Z_0/Z_d i argumenta $F_i = - (F_{i_0} - F_{i_d})$ kao parametra

Slika 2. Relativne vrednosti struje jednofaznog zemljospoja (u fazi a) i napona ispravne faze (faza c - koja prednjači za $2\pi/3$ fazi pogodenoj kvarom) u funkciji od odnosa modula impedansi Z_0/Z_d i razlike argumenata impedansi $F_i = - (F_{i_0} - F_{i_d})$ kao parametara

preporučiti da neutralna tačka svih nadzemnih mreža 35 kV treba da bude uzemljena na identičan način - preko male otpornosti kojom se ograničavaju struje jednofaznih zemljospojeva na 300 A (nema razloga da ove struje budu ograničene na 600 A, ili 800 A, ili čak i 1 000 A); tada se postižu i nešto niže vrednosti napona koraka i dodira u blizini objekata mreže.

Takođe, u uslovima beogradske nadzemne mreže 10 kV, s obzirom na eksploataciona iskustva, sasvim su opravdana nastojanja da tretman neutralne tačke mreže 10 kV, i kablovske i nadzemne, bude jedinstven, tj. da struje jednofaznih zemljospojeva i u svim nadzemnim mrežama budu ograničene na 300 A. Međutim, ograničenjem struja jednofaznih zemljospojeva na 15 A, postižu se mnogo blaži uslovi u pogledu mogućih napona koraka i dodira u blizini objekata mreže 10 kV, što je bilo i presudno za izbor načina uzemljenja neutralne tačke nadzemnih mreža 10 kV na konzumu JP EDB (na područjima sa veoma starim mrežama, sa diskutabilnim stanjem uzemljivača objekata mreže). Treba napomenuti da se u svim mrežama sa uzemljenom neutralnom tačkom na konzumu JP EDB struje jednofaznih i dvofaznih zemljospojeva isključuju sa vremenskim zatezanjem od cca 0,5-1sec.

Na osnovu svega što je ovde izneseno, mogu se sagledati osnovne performanse svih rešenja u tretmanu neutralne tačke nadzemnih mreža 35 kV i 10 kV na konzumu JP EDB, a perspektivno rešavanje ove problematike će svakako biti diskutovano ne samo u JP EDB, već i šire - na relacijama raznih propisa i standarda.

8. ZAKLJUČAK

Brza elektrifikacija svih naselja, počev od 1950. godine, i intenzivan razvoj potrošnje električne energije na konzumu JP EDB, kao, uostalom, i u svim elektrodistributivnim preduzećima u Srbiji, nametali su veoma oštre uslove pred eksploataciju svih mreža. Čak i danas su, na mnogim područjima sa nadzemnim vodovima 35 kV i 10 kV, struje trofaznih

kratkih spojeva manje od minimalno dozvoljenih, naravno sa aspekta dovoljno pouzdanog registrovanja klasičnom relejnom zaštitom. Međutim, kako su jednofazni zemljospojevi neuporedivo češći (u ukupnom broju kvarova njihovo učešće je preko 90%), tretmanom neutralne tačke mreža postignuto je dovoljno pouzdano registrovanje nesimetričnih struja kratkih spojeva sa vremenskim zatezanjem od cca 0,5-1 sec. Na taj način su sve mreže u ovom periodu intenzivne izgradnje bile štice prema raspoloživim mogućnostima klasične relejne zaštite.

U narednim periodima izgradnje i eksploatacije elektrodistributivnih mreža trebalo bi preduzeti sve mere na polju što bržeg uvođenja savremene zaštite svih mreža, savremenog daljinskog upravljanja TS VN/SN i SN/NN, a svakako i adekvatnu izgradnju izvora u visokonaponskim i srednjenaponskim mrežama. Jedino na taj način može da se omogućiti dovoljno pouzdano registrovanje struja kvara u svim nadzemnim mrežama i maksimalno redukuje razaranje elementa mreže koji je u kvaru.

9. LITERATURA

- [1] Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije” DIREKCIJA ZA DISTIBUCIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE, ZBIRKA TEHNIČKIH PREPORUKA ED SRBIJE, Beograd 2001.
- [2] Clarke E., CIRCUIT ANALYSIS OF A-C POWER SYSTEMS, Vol. I and II, John Wiley, New York, 1956
- [3] S. Despotović, dipl. el. ing, OSNOVNI ANALIZE ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, knjiga, Beograd, 1962.
- [4] Jovan Nahman, dipl. el. ing, UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE ELEKTRODISTRIBUTIVNIH MREŽA, knjiga, Beograd, 1980.
- [5] Ljubiša Milanković, dipl. el. ing, UNUTRAŠNJI PRENAPONI, ETF Beograd, Beograd, 1973.
- [6] Milenko B. Đurić, REŠENI PROBLEMI IZ RELEJNE ZAŠTITE, TEORIJE KRATKIH SPOJEVA I PREKIDA, ETF Beograd.
- [7] M. Čalović, A. Sarić, EKSPLOATACIJA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA, knjiga, Beograd, 1999.

Rad je primljen u uredništvo 17. 10. 2001. godine



Tomislav Milanov, dipl. el. ing. Rođen u Beogradu, 03. 11. 1955. godine. Diplomirao je 1975. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Zaposlen u preduzeću „Elektrodistribucija Beograd” od januara 1976. godine i obavlja poslove u operativnoj energetici dispečerskog centra i Sektora za tehnički razvoj i istraživanje. Objavio oko 50 stručnih radova u časopisima „Elektroprivreda” i „Elektrodistribucija”, kao i na savetovanjima JUKO CIGRE i JUKO CIREC. Oženjen i ima dvoje punoletne dece.

Uticaj energetskeg kompleksa „Kostolac” na kvalitet životne sredine

Stručni rad
UDK: 622.3; 691

Rezime:

U članku su prikazani rezultati istraživanja preduzeti u cilju utvrđivanja uticaja energetskeg kompleksa „Kostolac” na promenu ekoloških uslova na području regiona Kostolac, saopšteni na Savetovanju „Energetski kompleks Kostolca i životna sredina”, održanom 5. marta 2002. godine u Kostolcu. Na osnovu nekih od saopštenih radova, u ovom članku je obrađena problematika uticaja rada površinskih kopova uglja i termoelektrane „Kostolac”, kao i uticaja procesa transporta i deponovanja pepela i šljake na otvorene deponije na promenu ekoloških uslova na području regiona Kostolac.

Ključne reči: površinski kop, ekologija, životna sredina, termoelektrana, ugalj, leteći pepeo, šljaka

Abstract:

INFLUENCE OF ENERGETIC COMPLEX „KOSTOLAC” ON ENVIRONMENTAL QUALITY

On the basis of some reported research works, in this article are presented the data dealing with the problems of influence of the coal open pits and thermal power station „Kostolac” as well as the influence of the fly and cinder ashes hydraulic dispatch to the open deposits on the ecological condition change in basin Kostolac.

Key words: open pit, ecology, environment, thermal power station, coal, fly ash, cinder ash

1. UVODNA NAPOMENA

U ovom članku su obrađeni neki od osnovnih podataka iznetih u referatima saopštenim na Savetovanju „Energetski kompleks Kostolac i životna sredina” održanom 5. marta 2002. godine u Kostolcu, objavljenih u Zborniku radova izdatom od strane Saveza društava inženjera i tehničara Opštine Požarevac - Požarevac [1].

Jedan deo podataka saopštenih na pomenutom Simpozijumu objavljen je u časopisu „Elektroprivreda” u članku „Površinski kopovi i termoelektrane u Kostolacu – proizvođači uglja, električne energije

i dragocenih materijala i sirovina za građevinarstvo” (Elektroprivreda 2002, 4.).

2. UTICAJ RADA ENERGETSKOG KOMPLEKSA „KOSTOLAC” NA PROMENU EKOLOŠKIH USLOVA NA PODRUČJU KOSTOLAČKOG REGIONA

2.1. Uvod u problematiku

Svoje energetske potrebe Srbija uglavnom rešava proizvodnjom električne energije u svojim termo i hidroelektranama. Za proizvodnju električ-

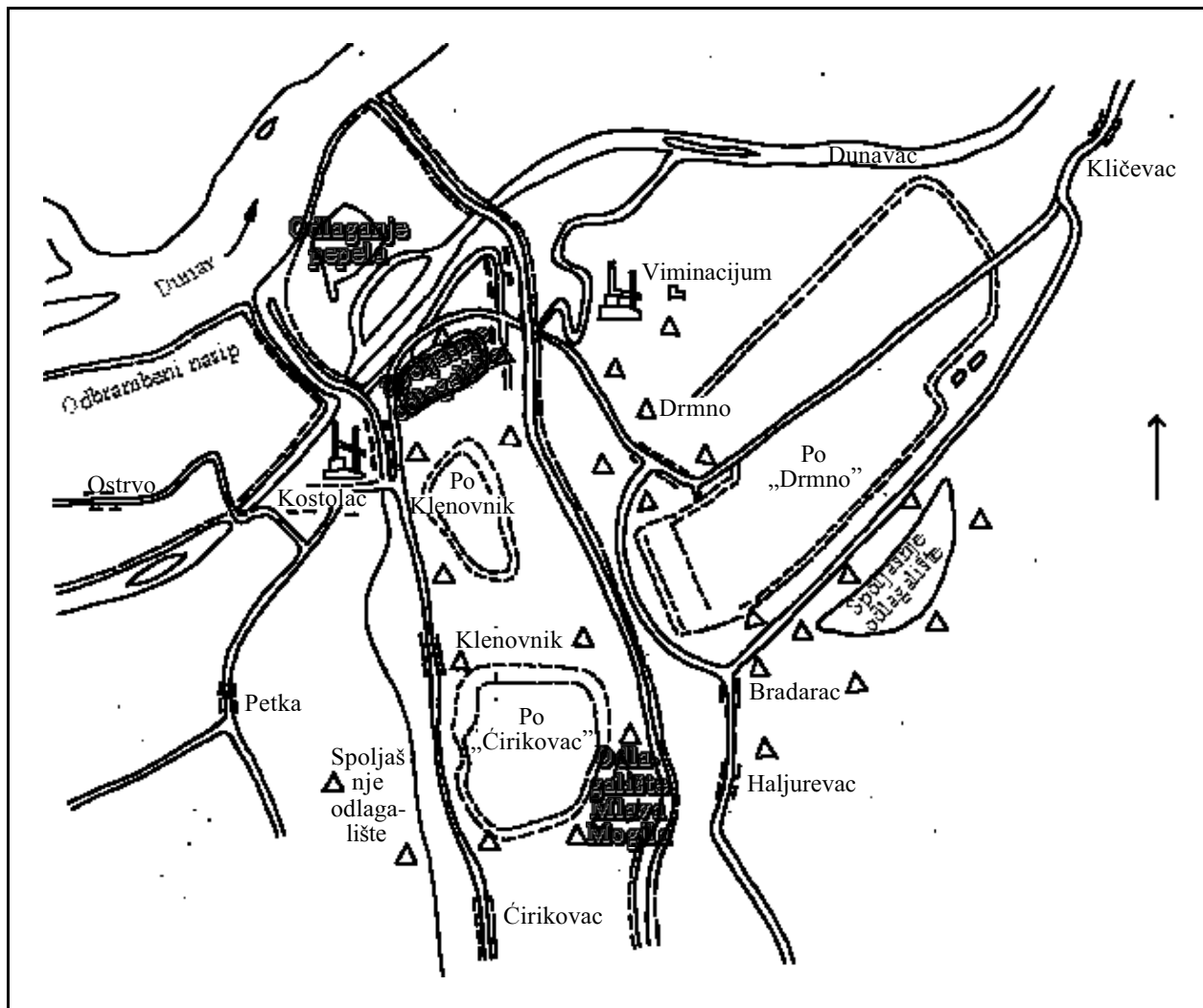
ne energije u termoelektranama, koriste se ligniti niske kalorične (toplotne) moći. Sagorevanjem lignita u kotlovima termoelektrana, čije se rezerve u Srbiji procenjuju na milijarde tona, samo se delimično podmiruju energetske potrebe industrije i široke potrošnje (domaćinstva, ulično osvetljenje itd.).

Nažalost, korišćenje lignita za proizvodnju električne energije u termoelektranama ima za posledicu ugrožavanje životne sredine područja na kome su locirane termoelektrane, pri čemu uzroci ekoloških promena leže u procesima površinske eksploatacije uglja, njegovog sagorevanja u kotlovima termoelektrana uz nastanak velikih količina dimnih otrovnih gasova, kao i ogromnih količina pepela i šljake, čije deponovanje na prostore ogromnih površina predstavlja najvećeg zagađivača životne sredine.

Ekološki problemi na području Kostolca nastali izgradnjom i radom termoelektrana Kostolac „A” i „B”, u kojima se proizvodnja električne energije zasniva na korišćenju niskokaloričnih kostolačkih lignita, imala je za posledicu nastanak pomenutih pojava koje su negativno uticale na ekološke uslove celog kostolačkog područja, odnosno koje su dovele do velikih promena u životnoj sredini u kojoj su locirani površinski kopovi uglja, same termoelektrane i deponije na kojima se odlažu ogromne količine letećih pepela i šljake nastalih sagorevanjem ugljeva u kotlovima termoelektrana [2].

2.2. Biogeografske karakteristike kostolačkog basena uglja

Kostolački basen uglja, koji zahvata područje između reke Morave na zapadu, Golubačkih planina na istoku, reke Dunav na severu i Mlavskog basena



Slika 1. Kostolački ugljeni basen

na jugu, prostire se na oko 400 km². U okviru Kostolačkog regiona nalaze se moćna nalazišta niskokaloričnog lignita, čije se rezerve procenjuju na oko 2 milijarde tona [3].

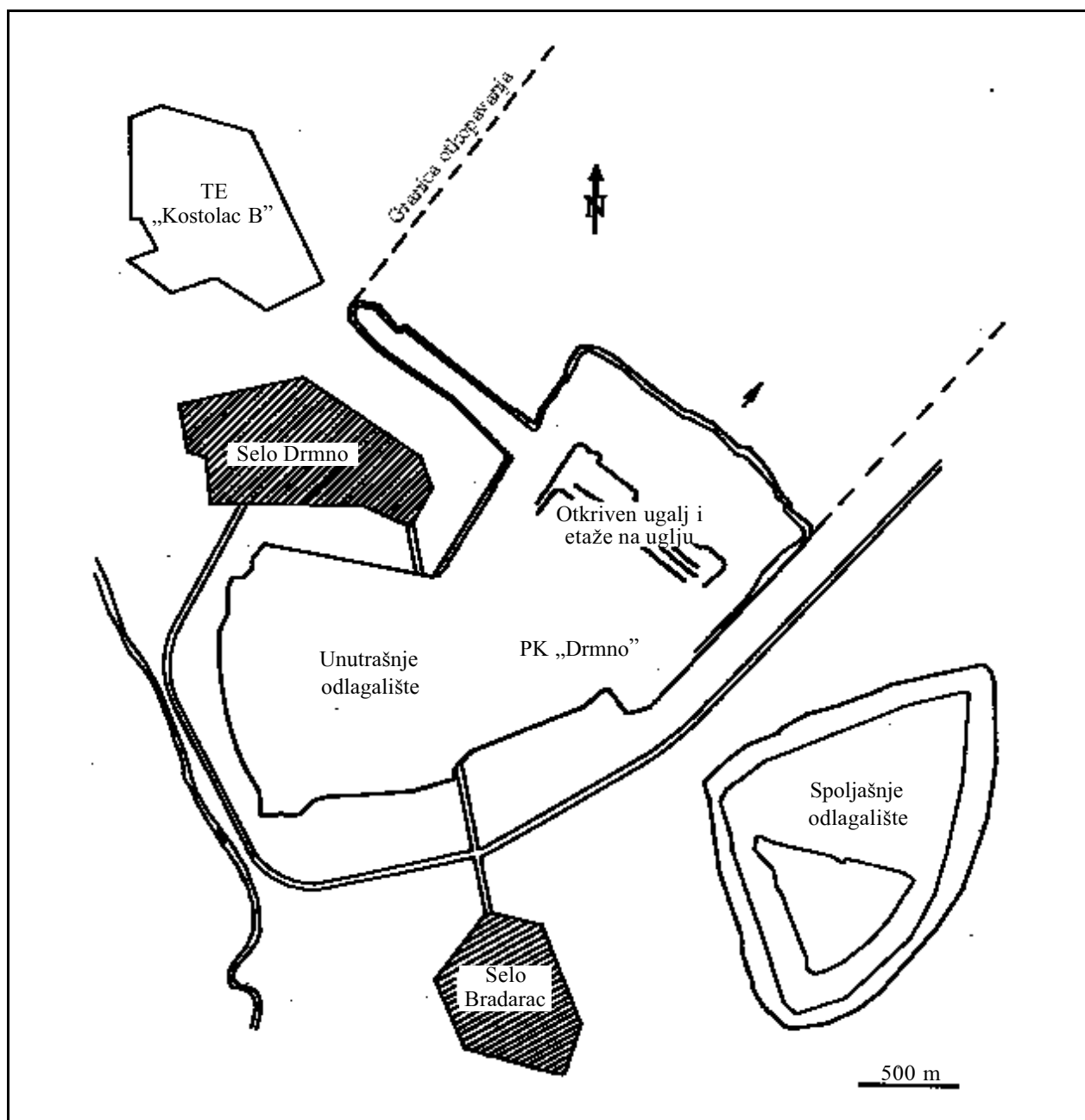
Geografski tačnije definisan Kostolački ugljeni basen nalazi se na području Opštine Požarevac, prostire se na oko 100 km² i po rezervama nalazi na trećem mestu u Srbiji [3].

Eksploatacija uglja vrši se danas površinskom eksploatacijom sa tri kopa: „Drmno”, „Ćirikovac” i „Klenovnik” (slika 1 i 2) [4] [6] koji se prostiru na sledećim površinama:

– „Drmno” površine	806 ha
– „Ćirikovac” površine	956 ha
– „Klenovnik” površine	497 ha
	<hr/>
	2 259 ha

U njihovom se tehnološkom lancu nalaze i deponije uglja sa odgovarajućom opremom i smeštajnim prostorima za otkopani ugalj [5] sledećih kapaciteta:

– deponija „Drmno”	700 000 tona,
– deponija „Ćirikovac”	300 000 tona,
– deponija TE „Kostolac A”	100 000 tona.



Slika 2. Površinski kop „Drmno”

Pri ovome treba napomenuti da je kop „Klenovnik” pri kraju eksploatacionog veka sa aspekta okonturenih rezervi, dok će na kopu „Čirikovac”, eksploatacija prestati već 2004. godine [4].

2.3. Osnovni uzroci ekoloških promena na području Kostolca

U osnovne uzroke ekoloških promena u životnoj sredini područja Kostolac [2] treba svrstati:

- degradiranje poljoprivrednog zemljišta otvaranjem površinskih kopova za eksploataciju kostolačkih lignita i formiranjem odlagališta jalovine i pepela,
- promenu kvaliteta vazduha, odnosno njegovo zagađenje gasovitim produktima nastalim pri sagorevanju uglja u kotlovima termoelektrana,
- deponovanje pepela iz termoelektrana na otvorene površine izložene dejstvu eolskih faktora (vetra),
- izmena postojećih prirodnih vodotokova,
- izmena kvaliteta površinskih i dubinskih voda,
- izmena u životnoj sredini područja Kostolac.

2.3.1. Degradiranje poljoprivrednog i šumskog zemljišta

Površine na kojima su danas na području Kostolca locirani površinski kopovi uglja, deponije jalovine iz otkrivke uglja (glina, pesak), same elektrane („A” i „B”), uključujući i deponije pepela i šljake nastalih pri sagorevanju uglja u termoelektranama, procenjuju se na 2 000 ha, što čini oko 20 % od ukupne teritorije regiona Kostolac, odnosno 5 % opštine Požarevac [2].

S obzirom na to da se radi o površinama koje su bile okarakterisane kao bogate u pogledu šumskog i stepsko-šumskog rastinja - stvaraoca kiseonika, odnosno o površinama izvanrednog kvaliteta sa aspekta poljoprivrede, lako se može utvrditi negativan uticaj na ekološke uslove, koji nastaje na teritoriji Kostolca od početka otvaranja površinskih kopova uglja u Kostolačkom basenu namenjenih proizvodnji uglja za potrebe kostolačkih termoelektrana.

2.3.2. Promena kvaliteta vazduha

Sagorevanjem niskokaloričnog lignita u Kostolačkim termoelektranama u atmosferu dospevaju brojne zagađujuće materije, kao što su čađ i pepeo, kao i otrovni gasovi kao što su CO, NO₂, SO₂, [5], [9], dalje gasovi na bazi isparljivih organskih jedinjenja, kao i gasovi na bazi policikličnih aromatičnih hidrokarbonata (benzo-pirena) koji mogu biti uzročnici kancerogenih oboljenja [8].

Emisija navedenih čestica i gasova iz kotlova kostolačkih termoelektrana je stalna i često prelazi dozvoljene vrednosti za MDK, zagađujući prostor Kostolca i okolnih naselja, a što se dokumentuje podacima iznetim u ovom paragrafu.

Prema rezultatima istraživanja izvršenim [9] u periodu 1990-1996. godine za blok A1, odnosno u periodu 1996-2000. godine za ostale blokove, preduzetih u cilju praćenja emisije štetnih materija iz dimnjaka termoelektrane „Kostolac”, a koja su obuhvatila određivanja:

- koncentracije čestica u dimnim gasovima i njihove emisije u okolnu sredinu,
- koncentracije oksida sumpora, azota i ugljen-monoksida u dimnim gasovima i njihove emisije,
- vrednost stepena otprašivanja pepela u elektrofil-trima,

došlo se do sledećih zaključaka:

- Koncentracija čestica u dimnim gasovima po blokovima termoelektrana kretala se u granicama vrednosti:

Blok A1 : 560 - 3 950 mg/m³

Blok A2 : 330 - 3 300 mg/m³

Blok B1 i B2 : 71 - 390 mg/m³

što je daleko iznad propisanih GVE (granična vrednost emisije) - vrednosti od 50 mg/m³ [9].

Ocenjivane sa aspekta emisije čvrstih čestica iz dimnih gasova, prosečne vrednosti za emisiju ukupnih taloženih materija iznose po mernim mestima:

- a) Stari Kostolac (u neposrednoj blizini deponije pepela)

– u toku 1999. godine 160 - 640 mg/m²/dan

– u toku 2000. godine 400 - 1 000 mg/m²/dan.

- b) Kostolac (u neposrednoj blizini termoelektrane „A”)

– u toku 1999. godine 210 - 600 mg/m²/dan

– u toku 2000. godine 560 - 750 mg/m²/dan.

Koncentracija oksida sumpora u dimnim gasovima kretala se u periodu 1995 - 1999. godine u granicama od 5 400 - 7 000 mg/m³, što je daleko iznad dozvoljene vrednosti (650 mg/m³), dok je koncentracija oksida azota u većini slučajeva bila u granicama dozvoljene vrednosti (450 mg/m³).

Koncentracija oksida sumpora u vazduhu iznad područja Kostolac u periodu 1999-2000. godine iznosila je niže od novopropisanih vrednosti za GVI (150 mg/m³) [9].

2.3.3. Deponovanje pepela na otvorenim površinama

Deponovanje pepela, nastalog sagorevanjem uglja u kostolačkim termoelektranama, na otvorene površine koje su izložene eolskim faktorima (vetar), predstavlja jedan od osnovnih faktora zagađenja ži-

votne sredine. I to bez obzira na činjenicu da se smeša letećeg pepela, otprašenog u elektrofiltrima i prethodno samlevenog ložišnog pepela (tzv. šljake), transportuje vodom kroz cevovode.

Površina sadašnjih deponija iznosi preko 250 ha, a visina slojeva deponovanog pepela iznosi na nekim deponijama i 20 m. Formiranjem ovih deponija, zasute su mnoge močvare, odnosno uništen sav biljni i životinjski svet sa ovih prostora [2].

2.3.4. *Izmena postojećih vodotokova*

Otvaranje površinskih kopova i izgradnja termoelektrane imala je za posledicu velike izmene u postojećim vodotokovima. Tako je zasipanjem dela plovnog rukavca Dunava - Dunavca stvoreno veštačko jezero dužine 1 700 m i širine 60 - 80 m, koje je potom kanalom dužine 1 600 m povezano sa Dunavom, čime je plovni rukavac Dunava prekinut. Namena kanala je dovođenje sveže vode za potrebe termoelektrane Kostolac [2].

Izgradnja termoelektrane „B” u Drmnu zahtevala je nove hidro-građevinske radove, kojima je izrađeno novo korito reke Mlave i njeno ušće u Dunav, pri čemu se staro korito koristi za dovođenje vode iz termoelektrane „B”.

2.3.5. *Izmena kvaliteta površinskih i dubinskih voda*

Površinska eksploatacija uglja na kopovima zahtevala je izgradnju nekoliko stotina crpnih bunara, što je dovelo do iscrpljivanja lokalnih podzemnih voda, čime se područje Kostolca pretvara u teritoriju nedovoljno snabdevenu vodom, naročito u sušnim periodima [10].

Problem promene kvaliteta (površinskih) voda, odnosno voda u rekama na području Kostolca, potenciraju otpadne vode iz termoelektrana, a naročito vode sa deponija pepela, zbog čega transport pepela hidrauličnim putem i njegovo deponovanje na otvorene površine zahteva i prečišćavanje voda dobijenih ocedivanjem vodenih suspenzija pepela, a pre ispuštanja ovih relativno prečišćenih voda u prirodne vodotokove.

Ispitivanjem uticaja otpadnih voda iz TE Kostolac „A” i „B” na kvalitet površinskih voda reka Dunava i Mlave pre njihovog ulaska u zonu uticaja Kostolačkih termoelektrana, odnosno posle njihovog izlaska iz ove zone, pouzdano je utvrđeno da nema značajnih promena u kvalitetu vode Dunava kao glavnog recipijenta površinskih otpadnih voda, koje potiču od rada termoelektrana i voda nastalih ocedivanjem odlagališta pepela i šljaka [10]. Ovo je potvrđeno ispitivanjima vršenim u periodu 1992-2000. godine kada je utvrđeno da otpadne vode iz TEKO

„A” i „B” ne predstavljaju značajan izvor zagađenja voda reke Dunava kao krajnjeg primaoca ovih voda [10].

Za razliku od površinskih voda, ispitivanje podzemnih voda akumuliranih u aluvijalu Dunava pokazuje povećani sadržaj suspendovanih materija, odnosno povećanu koncentraciju mineralnih soli, masti i uglja [10, 11].

2.3.6. *Izmena u životnoj sredini područja Kostolac*

Izgradnja rudnika i termoelektrane Kostolac imala je za posledicu:

- veliki mehanički priliv stanovništva,
- izgradnju novih naselja i infrastrukture na dotadašnjim poljoprivrednim površinama,
- intenzivan automobilski saobraćaj koji predstavlja jedan od uzroka aerozagađenja čovekove sredine,
- intenzivnu poljoprivredu stimuliranu nekontrolisanom upotrebom pesticida i veštačkih đubriva,
- deponovanje i spaljivanje smeća.

Navedene činjenice koje se odnose na promene životne sredine na području Kostolca dokumentuju se sledećim biogeografskim podacima [2], prema kojima je privredni razvoj kostolačkog regiona, zasnovan na eksploataciji uglja i izgradnji termoelektrana, imao za posledicu veliki priliv stanovništva i podizanje naselja. Tako se, na primer, centar rudarenja koji je bio lociran u Starom Kostolcu u drugoj polovini dvadesetog veka preselio u Novi Kostolac, koji je ubrzo dobio status grada, jer u njemu danas živi oko 13 000 stanovnika. Kostolcu gravitiraju i okolna seoska naselja: Drmno, Stari Kostolac, Ostrvo Petka, Klenovnik i Ćirikovac.

Intenzivna gradnja na području ovih naselja imala je za posledicu smanjenje poljoprivrednih površina, donoseći sa sobom nove ekološke probleme, kao što su zagađenje usled povećanog automobilske saobraćaja i deponovanja kućnog smeća [2].

2.4. Uticaj termoenergetskog kompleksa „Kostolac” na zdravlje lokalnog stanovništva sa aspekta zagađenosti vazduha radioaktivnim materijama

Polemika oko vrste i količine radioaktivnih elemenata u uglju i letećem pepelu iz termoelektrana započela je pre dve decenije, kada je mnogim istraživačkim radovima dokazano prisustvo radioaktivnih materija kao što su uran (U) i torijum (Th), uključujući i produkte njihovog raspadanja, dalje, radijum (Ra), radon (Rn), kao i radioaktivni kalijum (K). Prosečan sadržaj urana u ugljevima iznosi 1-4 mg/kg,

mada ima ugljeva sa sadržajem urana koji iznosi i 20 mg/kg [12].

Pri sagorevanju uglja, radioaktivni elementi delimično isparavaju, a delimično se kondenzuju na površini čestica pepela. Pri ovome treba napomenuti da se leteći pepeli, otprašeni na elektrofiltrima, transportuju na deponije, odakle se pomoću vetra mogu, dalje, razneti u bližu i dalju okolinu, odnosno na zemljište, površinske vode, biljni i životinjski svet, uključujući i lokalno stanovništvo.

Pri ovome se mora nužno ukazati na višestruko negativno prisustvo ovih radioaktivnih materija deponovanih na površini čestica letećih pepela, koje se manifestuje njihovim jonizujućim zračenjem, čiji su efekti višestruko štetni za ljudski, životinjski i biljni svet. Ovo zračenje visoke energije je uzrok razgrađivanja mnogih molekula u ćelijama krvi i tkiva živih organizama, a što dovodi do stvaranja kancerogenih ćelija sa fatalnim posledicama po živi organizam.

U okviru radova na proučavanju stepena radioaktivnosti ugljeva iz površinskih kopova „Kostolac”, odnosno pepela dobijenih njihovim sagorevanjem, bila su obuhvaćena merenja jačine doze zračenja ($\mu\text{Sv/h}$) kostolačkih ugljeva, jalovine, deponovanih pepela, opeka izrađenih od pepela, lokalnog bilj-

nog sveta, kao i merenja doza zračenja u samim termoegetskim postojenjima.

Rezultati ovih istraživanja, izvršenih decembra 2001. godine, prikazani u tabeli 1, pokazuju da je nivo zračenja u čitavom regionu nešto malo povišen ($0,12-0,25 \mu\text{Sv/h}$), pri čemu su ekstremne vrednosti zračenja registrovane na nalazištima pečene (brand) gline, kao i na putevima izgrađenim od ove gline ($0,21-0,25 \mu\text{Sv/h}$) [12].

Posmatrano sa aspekta slojeva koji se nalaze u pokrивci ugljonosnih naslaga (pesak-šljunak-les-ugljevita glina), može se zaključiti da se nivo zračenja pojačava u smeru od peska ka ugljevitoj glini ($0,12-0,15 \mu\text{Sv/h}$), a što je posledica spiranja i taloženja radioaktivnih elemenata u vodootpornom sloju. Takođe je utvrđeno da se radioaktivno zračenje pojačava sa dubinom ugljenih slojeva.

Što se tiče nivoa zračenja pepela na deponijama, on se povećava sa starošću deponije odnosno starošću deponovanog pepela, i kreće se u granicama od $0,12-0,17 \mu\text{Sv/h}$. Što se tiče „priče” o povećanoj radioaktivnosti građevinskih materijala izrađenih na bazi letećeg pepela iz termoelektrana, nju demantuju sledeći podaci, prema kojima radioaktivnost izmerena na opekama izrađenim od smeše kre-

Tabela 1.

Jačina doze radioaktivnog zračenja u kostolačkom ugljenom basenu¹⁾

Redni broj	Lokacija – objekat	$\mu\text{Sv/h}$
1.	Ćirikovac, ugalj iz drugog sloja	0,12
2.	Ćirikovac, povlata drugog sloja (jalovina)	0,14
3.	Ćirikovac, povlata drugog sloja (ugljevita glina)	0,15
4.	Ćirikovac, ugalj iz trećeg sloja	0,16
5.	Ćirikovac, nadzemni deo biljke (<i>Senecio vulgaris</i>)	0,10
6.	Ćirikovac, les	0,16
7.	Drmno, ugalj na deponiji	0,08
8.	Drmno, unutrašnjost postrojenja	0,12
9.	Deponija pepela stara 6 meseci	0,12
10.	Biljka na pepelu, nadzemni deo trskasta šaša	0,14
11.	Biljka na pepelu, rizom trske	0,12
12.	Deponija pepela stara 3-4 godine	0,12
13.	Stari Kostolac, nalazište brand gline	0,25
14.	Deponija pepela u Kostolcu, aktivna	0,12
15.	Rekultivisana deponija pepela stara 20 godina	0,17
16.	Kostolac, putevi od crvene gline	0,21
17.	Kostolac, opeke od pepela	0,12

¹⁾ Mereno scintilometrom dana 5. 12. 2001. godine [12]

ča (30 %) i letećeg pepela iz TE „Kostolac A” (70 %) iznosi svega 0,12 $\mu\text{Sv/h}$ [12].

Ako se posmatra sa aspekta geografskih dužina i širina, može se zaključiti da je nivo jonizujućeg zračenja vrlo različit. Ovo se dokumentuje podacima da nivo zračenja u Sudanu, Egiptu i Etiopiji iznosi svega 0,10-0,20 $\mu\text{Sv/h}$, u Australiji oko 0,28 $\mu\text{Sv/h}$; da je prosek za SAD 0,342 $\mu\text{Sv/h}$, dok se za Kanadu nivo radioaktivnog zračenja kreće u granicama 0,342-0,570 $\mu\text{Sv/h}$ [12].

Poredeći ova zračenja sa zračenjima registrovanim tokom pomenutih istraživanja u regionu Kostolačkih termoelektrana i kopova uglja, može se zaključiti da je nivo zračenja u regionu Kostolac samo malo povišen, a što je posledica eksploatacije uglja i njegovog sagorevanja u termoelektranama, uključujući i deponovanje pepela na otvorene deponije izložene dejstvu vetrova i atmosferskih kiša.

Na kraju treba reći da su medicinska istraživanja u pogledu povećanja malignih oboljenja na teritoriji Kostolca u odnosu na teritoriju Velikog Gradišta pokazala neznatan porast, ali da se na osnovu ovih istraživanja ne može dati deciderani zaključak o uzrocima njihovog nastanka, kao ni zaključak o faktorima rizika koji donosi proces proizvodnje elektroenergije u Kostolačkim termoelektranama [8].

Bez obzira na podatke iznete na ovom Simpozijumu, a koji se odnose na fenomen radioaktivnosti, treba prihvatiti mišljenje Instituta za medicinu rada iz Beograda, doneto na osnovu rezultata merenja radioaktivnosti uzoraka iz radne i životne sredine u okolini TE Kostolac „A” i „B” izvršenih tokom 2000. godine, a koji potvrđuju da veštački radionukleidi kratkog i srednjeg vremena poluraspada nisu detektovani ni u jednom uzorku, što znači da nije bilo veštačkog izvora radioaktivnosti, odnosno da povećana prirodna radioaktivnost na deponijama pri sadašnjim uslovima ne predstavlja zdravstveni rizik za radnike.

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu detaljne analize radova iznetih na Savetovanju - održanom u Kostolcu na dan 5. marta 2002. godine - o problematici nastanka i deponovanja letećih i ložišnih pepela (šljake), dobijenih sagorevanjem niskokaloričnih lignita u kotlovima termoelektrana u Kostolcu („A” i „B”), kao i njihovog uticaja na pogoršanje ekoloških uslova na području Kostolca - mogu se doneti sledeći zaključci:

1) Nosioce razvoja područja Kostolac predstavljaju privredni potencijali u koje se ubrajaju poljoprivredno zemljište, velike rezerve lignita, kao i značajne rezerve mineralnih materija (glina, crvenka, šljunak, pesak, itd.), koje predstavljaju poten-

cijalne sirovine za proizvodnju širokog spektra građevinskih materijala.

2) U cilju što efikasnijeg iskorišćenja rezervi lignita iz Kostolačkog basena, koje se procenjuju na 2 milijarde tona (bilansne, vanbilansne i potencijalne rezerve), na području Kostolca izgrađene su dve termoelektrane „Kostolac A” snage 310 MW i „Kostolac B” snage 700 MW.

3) Prilikom sagorevanja niskokaloričnih lignita u kotlovima termoelektrana u Kostolcu, nastaju ogromne količine letećih i ložišnih pepela (tzv. ložišna zgura) koje se, računajući sa njihovim učešćem u ugljenoj masi od oko 25 %, procenjuju na oko 2 miliona tona godišnje.

4) Deponovanje ovako velikih količina letećih i ložišnih pepela, čije prosečne zapreminske mase, zbog velike finoće, ne prelaze 650 kg/m^3 - na otvorene deponije, ima za posledicu uništavanje velikih površina plodnog zemljišta, pri čemu same deponije pepela predstavljaju izvor zagađenja okolnog vazduha, voda i poljoprivrednog zemljišta, a što ima za posledicu pogoršavanje ekoloških uslova na području Kostolca.

5) Pogoršanje ekoloških uslova na području Kostolca, izazvanog deponovanjem letećeg pepela na otvorene deponije, dokumentuje se podatkom da leteći pepeli sa deponija mogu biti, dejstvom eolskih faktora (vetrova, naročito Košava), odneti na daljine koje iznose i do 10 km.

6) Pogoršanje ekoloških uslova na području Kostolca na kome su locirani površinski kopovi, termoelektrane „Kostolac A” i „Kostolac B”, kao i deponije pepela i šljake, dokumentuje se sledećim argumentima:

– uništavanjem i degradiranjem poljoprivrednog zemljišta,

– promenom kvaliteta vazduha, njegovim zagađenjem gasovitim produktima nastalim sagorevanjem ugljeva u kotlovima termoelektrana,

– deponovanjem pepela na otvorene deponije izložene dejstvu eolskih faktora (vetrova),

– izmenom kvaliteta površinskih i podzemnih voda, – negativnim uticajem na zdravlje stanovništva i zaposlenih na eksploataciji uglja i deponovanju pepela.

7) Rezultati ispitivanja sporne „povećane” radioaktivnosti na području kopova, elektrana i deponija pepela u Kostolcu su pokazala da je nivo radioaktivnog zračenja neznatno povećan u čitavom regionu (0,12 - 0,25 $\mu\text{Sv/h}$).

8) Bez obzira na iznete podatke o radioaktivnom zračenju na području kopova, termoelektrana i deponija pepela u regionu Kostolca, treba prihvatiti mišljenje Instituta za medicinu rada u Beogradu, da veštački radionukleidi kratkog i sred-

njeg vremena poluraspada nisu detektovani ni u jednom uzorku, odnosno da nije bilo veštačkog izvora radioaktivnosti, a da nešto povećana radioaktivnost na deponijama u sadašnjim uslovi- ma ne predstavlja zdravstveni rizik za radnike.

4. LITERATURA

- [1] „ENERGETSKI KOMPLEKS KOSTOLAC I ŽIVOTNA SREDINA” (Zbornik radova), Savez društava inženjera i tehničara Opštine Požarevac, Požarevac, 2002. str. 1-202
- [2] Đorđević-Miloradović J.: EKOLOŠKE POSLEDICE EKSPLOATACIJE UGLJA I IZGRADNJA TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA U KOSTOLCU, *ibid.*, str. 29-32
- [3] Mišić N.: INSTALISANI KAPACITETI KOLIČINE PEPELA I ŠLJAKE DOBIJENE GODIŠNJOM PROIZVODNjom TEKO I PLANovi EPS-a, *ibid.*, str. 27-28
- [4] Gavrilović M., Čanak A.: AKTIVNOSTI I PLANovi EPS-A NA REŠAVANJU PROBLEMA PRIKUPljanJA, TRANSPORTA I ODLAGANJA PEPELA TE „KOSTOLAC”, *ibid.*, str. 113-116
- [5] Petrović D., Antonijević Lj.: KARAKTERISTIKE I REZERVE UGLJA KOSTOLAČKOG BASENA, *ibid.*, str. 17-22
- [6] Blečić N., Popović D.: POVRŠINSKI KOP „DRMNO” - Jedan koncept ZŽS, *ibid.*, str. 85-90
- [7] Rogožarski Z.: UTICAJ TERMOENERGETSKOG KOMPLEKSA KOSTOLAC NA KVALITET VAZDUHA U OKOLNIM NASELJIMA, *ibid.*, str. 45-50
- [8] Branković M., Mitić Z.: STRUKTURA MALIGNIH NEOPLAZMI U KOSTOLCU OD 1996 DO 2000. GODINE, *ibid.*, str. 51-53
- [9] Milojković Lj.: UTICAJ TERMOELEKTRANA KOSTOLAC A I B NA KVALITET VAZDUHA U OKOLINI, *ibid.*, str. 63-64
- [10] Milojković Lj., Rogožarski Z., Milanović, R.: UTICAJ OTPADNIH VODA IZ TERMOELEKTRANA „A” I „B” - KOSTOLAC I PEPELIŠTA NA KVALITET POVRŠINSKIH I PODZEMNIH VODA, *ibid.*, str. 65-78
- [11] Igrutinović D.: KVALITET PODZEMNIH VODA U IZVORIŠTIMA VODOSNABDEVANJA STANOVNIŠTVA OPŠTINE POŽAREVAC I KOSTOLAC, *ibid.*, str. 151-152
- [12] Martić M., Vlajković M.: Đorđević-Miloradović J.: NIVO RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA U KOSTOLAČKOM UGLJENOM BASENU: IZVORI I POSLEDICE, *ibid.*, str. 59-62

Rad je primljen u uredništvo 30. 07. 2002. godine



Predrag Brzaković je rođen 1924. godine u Beogradu. Diplomirao na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu 1953. godine. Svoju celokupnu stručnu aktivnost usmerio na istraživanje građevinskih materijala nemetaličnog porekla kao i na projektovanje pogona za proizvodnju istih. Radio kao stručni i naučni saradnik, odnosno kao glavni projektant u Institutu za ispitivanje materijala Srbije, Centru za unapređenje građevinarstva Savezne građevinske komore, Rudarskom institutu, Jugoslovenskom građevinskom centru i projektnoj organizaciji „Interprojekt”, Beograd.

Tokom svog radnog staža, kao i kasnije, objavio preko 120 stručnih i naučno-istraživačkih radova iz domena građevinskih materijala. Kao projektant i glavni projektant učestvovao u izradi preko 80 investicionih programa i studija izgradnje pogona za proizvodnju građevinskih materijala. Učesnik sa referatima na više inostranih i domaćih simpozijuma. Objavio 4 knjige - Udžbenike za učenike srednjih i studente viših skola od kojih je poslednji - Priručnik za proizvodnju i primenu građevinskih materijala nemetaličnog porekla - objavljen 2000. godine u dva toma na preko 1 200 strana namenjen studentima fakulteta i projektantima pogona za proizvodnju građevinskih materijala.

Primena metode integrala kvadrata greške preteka faze i pojačanja u postupku podešavanja parametara proporcionalno integralno diferencijalnog regulatora

Stručni rad
UDK: 621.3.05

Rezime:

U radu je predstavljen postupak podešavanja proporcionalno integralno diferencijalnog regulatora primenjen na klasu procesa, čije se dinamičko ponašanje može opisati aproksimativnom funkcijom prvog reda sa transportnim kašnjenjem. Takvi procesi u industriji su temperatura, pritisak, nivo, protok i slično.

Obrasci dobijeni u postupku projektovanja vrlo su jednostavni i mogu se lako implementirati u realnom procesu. Rezultati u pogledu robustnosti modela sistema upravljanja, kao i ispunjenja zahtevanih performansi, sasvim zadovoljavaju.

Ključne reči: proporcionalno integralno diferencijalni regulatori, dinamičko ponašanje, transportno kašnjenje, proces

Abstract:

APPLICATION OF INTEGRAL SQUARE ERROR-GAIN PHASE MARGIN METHOD IN THE PROCEDURE OF PROPORTIONAL INTEGRAL DIFFERENTIAL REGULATOR ADJUSTMENT

The paper deals with the procedure of proportional integral differential regulator adjustment applied on the process class, the dynamic behaviour of which may be described by the first approximate function with transport delay. Such processes in industry are temperature, pressure, level, flow and similar.

Forms obtained in the design procedure are very simple and can be easily implemented in the real process. Results regarding the robustness of the control system model, as well as the realization of required performances are completely satisfactory.

Key words: proportional integral differential regulators, dynamic behaviour, transport delay, process

1. UVOD

Poslednjih deset godina u literaturi se mogu pronaći modeli za dobijanje optimalnih parametara PI i proporcionalno integralno diferencijalnog regulatora (Astrom and Hagglund, 1995; Smith and Corripio, 1985; Zhuang and Atherton, 1993). Zajednički pristup u ovim modelima je minimizacija indeksa performanse. Poznati indeksi performansi su: integral

kvadrata greške (*ISE-Integral Square Error*), integral apsolutne greške (*Integral Absolute Error*) i integral proizvoda vremena i signala greške (*Integral Time Absolute Error*). Oni su definisani kao

$$\begin{aligned} ISE &= \int_0^{\infty} e^2(t) dt, \\ IAE &= \int_0^{\infty} |e(t)| dt \\ ITAE &= \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \end{aligned} \quad (1)$$

Mr Dragan Trtica, dipl. el. ing.; – „EPS” JP „Panonske elektrane”, Novi Sad, TE-TO 23 000 Zrenjanin, Pančevačka b.b.

gde je $e(t)$ signal greške. U ovom radu prezentiran je postupak dobijanja parametara *proporcionalno integralno diferencijalnog (PID)* regulatora [1], koji objedinjuje zadovoljavajuću robustnost sistema pri delovanju poremećaja na ulazu u objekat upravljanja i promenu referentne vrednosti (u vidu jediničnih odskočnih funkcija), kao i optimalne projektne zahteve određene minimizacijom integrala kvadrata greške (*ISE*). Klasičan pristup, pri projektovanju sistema automatskog upravljanja sa zatvorenim povratnom spregom, polazi od ispunjenja uslova u pogledu zadovoljavajućeg preteka pojačanja i preteka faze [2].

Tada je garantovano da varijacije pojačanja i faznog kašnjenja neće prouzrokovati nestabilnost sistema. Kombinujući prednosti ove metode preteka faze i pojačanja (*Gain Phase Margin*) sa metodom minimizacije kriterijuma performanse ISE, dobijena je metoda ISE- GPM [3] koja obezbeđuje željene performanse sistema upravljanja. Dobijene formule

su primenljive za *on-line* identifikaciju [1], odnosno prilikom upotrebe samopodešavajućih (*self-tuning*) regulatora, koji su značajno zastupljeni u mnogim termoenergetskim postrojenjima.

2. OPTIMALNE VREDNOSTI PRETEKA FAZE I POJAČANJA

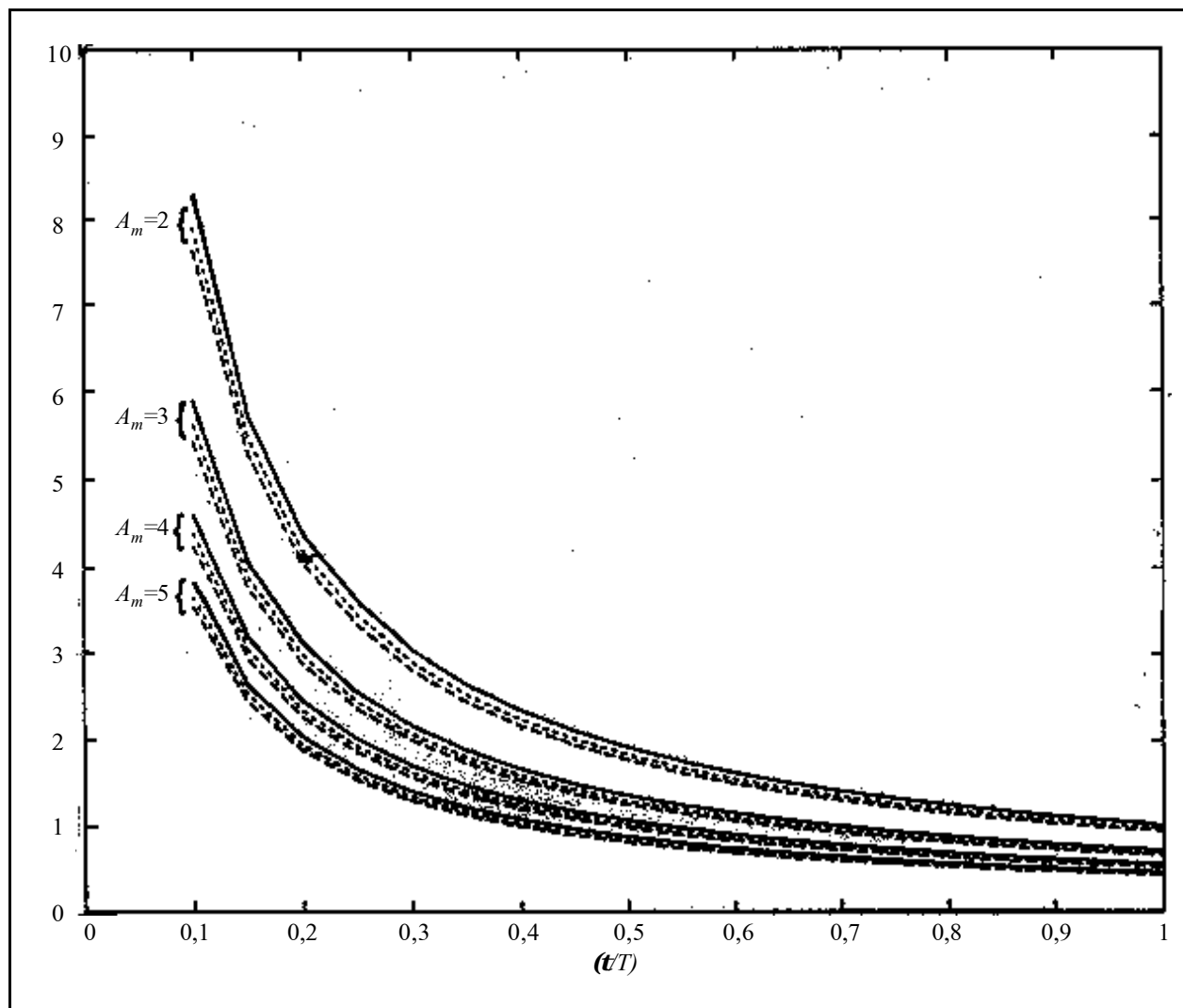
Pretek faze f_m i pretek pojačanja A_m dati su u sledećim izrazima

$$f_m = \arg[G_c(j\omega_g)G_p(j\omega_g)] + p \quad (2)$$

$$A_m = \frac{1}{|G_c(j\omega_p)G_p(j\omega_p)|} \quad (3)$$

gde je ω_g dato sa

$$|G_c(j\omega_g)G_p(j\omega_g)| = 1 \quad (4)$$



Slika 1. Rešenje za K_c za opseg $A_m(2,3,4,5)$, $f_m(30^\circ:—;45^\circ: \dots;60^\circ: - - -)$ i $t/T(0,1-1)$

a w_p

$$\arg[G_c(jw_p)G_p(jw_p)] = -p \quad (5)$$

Prenosna funkcija PID regulatora data je

$$G_c = K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) \quad (6)$$

Funkcija prenosa procesa data je izrazom

$$G_p(s) = \frac{K_p}{(Ts + 1)} e^{-\tau_s} \quad (7)$$

Zamenjujući jednačine (6) i (7) u jednačine (2)-(5) dobija se

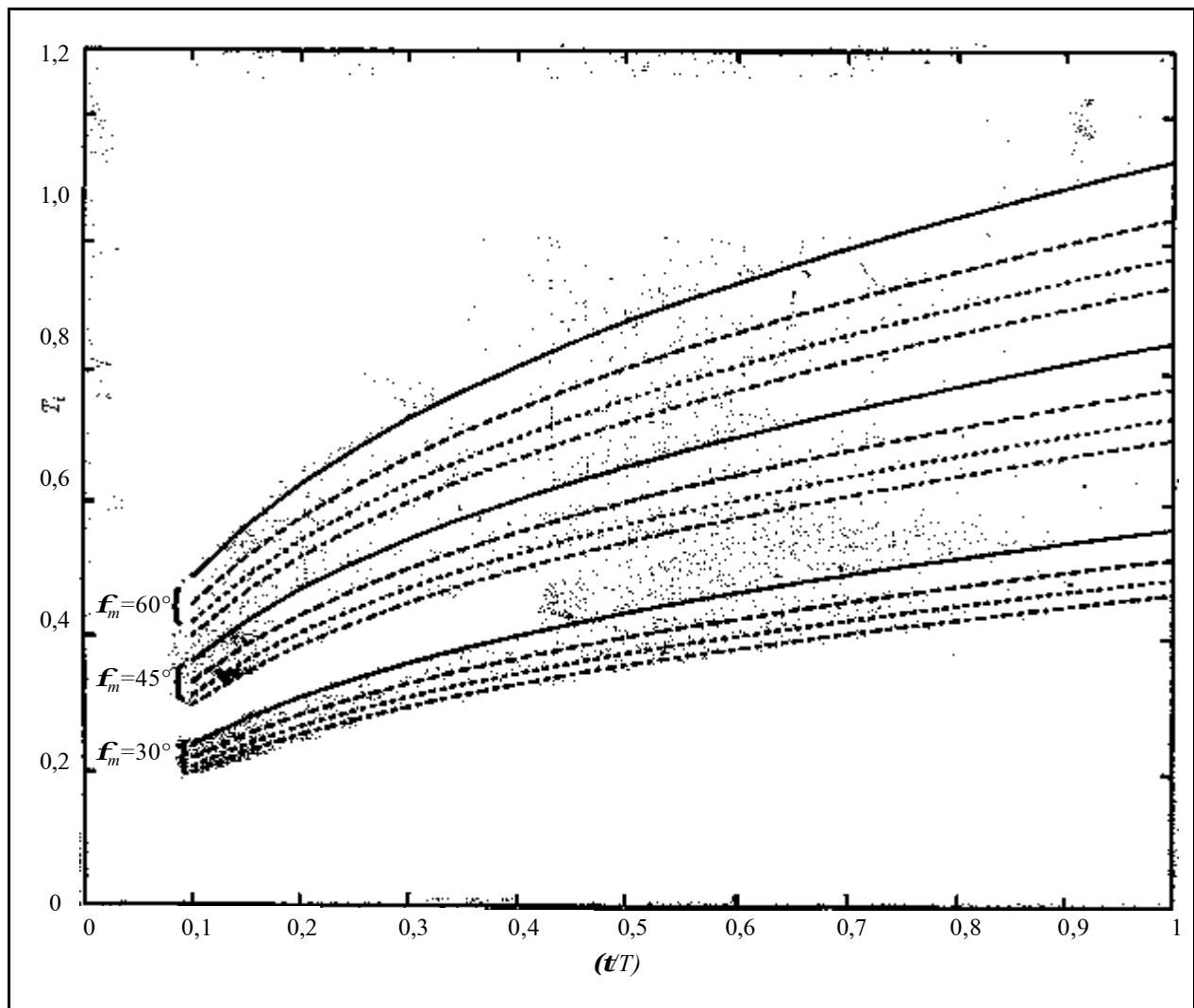
$$f_m = \frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{\omega_g T_i}{1 - w_g^2 T_i T_d}\right) - \arctg(w_g T) - w_p t \quad (8)$$

$$A_m = \frac{w_p T_i \sqrt{1 + w_p^2 T^2}}{K_c K_p \sqrt{w_p^2 T_i^2 + (1 - w_p^2 T_i T_d)^2}} \quad (9)$$

$$\frac{w_g T_i \sqrt{1 + w_g^2 T^2}}{K_c K_p \sqrt{w_g^2 T_i^2 + (1 - w_g^2 T_i T_d)^2}} = 1 \quad (10)$$

$$\frac{p}{2} + \arctg\left(\frac{w_p T_i}{1 - w_p^2 T_i T_d}\right) - \arctg(w_p T) - w_p t = 0 \quad (11)$$

U postupku određivanja parametara K_c , T_i i T_d , parametri modela procesa (K_p , T , t) i specifikacija projekta u pogledu željenog preteka faze i pojačanja (A_m , f_m) poznate su veličine u jednačinama (8)-(11). Nepoznate veličine su, takođe i prosečne kružne učestanosti (w_p , w_g). Dakle, imamo sistem od četiri jednačine sa pet nepoznatih veličina. Dodatni uslov moguće je dobiti minimizacijom *ISE* kriterijuma pri dejstvu poremećaja na ulazu u objekat uprav-



Slika 2. Rešenje za T_i za opseg A_m (2:—; 3: - - -; 4:; 5: - . - .), f_m (30° , 45° , 60°) i t/T (0, 1-1)

ljanja, ili promenom referentne vrednosti na ulazu sistema, datih u vidu jediničnih odskočnih funkcija. Nalaženje optimalnih vrednosti za K_p , T_i i T_d , pri kojima se optimizira ISE kriterijum performanse, svodi se na primenu neke od metoda minimizacije funkcija sa više promenljivih (pogledati *Prilog*).

Neka od rešenja za K_p , T_i i T_d koja optimizuju odziv, pri dejstvu poremećaja d na ulazu u objekat upravljanja data su na slici 1-3.

Odgovarajuće krive dobijene metodom najmanjih kvadrata daju vrednosti za posmatrane opsege A_m , f_m i t/T .

$$K_c = \frac{1,7022}{K_p} A_m^{-0,8432} f_m^{-0,116} (t/T)^{-0,908}, \quad 2 \leq A_m \leq 5,$$

$$T_i = 1,2497 T A_m^{-0,2099} f_m^{1,0082} (t/T)^{0,3678}, \quad p/6 \leq f_m \leq p/3,$$

$$T_d = 0,4763 T A_m^{-0,0961} f_m^{-0,328} (t/T)^{1,0317}, \quad 0,1 \leq t/T \leq 1.$$

Sličnim postupkom dobijena su neka od rešenja za K_c , T_i i T_d , koja optimiziraju odziv sistema na promenu referentne vrednosti i data su izrazima

$$K_c = (1,8578/K_p) A_m^{-0,9087} f_m^{0,0821} (t/T)^{-0,9471},$$

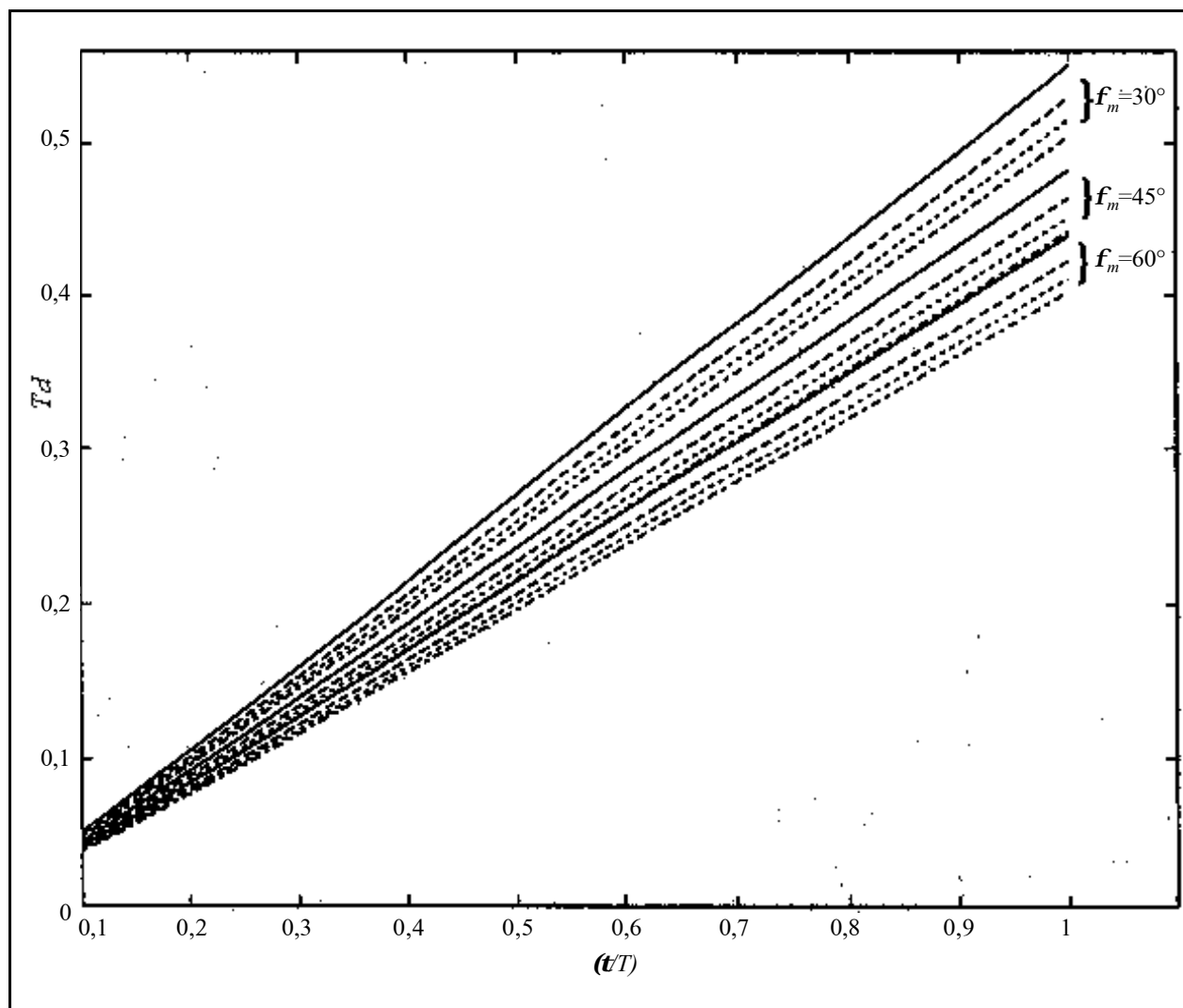
$$T_i = \frac{0,021T(1+0,3289A_m+6,4572f_m+25,1914(t/T))}{1+0,0625A_m-0,8079f_m+0,347(t/T)},$$

$$T_d = 0,4899 T A_m^{-0,0845} f_m^{0,1457} (t/T)^{1,0264}$$

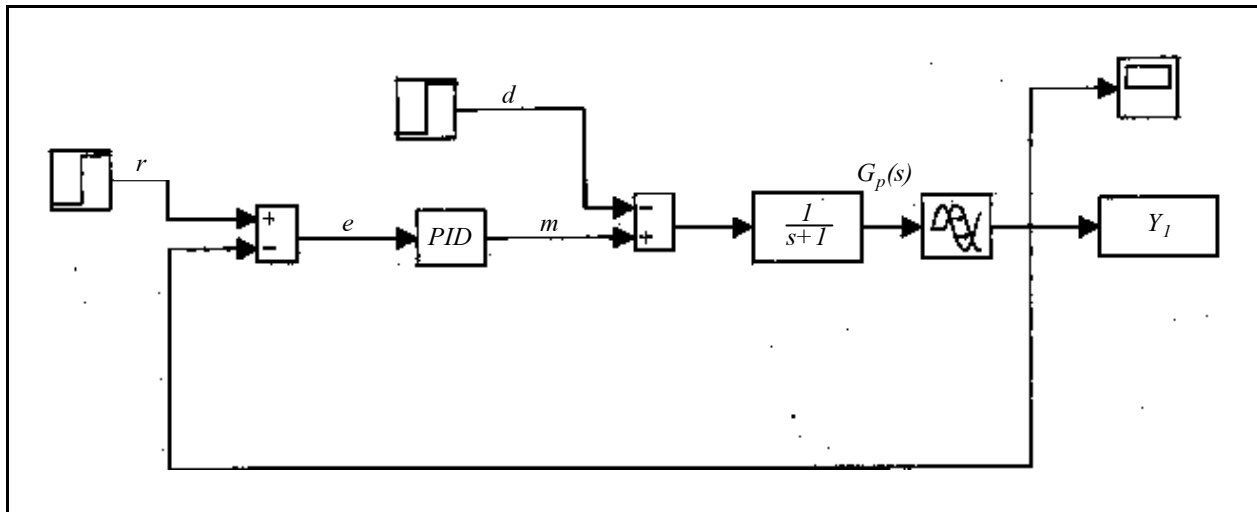
za iste promene opsega A_m , f_m i t/T .

3. TEST PRIMER

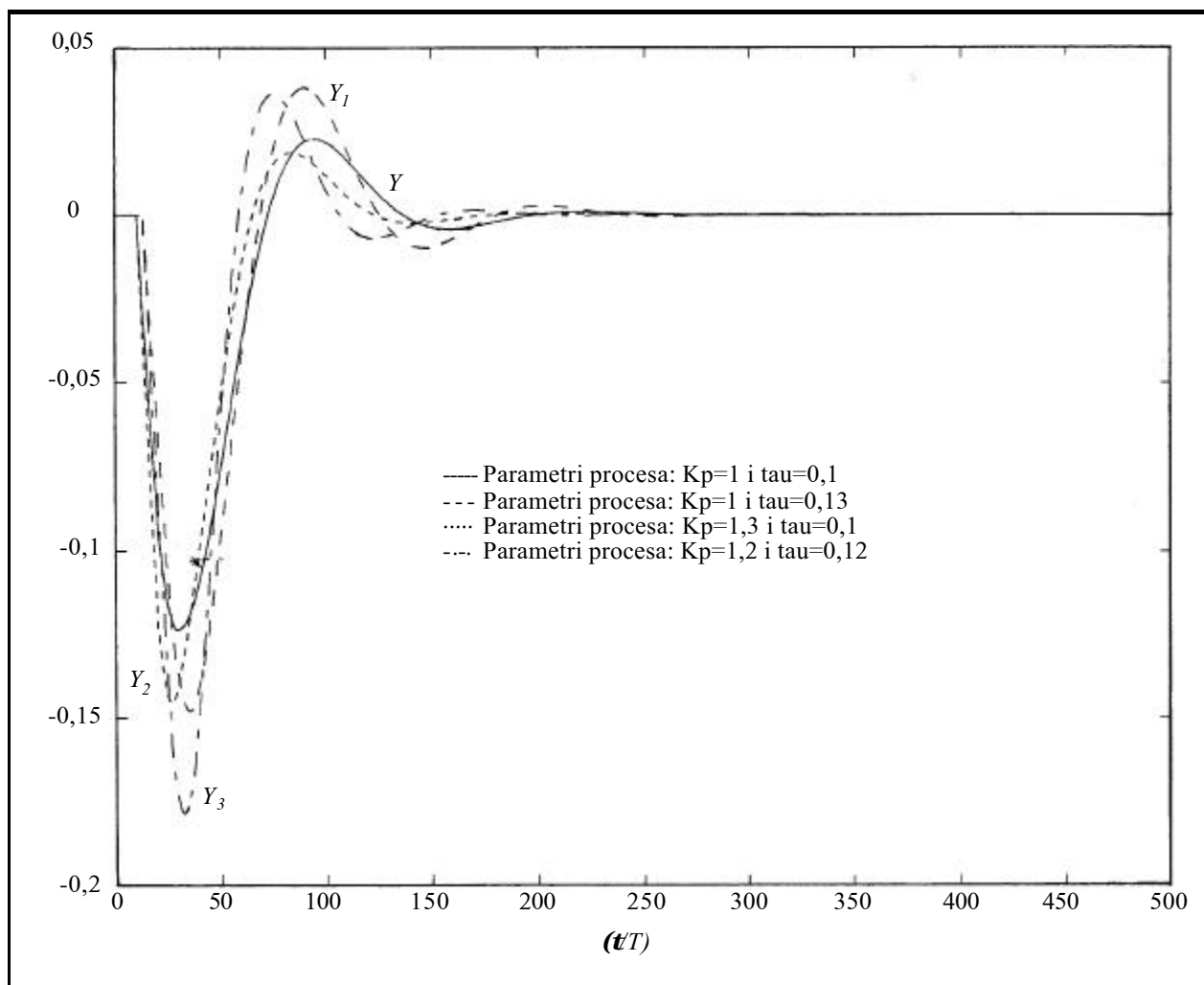
Model regulacije napajanja kotla vodom, aproksimiran je funkcijom prenosa



Slika 3. Rešenje za T_d za oseg A_m (2:—;3: - - -;4:;5: -.-.-), f_m ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) i t/T (0,1-1)



Slika 4. Strukturni blok-dijagram konture regulacije



Slika 5. Odzivi upravljane promenljive Y na dejstvo poremećaja d na ulazu u objekat upravljanja, za parametre regulatora $K_c=5,8789$, $T_i=0,2216$ i $T_d=0,0493$

$$G_p(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0,1s}$$

Na slici 4 dat je strukturni blok-dijagram konture regulacije. U projektovanju parametara regulacije po sva tri navedena kriterijuma performanse, preporučuje se područje preteka pojačanja i preteka faze od 2-5 i 30-60°, respektivno [6]. Za parametriranje PID regulatora prema ISE-GPM metodi, specificirane su vrednosti za pretek pojačanja i pretek faze i one iznose $A_m=3$ i $f_m=30^\circ$, respektivno.

Najpre je izvršena simulacija konture regulacije na dejstvo poremećaja d tipa jedinične odskočne funkcije koji deluje na ulaz u objekat upravljanja. Simulacija je rađena u SIMULINKU, najpre na nominalnom modelu procesa (slika 5 Y:-), a potom za 30% povećanje transportnog kašnjenja t (slika 5 Y1:-- i pojačanja K_p (slika 5 Y2: ...) u odnosu na odgovarajuće vrednosti nominalnog modela funkcije prenosa procesa i najzad, za 20% povećanje trans-

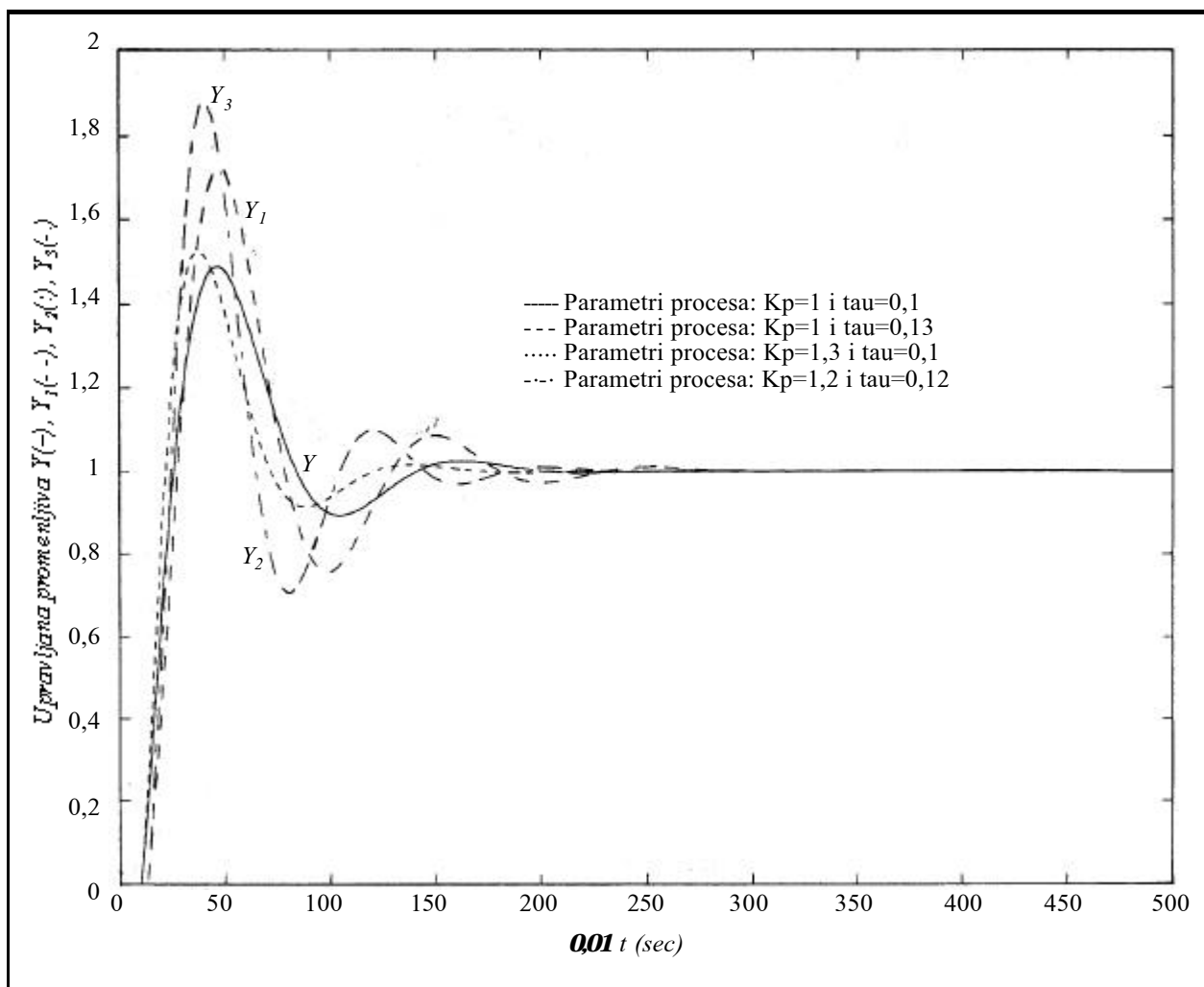
portnog kašnjenja i pojačanja, istovremeno (slika 5 Y3: -).

Odzivi upravljane promenljive Y na promenu referentne promenljive r , za iste promene parametara funkcije prenosa procesa dati su na slici 6.

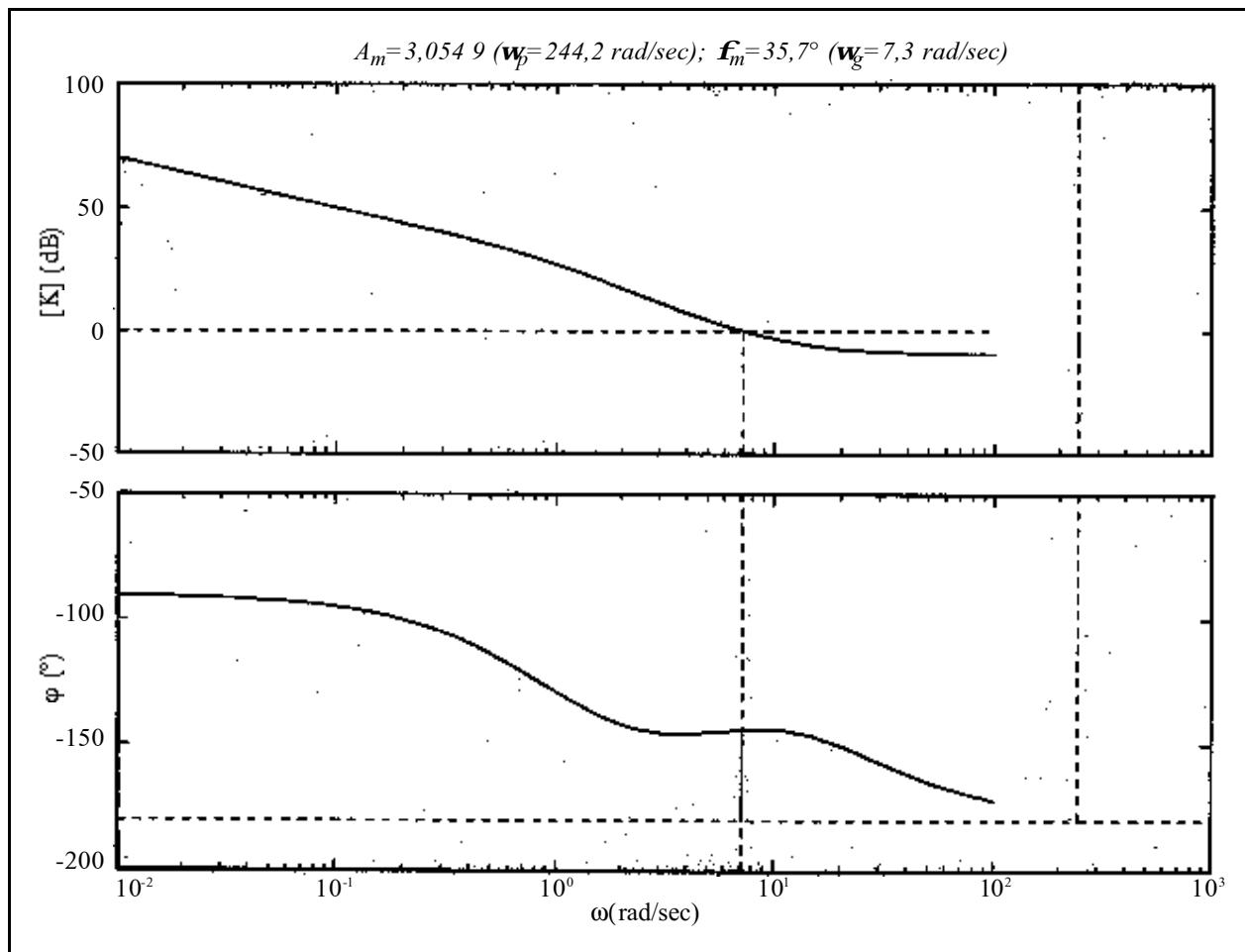
Očigledno je da, kada bi optimiziranje konture regulacije bilo samo po minimumu integrala kvadrata greške, sistem bi povećao brzinu reagovanja (smanjeno vreme kašnjenja i uspona), ali to ima za posledicu nedopustivog povećanja preskoka, a time i nedovoljnog preteka stabilnosti. Upravo sa korekcijom preteka stabilnosti, čije mere su pretek faze i pojačanja, postiže se zadovoljavajući kompromis.

Pretek faze i pretek pojačanja funkcije povratnog prenosa za parametre regulacije $K_c=5,878$ 9 $T_i=0,221$ 6 i $T_d=0,049$ 3 ilustrovani su frekventnim karakteristikama na slici 7.

Na osnovu vrednosti preteka pojačanja ($A_m=3,05 > 1$) i preteka pojačanja ($f_m > 0$) može se zaključiti da sistem ima dovoljan pretek stabilnosti.



Slika 6. Odzivi upravljane promenljive Y na dejstvo promene referentne promenljive r , za parametre regulatora $K_c=5,745$ 7, $T_i=0,208$ 03 i $T_d=0,038$ 2



Slika 7. Frekventni dijagrami preteka pojačanja i preteka faze funkcije povratnog prenosa ($\omega_g=7,3$ rad/sec; $\omega_p=244,2$ rad/sec)

Pretek faze i pojačanja funkcije povratnog prenosa za parametre regulacije $K_c=5,7457$, $T_i=0,20803$ i $T_d=0,0382$ dati su frekventnim karakteristikama na slici 8. Vrednosti preteka pojačanja i preteka faze ukazuju na dovoljan pretek stabilnosti sistema.

4. PRILOG

Funkcija spregnutog prenosa sistema, kada je pobuđen jediničnim odskočnim signalom $r(t)$ data je u sledećoj formi

$$C/R(s) = C/R(s; I_1, I_2, \dots, I_q) \quad (1)$$

gde su I_1, I_2, \dots, I_q podešljivi parametri sistema, čije vrednosti treba odrediti.

Ako se sistem u trenutku $t=0$ pobudi jediničnom odskočnom funkcijom $r(t)=h(t)$, kompleksni lik izlaza sistema će se dobiti u formi, datoj jednačinom (2)

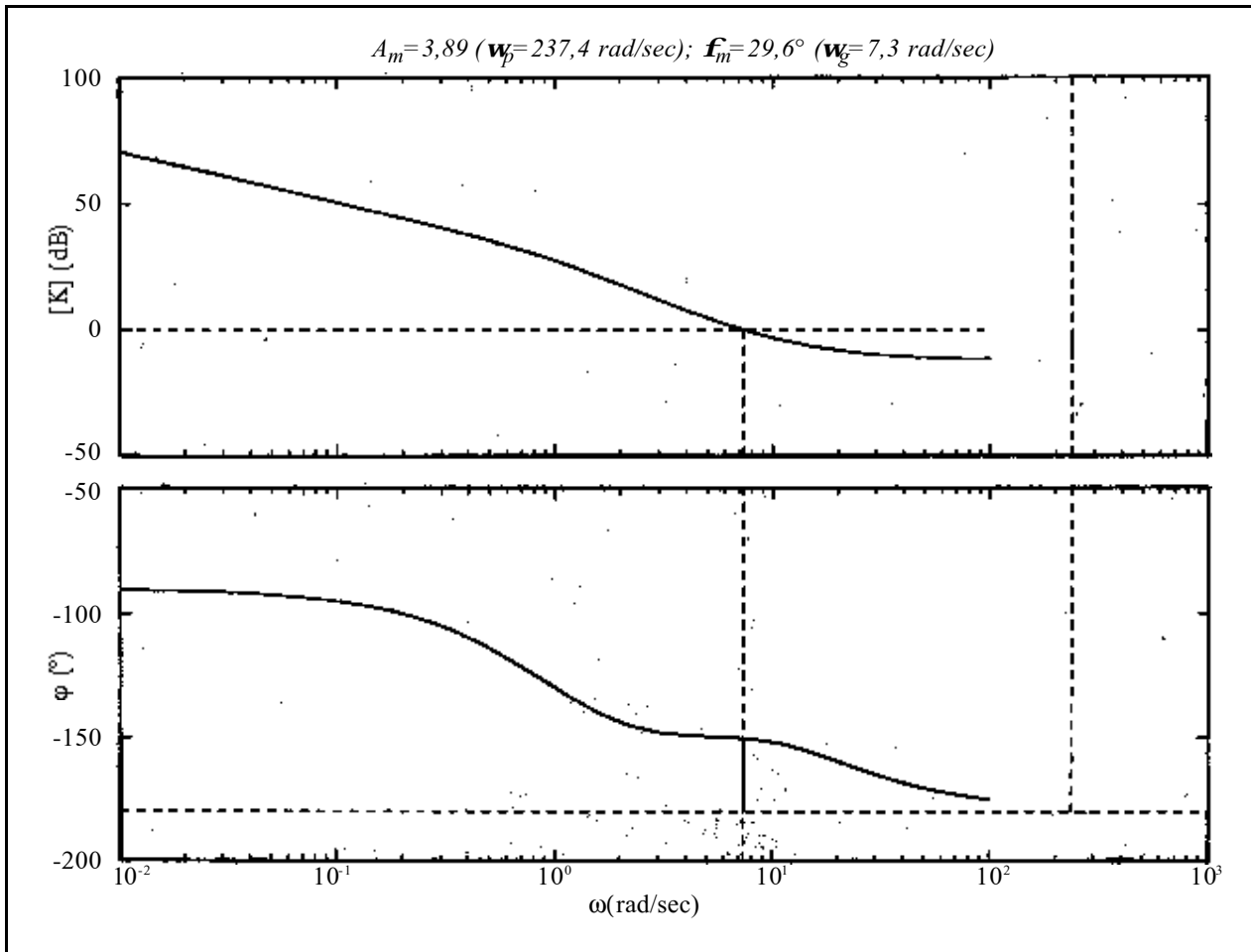
$$C(s) = C/R(s; I_1, I_2, \dots, I_q) R(s) = (B(s)/A(s)) 1/s = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \frac{1}{s}$$

U datom izrazu za kompleksni lik regulisane promenljive $c(t)$, podešljivi parametri su sadržani u koeficijentima b_i i a_j ($i=1,2, \dots, m; j=1,2, \dots, n$) polinoma u brojiocu i imeniocu.

Za stabilan sistem, sve nule polinoma $A(s)$ leže u levoj poluravni s -ravni. Vrednost promenljive $c(t)$ iz prethodnog izraza, može se odrediti primenom krajnje granične teoreme Laplasove transformacije [2]. Signal greške može se predstaviti u formi

$$e(t) = c(\infty) - c(t) = \frac{b_0}{a_0} \mathcal{L}^{-1} [C(s)], t > 0. \quad (3)$$

U rešavanju problema parametarske optimizacije u odnosu na minimum integrala kvadrata greške, pogodno je najpre ovaj integral izraziti u funkciji



Slika 8. Frekventni dijagrami preteka pojačanja i preteka faze funkcije povratnog prenosa
($\omega_g=7,3 \text{ rad/sec}$; $\omega_p=237,4 \text{ rad/sec}$)

kompleksnog lika greške $E(s)$. Koristeći Parsevalovu teoremu [2] dobijamo

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} E(s) E(-s) ds \quad (4)$$

gde je s obzirom na (2) i (3)

$$E(s) = (b_0/a_0) 1/s - C(s) = (b_0/a_0 - B(s)/A(s)) 1/s$$

Smenom prethodnog izraza u jednačinu (4), dobija se

$$J = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} [b_0/a_0 - B(s)/A(s)] (B(-s)/A(-s) - b_0/a_0) 1/(s^2) ds \quad (5)$$

Rešenje integrala se dobija kao

$$J = 1/(2a_0^2 D) (B_0 D_0 + B_1 D_1 + \dots + B_{m-1} D_{m-1} + B_m D_m) - (b_0 b_1 / a_0^2) \quad (6)$$

gde D - predstavlja Hurvicovu determinantu u nešto izmenjenom obliku

$$D = \begin{vmatrix} a_0 & -a_2 & a_4 & -a_6 & \dots & \dots \\ 0 & a_1 & -a_3 & a_5 & \dots & \dots \\ 0 & -a_0 & a_2 & -a_4 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -a_1 & a_3 & \dots & \dots \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} \dots \end{vmatrix} \quad (7)$$

Sa D_k ($k=0, 1, 2, \dots, m-1, m$) u jednačini (6) označene su determinante koje se dobijaju zamenom u determinanti D , $(k+1)$ -ve kolone, kolonom

$$\begin{matrix} a_1 \\ a_0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{matrix}$$

Koeficijenti B_0, B_1, \dots su dati relacijama

$$\begin{aligned} B_0 &= b_0^2 \\ B_1 &= b_1^2 - 2b_0b_1 \\ B_2 &= b_2^2 - 2b_1b_3 + 2b_0b_4 \\ &\dots \\ B_k &= b_k^2 - 2b_k b_{k+1} + 2b_{k-2} b_{k+2} + \dots + 2(-1)^k b_0 b_{2k} \\ &\dots \\ B_m &= b_m^2 \end{aligned} \quad (8)$$

U determinanti (7), nulama se zamenjuju svi članovi koji imaju indekse manje od nule ili veće od n , a u formulama (8), svi članovi sa indeksima manjim od nule i većim od m .

Funkcija spregnutog prenosa za dati primer glasi

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

gde su koeficijenti dati kao: $b_3 = -2K_p K_c T_i T_d \mathbf{t}$; $b_2 = 2K_p K_c (T_d - \mathbf{t})$; $b_1 = 2K_p K_c (T_i - \mathbf{t})$; $b_0 = 2K_p K_c$; $a_3 = T_i T \mathbf{t} - 2K_p K_c T_i T_d \mathbf{t}$; $a_2 = T_i [2K_p K_c (T_d - \mathbf{t}) + (2T + \mathbf{t})]$; $a_1 = 2[T_i + K_p K_c (T_i - \mathbf{t})]$; $a_0 = 2K_p K_c = b_0$.

Preuređenjem ovih jednačina dobija se sledeća forma: $b_0 = 2K_p K_c$; $b_1 = b_0 (T_i - \mathbf{t})$; $b_2 = b_0 (T_d - \mathbf{t})$; $b_3 = -b_0 T_i T_d \mathbf{t}$; $a_0 = b_0$; $a_1 = 2T_i - b_1$; $a_2 = T_i (b_2 + 2T + \mathbf{t})$; $a_3 = T_i T \mathbf{t} + b_3$.

Hurvicova determinanta ima oblik

$$D = \begin{vmatrix} a_0 & -a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & -a_3 \\ 0 & -a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_0 (a_1 a_2 - a_0 a_3)$$

Sračunavanjem determinanti D_0, D_1, D_2, D_3 i koeficijentata B_0, B_1, B_2 i B_3 i ubacivanjem u jednačinu (6), dobija se funkcija J od podešljivih parametara sistema K_c, T_i i T_d sadržanih u koeficijentima a_i i b_i .

Potrebne uslove za ekstremum funkcije J dobija se izjednačavanjem sa nulom parcijalnih izvoda funkcije $J(K_c, T_i, T_d)$, po svim podešljivim parametrima:

$$\frac{\partial J}{\partial K_c} = 0 \quad \frac{\partial J}{\partial T_i} = 0 \quad \frac{\partial J}{\partial T_d} = 0.$$

Rad je primljen u uredništvo 01. 07. 2002. godine



Mr Dragan Trtica, dipl. el. ing. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, Elektrotehnički odsek, na smeru Automatika i računarska tehnika. Magistrirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Upravljanje sistemima. Tokom rada u TE-TO specijalizovao se za rad na digitalnom sistemu upravljanja TELEPERM ME, poznatog proizvođača SIEMENS. Objavio je stručne radove u domaćim časopisima. Autor rada je zaposlen u TE-TO Zrenjanin i radi na radnom mestu rukovodioca proizvodnje.

5. ZAKLJUČAK

Rezultati simulacije pokazuju da primenjena metoda daje veću robustnost sistema u odnosu na neke druge, što je od izuzetne važnosti u pogledu stabilnosti samog sistema. Sa druge strane, performanse sistema u pogledu dinamičkih karakteristika su nešto slabije, što je svakako rezultat postizanja kompromisa u pogledu stabilnosti i željenih dinamičkih karakteristika sistema.

Dobijeni obrasci su vrlo prilagodljivi za primenu u on-line sistemima, na procesima koji se mogu opisati aperiodičnom funkcijom prvog reda sa transportnim kašnjenjem. Takvi procesi su zastupljeni u hidro i termoenergetskim postrojenjima, gde bi realizacija relativno jednostavnog algoritma implementiranog na samopodešavajućim regulatorima ili regulatorima sa automatskim podešavanjem (auto-tuning) dala sasvim dobre rezultate.

6. LITERATURA

- [1] Stojić M. R., DIGITALNI SISTEMI UPRAVLJANJA, Nauka, Beograd, 1994.
- [2] Stojić M. R., KONTINUALNI SISTEMI UPRAVLJANJA, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [3] W. K. Ho, K. W. Lim, Wen Xu, OPTIMAL GAIN AND PHASE MARGIN TUNING FOR P I D CONTROLLERS, Automatica, Vol. 34, No.8, pp. 1009-1014, 1998.
- [4] Astrom, K. J., C. C. Hang, P. Persson and W. K. Ho, TOWARDS INTELLIGENT CONTROL, Automatica, Vol. 28, 1-9, 1992.
- [5] Astrom, K. J. and Atherton, D. P., AUTOMATIC TUNING OF OPTIMUM P I D CONTROLLERS, IEE Proc. D, 1993, 140, (3), pp. 216-224
- [6] Zhuang, M., and Atherton, D. P., OPTIMAL P I D CONTROLLER SETTING USING INTEGRAL PERFORMANCE CRITERIA, Proc. 1991. ACC, 3, pp. 3042-3043

Božidar Rajnović

Razvoj modela osnovnih progresivnih resursa u izgradnji složenih proizvodnih sistema

– četvrti deo –

Originalni naučni rad

UDK: 620.4

Rezime:

Potreba uspostavljanja uklopno-prelaznog domena respektivno se nametnula, kao posledica analize dosadašnjih teorijskih i empirijskih istraživanja domena energetskih i drugih progresivnih gradilišnih resursa izgradnje složenih proizvodnih sistema.

Na osnovu teorijskih hipotetičkih postavki, postavljena je diferencijalna jednačina dinamičke promene osnovnih progresivnih gradilišnih resursa u domenu uklopno-prelazne faze i nadene familije njenih rešenja. Ispitivanja i provere novopostavljenih teorijskih postavki osnovnih progresivnih gradilišnih resursa mašinske montaže složenih proizvodnih sistema izvršeni su na više primera u slučaju izgradnje Termoelektrane Zrenjanin.

Od više primera, u ovom članku biće obrađen samo jedan reprezentativan primer, resurs radne snage „Termoelektro”, Beograd.

Ključne reči: osnovni resursi, složeni proizvodni sistemi, diferencijalna jednačina, eksponencijalni karakter promene

Abstract:

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

- part four -

The need for establishing the mounting and changeover phase was imposed as a consequence of theoretical and empiric analysis carried out so far in the domain of basic energetic and other progressive building site resources in a compound production system under construction.

Based on original theoretical and hypothetical assumptions, a differential equation was established for the dynamic change in the progressive building site resources in the mounting and changeover phase. The families of its solutions were found.

Examinations and verification of the newly established theoretical assumptions of the basic progressive resources of machine mounting in the compound production systems were carried out by giving several examples in the case of TE-TO Zrenjanin. There were several examples, but only one representative example is dealt with in this article and that is the example of man power resources of „Termoelektro”, Beograd.

Key words: basic resources, machine mounting, compound production systems, differential equation

Dr Božidar Rajnović, dipl. maš. ing.

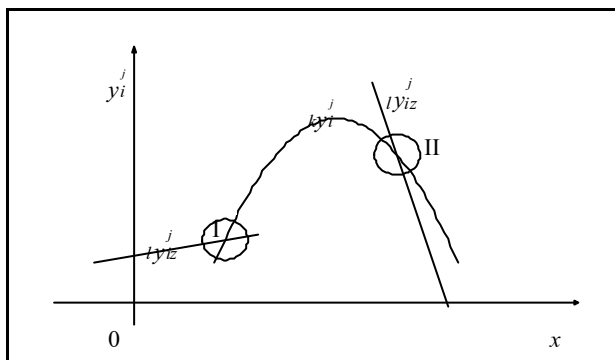
– „EPS”, JP „Panonske elektrane”, Novi Sad, TE-TO Zrenjanin, 23 000 Zrenjanin, Pančevački put b.b.

1. UVOD

Korišćenjem do sada postavljenih teorijskih postulata po izučavanim domenima može se zaključiti sledeće:

- Domen pripremne faze, linearni karakter promene osnovnih resursa izgradnje;
- Domen izrazite dominacije glavnih radova, kvadratni karakter promene osnovnih resursa izgradnje;
- Domen završne faze, linearni karakter promene osnovnih resursa izgradnje.

Kada se sve ovo grafički predstavi (slika 1) dobija se sledeća kompozitna funkcija:



Slika 1. Međusobni položaj do sada teoretski postavljenih karaktera funkcionalnih promena osnovnih resursa

Jasno je da linearna forma pripremno-početnih radova, zbog uvodnog karaktera formiranja gradilišta, ne može imati visoku vrednost koeficijenta pravca. Takođe ista forma mora imati avansno angažovanje osnovnih resursa u tački $x = t = 0$. To uslovljava jako izražen lom u zoni I presečne tačke i zahteva skokovitu promenu funkcije, koja se u praktičnim uslovima pogotovo kod većih gradilišta, ne može izvesti.

U zoni presečne tačke II kriva je matematički rečeno skoro „glatka”, iz čega sledi da je ovaj prelaz, zbog njegove kontinualnosti moguće praktično izvesti na gradilištu, bez ikakvih uklopno-prelaznih formi.

2. RADNA HIPOTEZA U DOMENU UKLOPNO-PRELAZNE FAZE

Na osnovu ove analize, presečnu tačku u zoni I potrebno je tretirati nekom dodatnom uklopno-prelaznom formom.

Uklopna-prelazna forma, na osnovu svega do sada iznetog, mora biti nelinearna i dovoljno agresivna da savlada postignutu izrazitu inerciju linearnog karaktera promene i „glatko” se uklopi u kvadratni karakter promene koja za njim sledi.

Varijacije angažovanja osnovnih resursa, pogotovu u podmaklim fazama pripremnih radova, su toliko značajne da se praćenje karaktera promene putem opštih matematičkih formi zasnovanih na kvantitativnoj osnovi dovodi u pitanje.

Očigledno je da je u ovom slučaju prelazne forme potrebno primeniti sasvim nov prilaz problemu, tako što bi se oslobodili posmatranja resursa u kvantitativnom obimu čak i posredstvom opštih formi.

Potrebe za promenom karaktera prelazne forme ostvaruju se forsiranjem dinamike opštih resursa, čime se oni primoravaju da napuste linearni karakter promene pripremnih radova.

Pošto se dinamika angažovanja resursa izražava kao:

$$y_i^j \quad \frac{dy_i^j}{dx} \quad \frac{dy_i^j}{dt} \quad (1)$$

gde je:

y_i^j - 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,

L - označava pripadnost domenu linearnog završnog karaktera promene,

N - označava pripadnost nepoznatoj karakteristici promene u toku istraživanja,

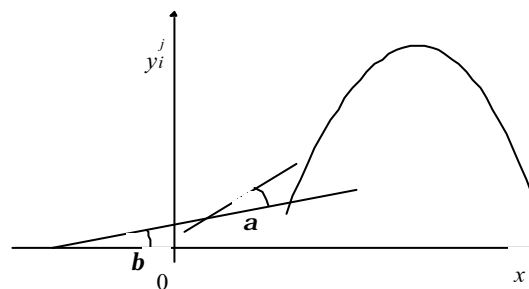
G - generalna aproksimacija posmatranog resursa,

E - eksponencijalna zavisnost promene resursa u uklopno-prelaznom domenu,

K - kvadratna zavisnost u periodu dominacije radova mašinske montaže,

Z - veličina resursa u završnom domenu smanjenja intenziteta radova i gašenja gradilišta.

Prvi izvod predstavlja i vrednost tangensa ugla tangente posmatrane krive, tako da se promena dinamike resursa u tački preseka linearne karakteristike i nepoznate nelinearne prelazne forme može izraziti



Slika 2. Vrednost priraštaja } (D_a) na ugao linearne karakteristike (D_b)

kao odgovarajući priraštaj tangensa ugla, u cilju promene karaktera osnovnih resursa.

Posmatranjem tangensa ugla priraštaja ($tg\alpha$), praktično se posmatra veličina priraštaja resursa kojim se on primorava da napusti linearnu karakteristiku promene. Ovim načinom bi se izbeglo kvantitativno posmatranje resursa, koje je problematično zbog značajnog variranja veličina proizvodnih sistema, koji povlače normalno i multipliciranja variranja sistema izvođača glavnih radova.

Radna hipoteza promene dinamike angažovanja resursa u prelaznoj, praktično presečnoj tački linearne forme pripremljenih radova i nelinearne prelazne forme, tretira tako, kao da se promena dinamike angažovanja resursa kreće u izuzetno uskim tolerantnim granicama. Granice su toliko uske, da se aproksimativno mogu smatrati za konstantnu veličinu u okvirima granski određenog osnovnog resursa izgradnje.

3. POSTAVLJANJE I REŠAVANJE DIFERENCIJALNE JEDNAČINE OSNOVNIH RESURSA SLOŽENIH PROIZVODNIH SISTEMA U PRELAZNOM PERIODU

Priroda postavljene radne hipoteze uvodi u savim drugi domen opservacije, koji zahteva adekvatne matematičke forme za njegovo izučavanje.

U opštem slučaju ona se svodi, u matematičkom smislu, na iznalaženje izogonalne trajektorije familije krivih linija, koje se seku pod istim uglom sa familijama pravih koje predstavljaju rešenja diferencijalne jednačine pripremljeno-početnih radova.

Ukoliko se linearna funkcija promene resursa pripremljeno-početnih radova posmatra u opštem obliku:

$$L y_{ip}^j \quad L m_{ip}^j x \quad L n_{ip}^j \quad (2)$$

Onda je problem teško rešiv (jer je ceo Dekartov koordinatni sistem u ravni pokriven sa dve slobode kretanja, kada je u pitanju linearna forma - translacijom i rotacijom), iz razloga što proklamovani princip istog ugla, radne hipoteze, nije matematički izvodljiv.

Međutim, izjednačavanjem $L n_{ip}^j = 0$ sa nulom, sistem gubi jedan sistem slobode tj. translaciju i postaje centralni (sve prave prolaze kroz koordinatni početak), a od sloboda kretanja zadržava samo rotaciju. Zadovoljiti oba zahteva matematički definisana kao:

$$L y_{ip}^j \quad L m_{ip}^j x \quad L n_{ip}^j \quad (2)$$

$$L y_{ip}^j \quad L m_{ip}^j x \quad (3)$$

moguće je izvršiti samo translacijom duž jedne od koordinatnih osa do koordinatnog početka, čime se svaka prava oblika (2) prevodi u oblik (3).

Ovakav način prilaza problemu ne menja ništa u suštini, jer se više ne posmatra kvantitativni obim angažovanja resursa, nego dinamika angažovanja resursa, predstavljena matematičkim formalizmom posredstvom jednačine (3), tako da se vrednost slobodnog člana $L n_{ip}^j$ može zanemariti. Matematički gledano to je takođe moguće izvesti, jer se posmatranjem prvog izvoda gube svi članovi izraza koji ne sadrže promenljivu po kojoj se prvi izvod traži.

Prema tome, uvažavajući obrazloženja i ograničenja, problem se svodi na iznalaženje izogonalne trajektorije krivih koje će se seći pod uglom α pri čemu je:

$$L y_{ip}^j \quad g_{L}^{.q} m_{ip}^j x \quad (4)$$

$$tg \quad g_{L}^{.q} k_{ip}^j \quad (5)$$

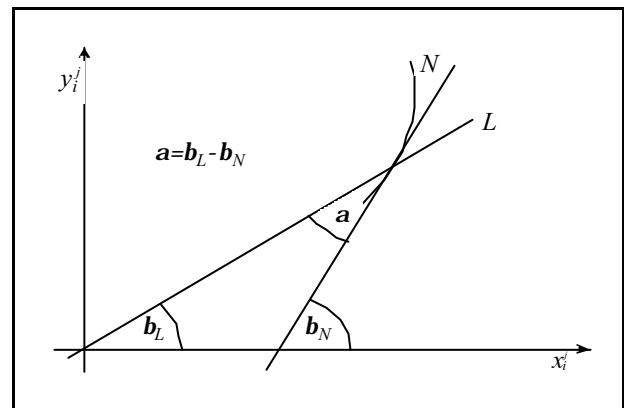
Eliminacijom $g_{L}^{.q} m_{ip}^j$ iz jednačine (4) dobija se diferencijalna jednačina date familije pravih (6)

$$L y_{ip}^j \quad g_{L}^{.q} m_{ip}^j \quad (6)$$

$$L y_{ip}^j \quad \frac{L y_{ip}^j}{x} \quad (6)$$

dobija se

Diferencijalna jednačina izogonalnih trajektorija dobiće se ako se ugao α posmatra kao razlika ugla koji zaklapa linearna karakteristika posmatranog resursa i ugla koji zaklapa nelinearna karakteristika u tački njihovog preseka.



Slika 3. Grafički prikaz nelinearne i linearne karakteristike promene osnovnih resursa i odgovarajućih uglova u tački preseka

Iz poznate jednačine za spoljašnje uglove trougla (slika 3) dobija se:

$$\quad) \quad N \quad) \quad) \quad L \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \left. \right) \right) N \left. \right) L \end{array} \right) \quad (8)$$

Iz jednačine (8) sledi:

$$\begin{aligned} & \operatorname{tg} \quad \operatorname{tg} \quad N \quad L \\ & \operatorname{tg} \quad N \quad L \quad \frac{\operatorname{tg} \quad N \quad \operatorname{tg} \quad L}{1 \quad \operatorname{tg} \quad N \operatorname{tg} \quad L} \end{aligned}$$

Tretiranjem tangensa kao odgovarajućih prvih izvoda, što oni u suštini i jesu, uz uvažavanje jednakosti (5) dobija se:

$$\begin{aligned} & \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1} \frac{{}^N y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^L y_i^j}{{}^L y_i^j} \\ & \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1} \frac{{}^N y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^L y_i^j}{{}^L y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^L y_i^j}{{}^L y_i^j} \\ & \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{{}^L y_i^j} \frac{{}^L y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{{}^L y_i^j} \\ & \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{{}^L y_i^j} \frac{{}^L y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{{}^L y_i^j} \frac{{}^L y_i^j}{{}^N y_i^j} \left/ \right. 1 \\ & \frac{{}^L y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^L y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^N y_i^j} \end{aligned} \quad (9)$$

Pošto u samoj tački preseka linearne i nelinearne karakteristike važi:

$$\frac{{}^N y_i^j}{x} = \frac{{}^L y_i^j}{x} \quad (10)$$

to se na osnovu jednačine (6) jednačina (10) transformiše u:

$$\frac{{}^L y_i^j}{{}^N y_i^j} = \frac{{}^N y_i^j}{x} \quad (11)$$

Uvrštavanjem vrednosti jednačine (11) u diferencijalnu jednačinu izogonalnih trajektorija dobija se:

$$\begin{aligned} & \frac{{}^N y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{x} \\ & \text{odnosno} \\ & \frac{{}^N y_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^{g,q}k_i^j}{{}^N y_i^j} \frac{{}^N y_i^j}{x} \end{aligned} \quad (12)$$

Uvođenjem smene (13) u jednačinu (12) nakon transformacija koje slede dolazi se do jednačine (14).

$$\frac{{}^N y_i^j}{x} = u \quad (13)$$

$$\frac{{}^N y_i^j}{x} = u \quad x$$

$$\frac{{}^N y_i^j}{x} = u \quad x \quad u$$

$$u \quad x \quad u \quad \frac{u \quad {}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}$$

$$u \quad x \quad u \quad 1 \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j u}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad u \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}$$

$$u \quad x \quad 1 \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j u}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad u \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j u^2}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad u \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}$$

$$u' \quad x \quad 1 \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j u}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad 1 \quad u^2$$

$$u \quad x \quad \frac{\frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad 1 \quad u^2}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}$$

$$x \quad \frac{du}{dx} \quad \frac{\frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad 1 \quad u^2}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}$$

$$\frac{dx}{x \quad du} \quad \frac{1 \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j u}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}}{\frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad 1 \quad u^2}$$

$$\frac{dx}{x} \quad \frac{1 \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j u}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u}}{\frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad {}^{g,q}k_i^j u} \quad 1 \quad u^2} \quad du$$

$$\frac{1}{1 \quad u^2} \quad du \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad u^2} \quad \frac{u}{1 \quad u^2} \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{1 \quad u^2} \quad \frac{dx}{x} \quad (14)$$

Opšte rešenje je oblika:

$$\operatorname{arctg} u \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{2} \ln \left| 1 \quad u^2 \right| \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{2} \ln |x| \quad \ln {}^{g,q}C_i^j \quad (15)$$

Vraćanjem smene (1) u opšte rešenje diferencijalne jednačine (15) dobija se:

$$\operatorname{arctg} \frac{{}^N y_i^j}{x} \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{2} \ln \frac{x^2 \quad {}^N y_i^j{}^2}{x^2}$$

$$\frac{{}^{g,q}k_i^j}{2} \ln |x| \quad \ln {}^{g,q}C_i^j$$

$$\operatorname{arctg} \frac{{}^N y_i^j}{x} \quad \frac{{}^{g,q}k_i^j}{2} \ln x \quad \frac{\sqrt{x^2 \quad {}^N y_i^j{}^2}}{x} \quad \ln {}^{g,q}C_i^j$$

$$\frac{1}{{}^{g,q}k_i^j} \operatorname{arctg} \frac{{}^N y_i^j}{x} \quad \ln {}^{g,q}C_i^j \quad \sqrt{x^2 \quad {}^N y_i^j{}^2} \quad (16)$$

Ovaj oblik rešenja je neprikladan i neprepoznatljiv u ovakvom funkcionalnom obliku, ali prelaskom na polarne koordinate karakter promene uklopne prelazne forme postaje koncizan i prihvatljiv za dalje analize.

U polarnim koordinatama jednačina (16) dobija oblik:

$$\frac{1}{\frac{g,q}{N} k_i^j} \ln \frac{g,q}{N} C_i^j \frac{g,q}{N} k_i^j \quad (17)$$

odnosno

$$\frac{g,q}{N} k_i^j \frac{e}{\frac{g,q}{N} C_i^j} \quad (18)$$

3.1. Diskusija rešenja diferencijalne jednačine prelaznog perioda

Na osnovu prethodnog poglavlja i jednačine (18) može se zaključiti da je opšte rešenje diferenci-

jalne jednačine prelaznog perioda oblika logaritamske spirale.

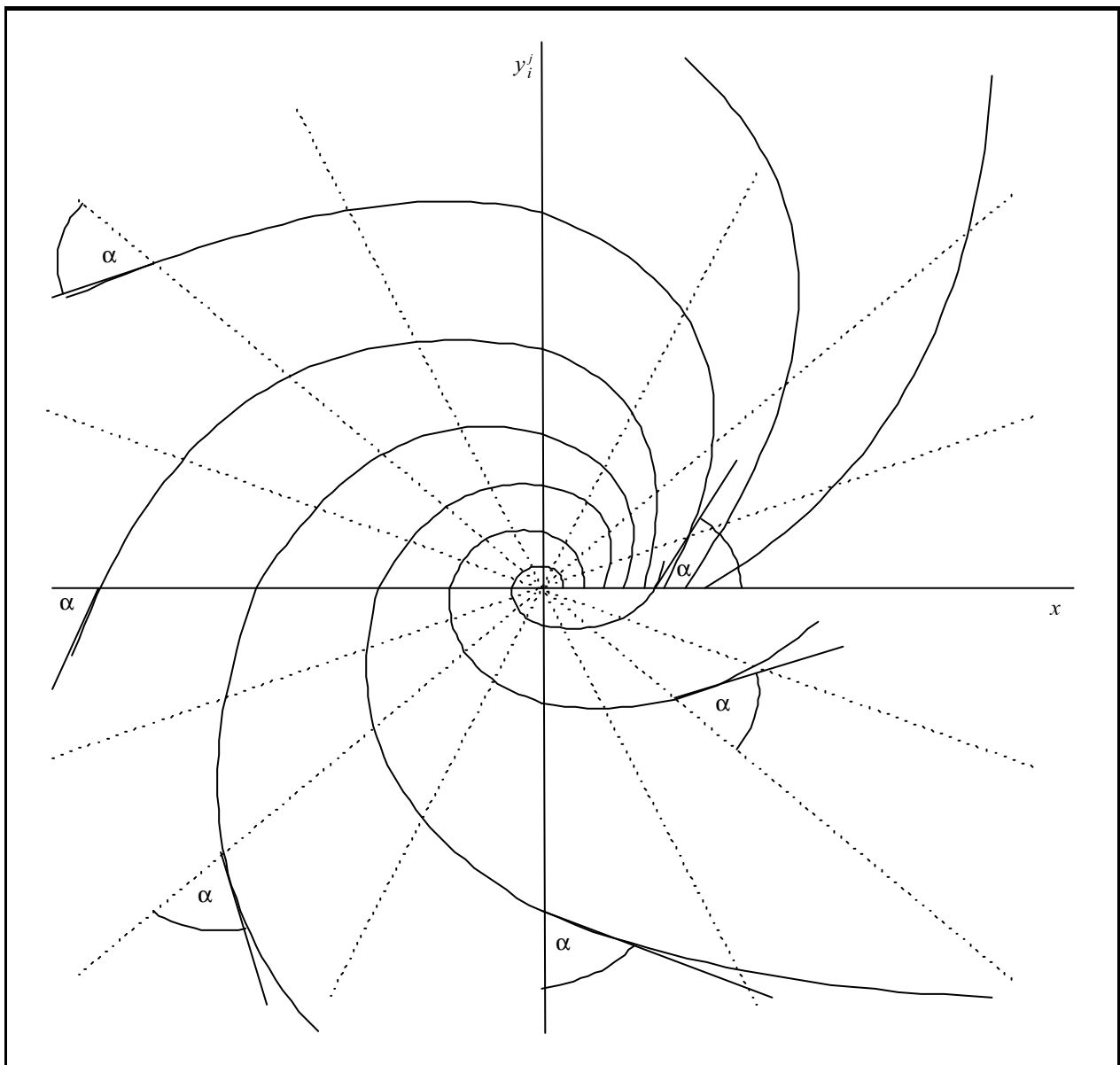
Uvažavajući polazni oblik linearne zavisnosti osnovnih resursa investicione izgradnje u pripremnom periodu.

$${}_L y_{ip}^j = {}_L m_{ip}^j x = {}_L n_{ip}^j \quad (2)$$

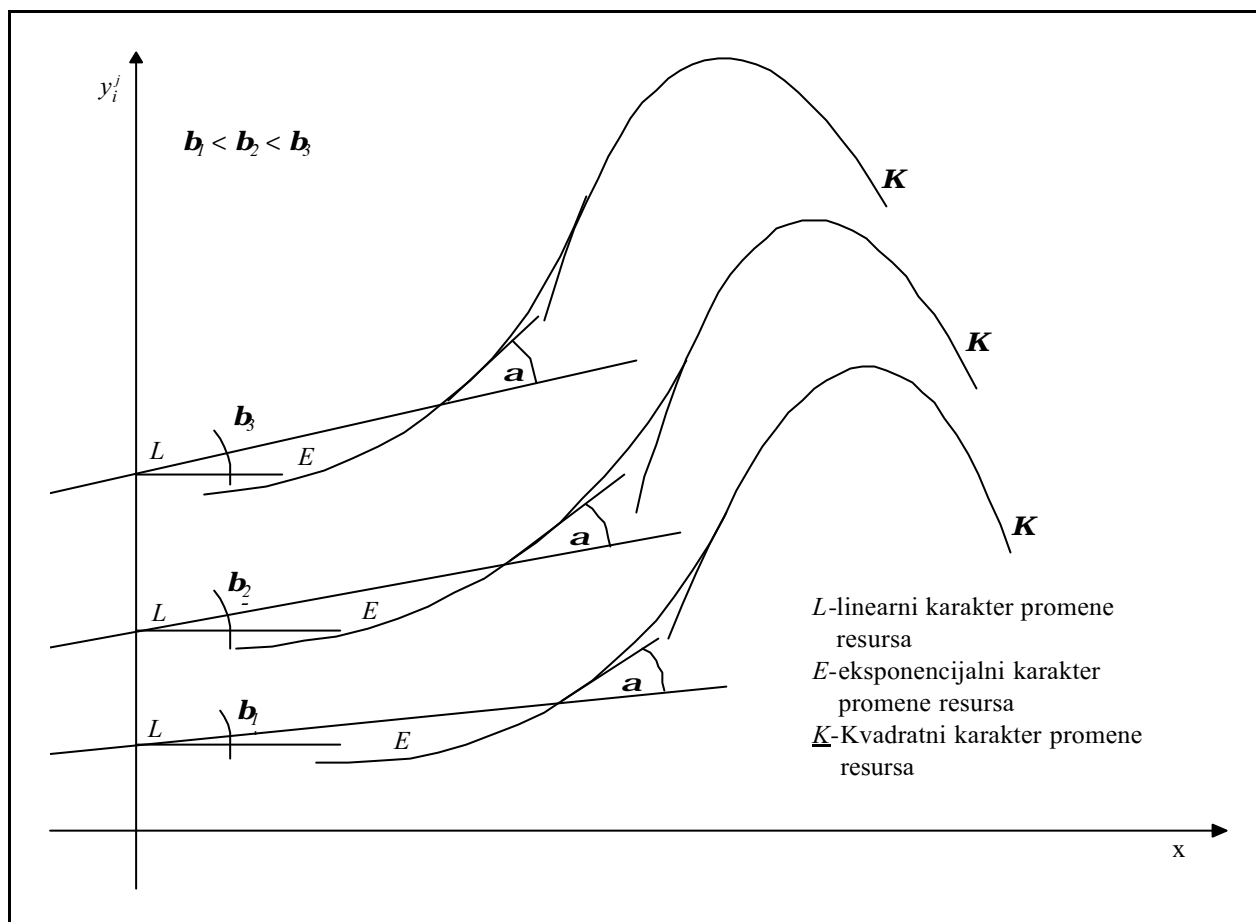
potrebno je objasniti šta jednačina (18)

$$\frac{g,q}{N} k_i^j \frac{e}{\frac{g,q}{N} C_i^j} \quad (18)$$

kao rešenje prelaznog perioda u realnom sistemu predstavlja.



Slika 4. Geometrijska interpretacija izogonalnih trajektorija familija logaritamskih spirala koje se seku sa familijama pravih ${}_L y_{ip}^j = {}_L m_{ip}^j x$ pod uglom α ($\tan \alpha = \frac{g,q}{N} k_i^j$)



Slika 5. Geometrijska interpretacija konstantnosti priraštaja resursa u tački promene karaktera ponašanja osnovnog resursa

To praktično znači da za svaku pravu oblika (2) postoji logaritamska spirala koja datu pravu seče pod $\chi\alpha$, što predstavlja matematičko-logističku potvrdu radne hipoteze ovog domena.

Da bi se ovo što lakše shvatilo, vezano za realne sisteme osnovnih resursa izgradnje, biće prikazano u prvom kvadrantu Dekartove ravni (slika 5).

4. USVAJANJE KONAČNOG OBLIKA EKSPONENCIJALNE FUNKCIJE UKLOPNO-PRELAZNOG DOMENA

Generalni zaključak o karakteru prelazne forme date rešenjem diferencijalne jednačine (18) treba načelno uzeti u obzir, tj. da se njegov karakter izražava eksponencijalnom funkcijom.

S obzirom na potrebu primene ovog rešenja u praksi, mora mu se obezbediti maksimalna fleksibilnost. U tom cilju potrebna sveobuhvatnost eksponencijalnog karaktera promene osnovnog resursa u investicionoj izgradnji prelaznog perioda postiže se doradom osnovne eksponencijalne funkcije kojom se ona konačno postavlja u oblik:

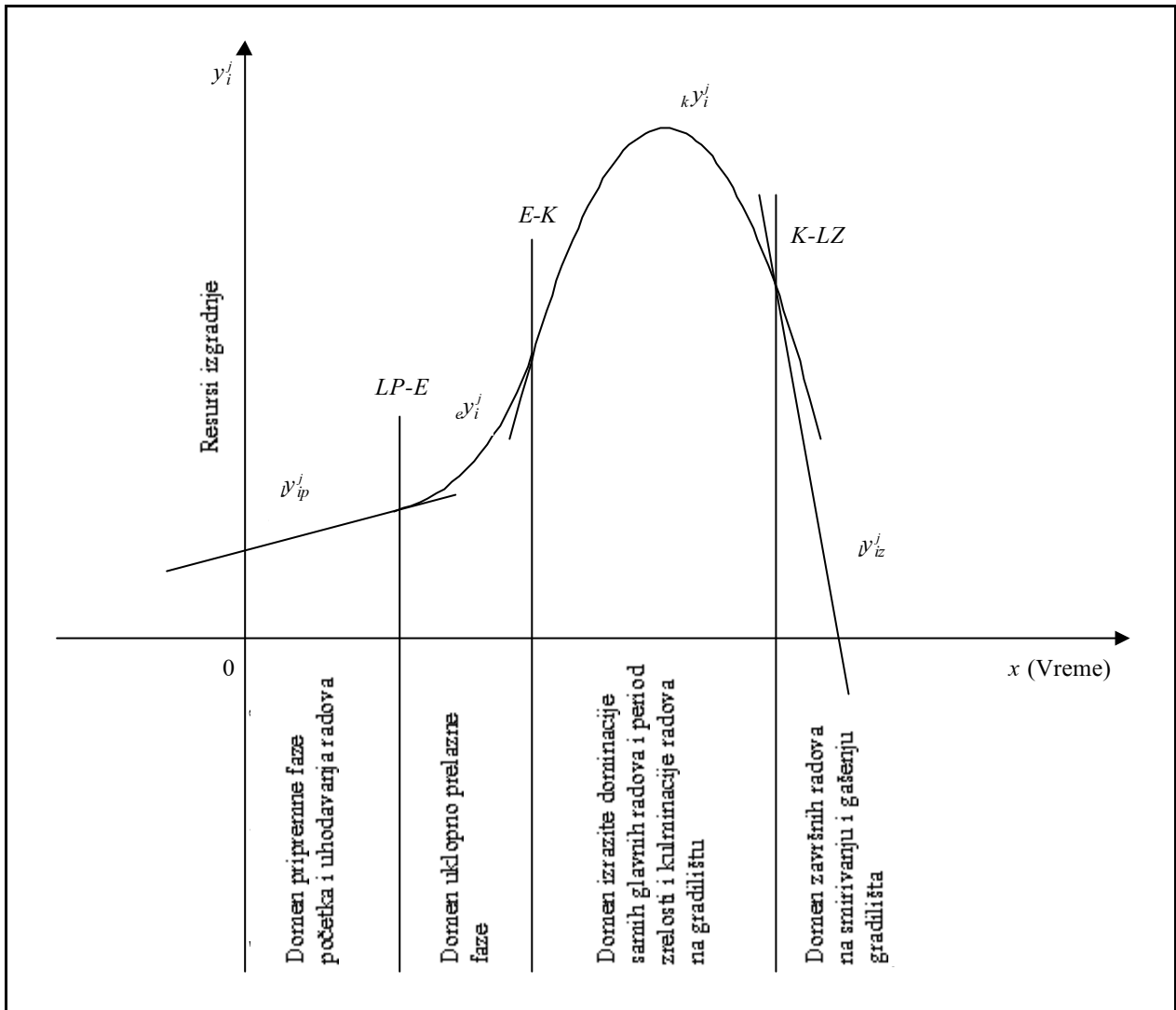
$$E^j_i Y^j \quad g,q K_i^j \quad g,q a_i^j \quad g,q b_i^j x \quad (19)$$

Jednačina (19) predstavlja oblik eksponencijalnog karaktera zavisnosti prelazne faze koji će se koristiti u daljim empirijskim istraživanjima.

5. KONAČAN OBLIK KOMPOZITNE KRIVE OSNOVNIH PROGRESIVNIH RESURSA IZGRADNJE

Na osnovu svega do sada iznetog u prethodno objavljenim člancima u ovom časopisu grafički prikaz funkcije karaktera promena osnovnih resursa izgradnje složenih proizvodnih sistema izgleda ovako:

Nadovezivanje dva različita karaktera promene najadekvatnije je izvesti posredstvom jedne zajedničke tačke. Kontinuitet promene funkcionalne veličine u tački promene karaktera obezbeđuje se ispunjenjem uslova „glatkosti” (uslov „glatkosti” krive je neprekidnost tj. kontinualnost prvog izvoda u tački preseka krivih.)



Slika 6. Konačni načelni karakter promene osnovnih resursa izgradnje

U cilju preglednog sagledavanja navedenih uslova isti će biti prikazani tablično i grafički (slika 6).

U praksi je redak slučaj pojave jedne presečne tačke, tako da pri ovakvim karakteristikama funkci-

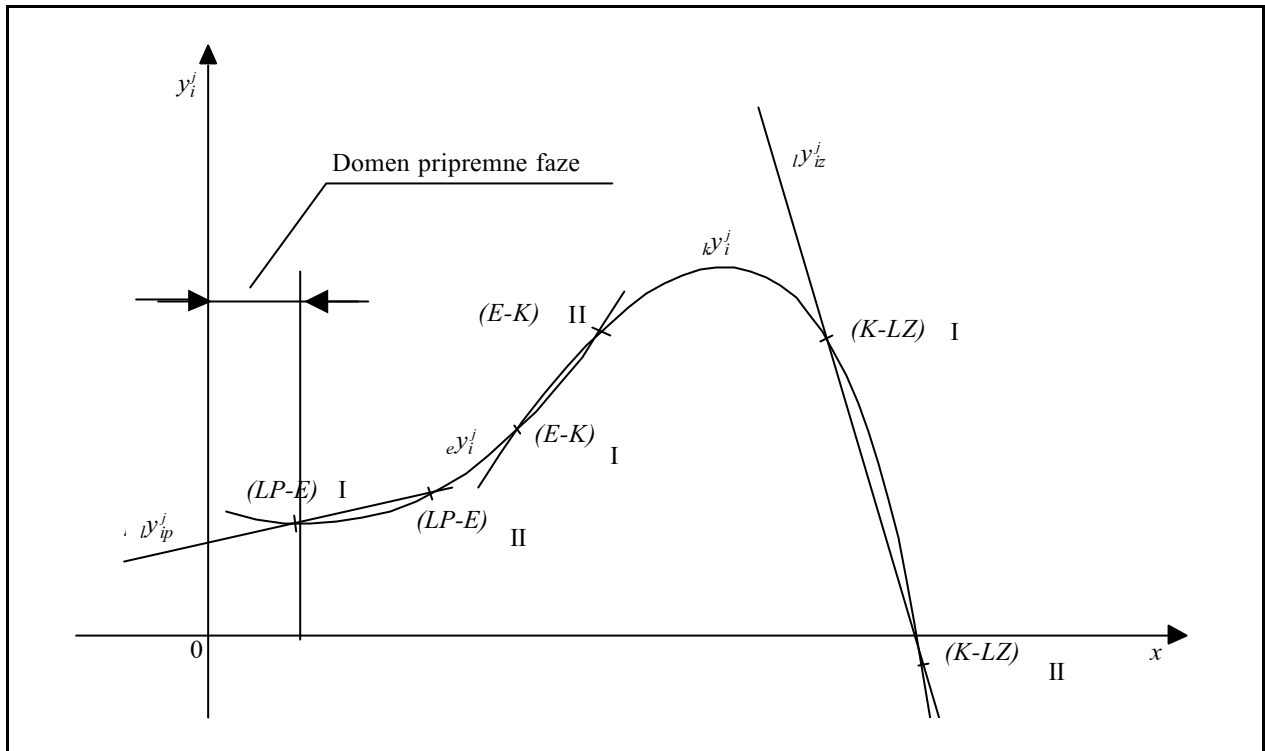
ja obično postoje dve presečne tačke na mestima ukrštanja dva karaktera funkcije.

U empirijskim istraživanjima uglavnom se koristi prva presečna tačka dva karaktera krivih kao relevantna (ove tačke na slici 7 označene su indeksom I).

Tabela 1.

Tabelarni pregled uslova u presečnim tačkama

Redni broj	Opšte jednačine u slučaju jedne presečne tačke karakterističnih formi		
1.	LP-E-presečna tačka linearne karakteristike pripremno-početnih radova i eksponencijalne karakteristike prelaznog perioda	E-K- presečna tačka eksponencijalne karakteristike prelaznog perioda i kvadratne karakteristike domena glavnih radova	K-LZ- presečna tačka kvadratne karakteristike i linearne karakteristike završnih radova
2.	$Lx_{ip}^j = E^j_i$	$E^j_i = Kx^j_i$	$Kx^j_i = Lx^j_{ip}$
3.	$LY^j_{ip} = EY^j_i$	$EY^j_i = KY^j_i$	$KY^j_i = LY^j_{ip}$
4.	$(LY^j_{ip})' = (EY^j_i)'$	$(EY^j_i)' = (KY^j_i)'$	$(KY^j_i)' = (LY^j_{ip})'$



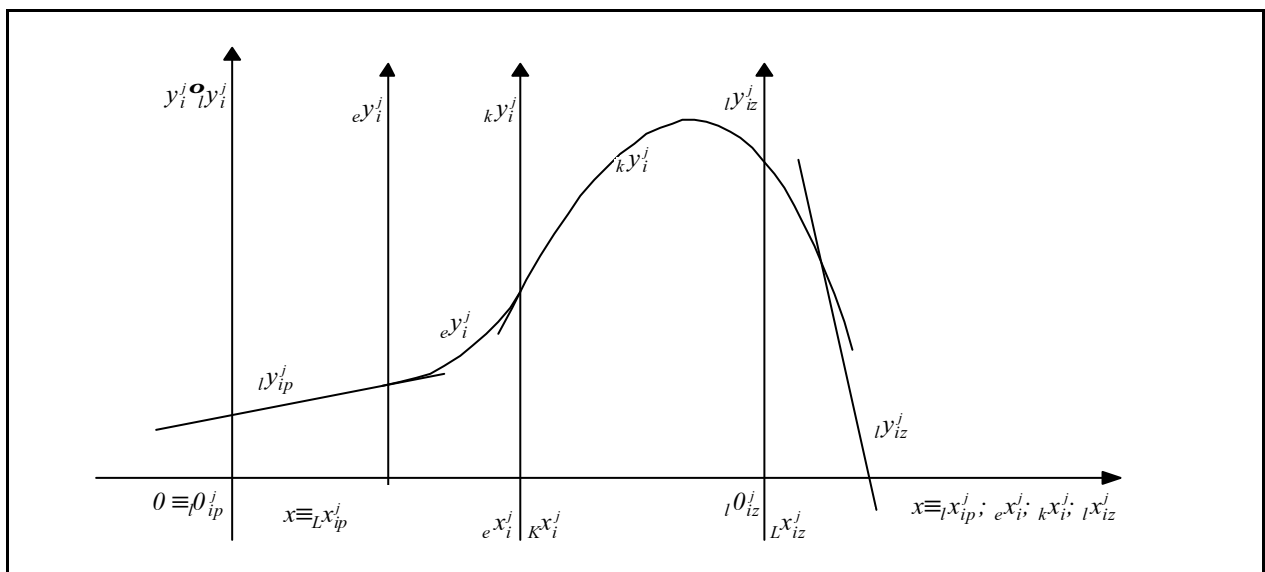
Slika 7. Grafički prikaz dve presečne tačke u empirijskim sistemima

Prilikom numeričke empirijske provere teorijskih postulata u cilju okvirnog određivanja trajanja posebnih domena potrebno je u prvom koraku sve realne vrednosti resursa aproksimirati kao uopštenu krivu kvadratnog karaktera y_i^j (slika 7). Ovim korakom se očigledno čini greška, ali se dobija niz podataka potrebnih za procenu vremena trajanja pojedinih karakternih domena.

Prva nula kvadratne funkcije bliža koordinatnom početku predstavlja okvirnu vrednost granice vremenskog perioda početne linearne forme.

Druga nula kvadratne funkcije predstavlja grubu okvirnu vrednost ukupnog trajanja investicije.

Težnja ka minimalnom odstupanju teoretskih od realnih veličina osnovnih progresivnih gradilišnih resursa izgradnje, biće izvedena posredstvom sume minimalnih kvadrata.



Slika 8. Disperzija samostalnih koordinatnih početaka

6. OSNOVNI ZAHTEVI VISOKOG STEPENA TAČNOSTI EMPIRIJSKOG IZUČAVANJA

Polazeći od osnovnih sistema jednačina u opštem obliku koji proizilaze iz uslova minimalnih kvadratnih odstupanja dobija se:

$$\begin{matrix} x^n a_n & x^{n-1} a_{n-1} & \dots & x_s a_s & Yx^{n-k} \\ x^{n-1} a_n & x^{n-2} a_{n-1} & \dots & x_{s-1} a_s & Yx^{n-k-1} \end{matrix}$$

$$x^{n-m} a_n \quad x^{n-m-1} a_{n-1} \quad \dots \quad x_{\max} a_s \quad Y$$

Što su x -veći brojevi, kao i vrednost Y -a, to su vrednosti a -ova manji tako da funkcije koje ovakvi sistemi generišu teže ka obliku $y = \text{const}$. Kao posledica tako velikih brojeva koji se dodeljuju argumentima u slučaju jedinstvenog koordinatnog početka aproksimacije funkcija su isuviše grube. Usled toga su odstupanja generalnih vrednosti resursa od realnih značajna, i ima visok procenat greške. Iz tog razloga, imperativni uslov minimalne greške generisanih funkcija je što manja vrednost nezavisno promenljive, iz razloga što se samo na nju i može uticati. Izbor malih vrednosti nezavisno promenljive, sa svoje strane, uslovljava egzistenciju samostalnih koordinatnih sistema za svaki karakter promene resursa (slika 8).

7. UOPŠTENA KVADRATNA FORMA RESURSA RADNE SNAGE „TERMoeLEKTRO” NA MONTAŽI TE-TO ZRENJANIN

Opšta kvadratna forma funkcije proizišla je na osnovu podataka statističkih metoda prethodno obrazloženih.

Analitički izraz opšte kvadratne forme dobijene prvom aproksimacijom je (slika 9).

$$y_G^* = 1,061 x^2 - 37,6 x + 72,81 \quad (20)$$

Druga aproksimacija vršena je sa ciljem bližeg uklapanja krive s obzirom na empirijske vrednosti maksimuma (slika 9).

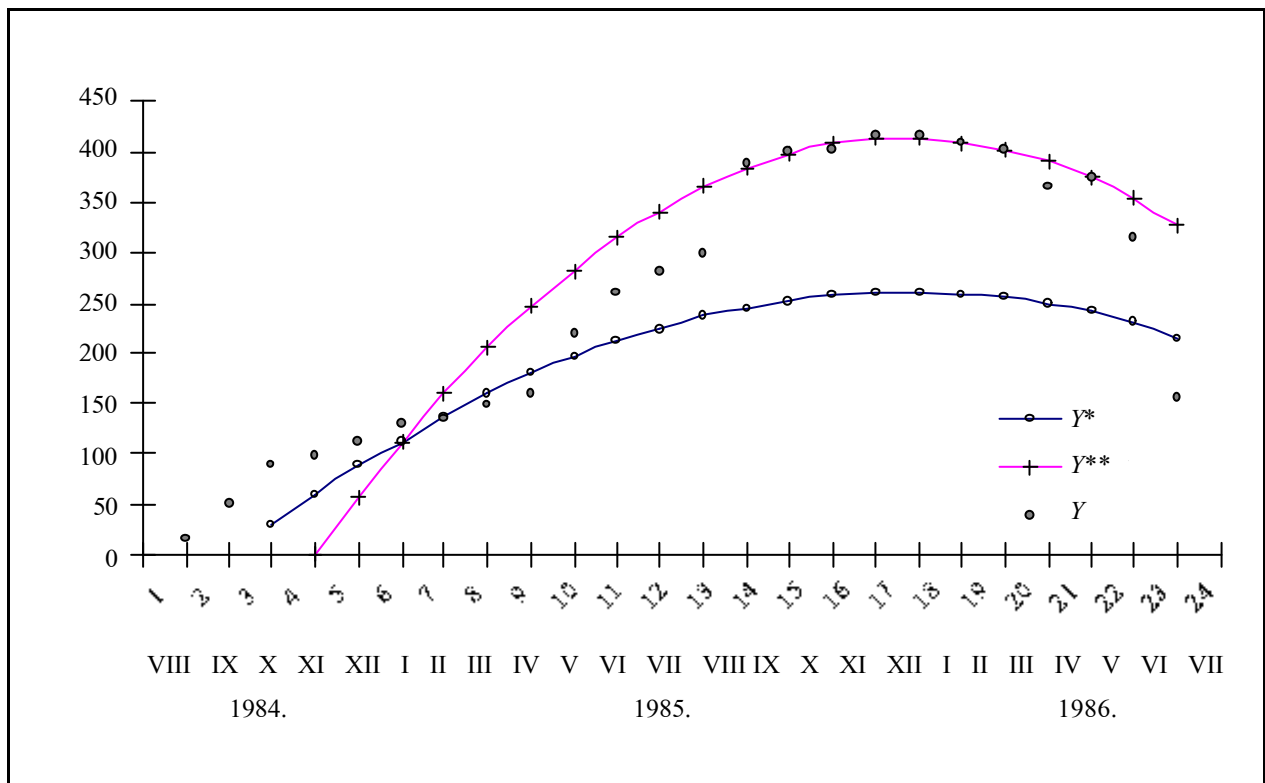
Kao rezultat druge aproksimacije dobijena je kvadratna kriva analitičkog oblika:

$$y_G^{**} = 2,2 x^2 - 786 x + 277 \quad (21)$$

Na osnovu tabličnih podataka (tabela 2) date su grafički obe krive (jednačine (20) i (21)) (slika 9).

Bazirajući se na analizi dijagrama slike 9 i nepouzdanosti rezultata sa visokim procentom greške, kao i potpuno apsurdne negativne vrednosti broja neposrednih izvršilaca može se zaključiti sledeće:

1. Linearna karakteristika pripremno-početnih radova trajeće od 4 do 6 meseci.



Slika 9. „Termoelektro” Beograd resurs radne snage generalna aproksimacija

Tabela 2.

„Termoelektro” - Beograd Dinamika angažovanja resursa radne snage uopštena kvadratna forma

R. br.	Godina kalendarska	1984.					1985.						
		VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
1.	Mesec kalendarski	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
2.	Mesec po redu X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3.	Vrednost resursa Y (broj radnika)	17	50	86	97	117	131	134	145	162	221	262	288
4.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive Y_G (broj radnika)	-36,27	-1,85	30,44	60,61	88,67	114,59	138,40	160,09	179,65	197,09	212,41	225,61
5.	Greška $\frac{Y-Y_G}{Y} \times 100$ (%)	313,35	103,7	64,6	37,52	24,21	12,53	3,28	-10,14	-10,9	10,82	18,93	21,66
6.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive Y_G^{**} (broj radnika)	-201,2	-129,8	-62,8	-0,2	58,0	112,0	161,2	206,2	247	283	314,8	342,2
7.	Greška $\frac{Y-Y_G^{**}}{Y} \times 100$ (%)	1283,53	359,6	173,02	100,21	50,43	14,5	-20,3	-45,67	-52,45	-28,05	-20,15	-18,82

Nastavak table 2.

R. br.	Godina kalendarska	1985.					1986.						
		VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
1.	Mesec kalendarski	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
2.	Mesec po redu X	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3.	Vrednost resursa Y (broj radnika)	299	393	401	403	415	415	409	402	364	374	316	154
4.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive Y_G (broj radnika)	236,68	245,63	252,47	257,17	259,76	260,23	258,57	254,79	248,89	240,87	230,72	218,45
5.	Greška $\frac{Y-Y_G}{Y} \times 100$ (%)	20,84	37,5	37,04	36,19	37,41	37,29	36,78	36,62	31,62	35,6	26,99	-41,85
6.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive Y_G^{**} (broj radnika)	365,2	383,8	398	407,8	413,2	414,2	410,8	403,0	390,8	374,2	357,2	327,8
7.	Greška $\frac{Y-Y_G^{**}}{Y} \times 100$ (%)	-22,14	2,34	0,75	-1,19	4,34	0,19	-0,44	-2,49	-7,36	-0,05	-13,04	-112,86

2. Eksponecijalni karakter promene u ovom slučaju biće vrlo kratak i sigurno kraći od linearnog domena početnih radova, jer nakon greške od 14,5 % u januaru 1985, veličina greške raste do juna 1985, nakon čega se vrednosti resursa izvršno uklapaju u kvadratni karakter promene.
3. Linearna karakteristika završnih radova će biti izuzetno kratka.

Zaključak broj 3 je vezan za linearnu karakteristiku završnih radova, i on se izvodi na osnovu niskih procenata grešaka prve opšte kvadratne aproksimacije i vrednosti druge nule funkcije druge kvadratne aproksimacije koja iznosi $x_{G02}^{**}=24,1$ (mesec), što se izvršno uklapa u ukupno vreme trajanja izgradnje TE-TO Zrenjanin od 24 meseca.

Poštujući smernice analize opšte kvadratne forme izvršiće se empirijska provera teoretskih postulata.

8. LINEARNA ZAVISNOST PRIPREMNO-POČETNOG PERIODA RESURSA RADNE SNAGE

Poštujući zaključke iznesene u prethodnoj tački aproksimacija pripremno-početnog perioda izvršiće se na osnovu empirijskih vrednosti u prvih šest meseci.

Sistematizacija rezultata je data u tabeli 3.

Linearna funkcija pripremno-početnog perioda ima oblik:

$$y_{LP}^* = 22,64x_{LP} - 4,8 \quad (23)$$

Tačna dužina trajanja pripremno-početnog perioda biće određena presečnom tačkom linearne i ekspanoncijalne forme.

9. EKSPONENCIJALNA ZAVISNOST PRELAZNOG PERIODA RESURSA RADNE SNAGE

U cilju boljeg uklapanja linearnog i ekspanoncijalnog karaktera promene za početnu tačku ekspanoncijalne forme uzima se završna tačka linearne aproksimacije pripremno početnog perioda.

Na osnovu realnih podataka aproksimacijom ekspanoncijalne zavisnosti dolazi se do table 4.

Ekspanoncijalna kriva je oblika:

$$Y_E^* = Ka^{bt} \quad (24)$$

$K = 123,6021$
 $a = 1,051616$
 $b = 1,7598695$

Tabela 3.

Linearna zavisnost pripremno početnog perioda resursa radne snage „Termoelektro” - Beograd

Redni broj	Kalendarska godina	1984.									
		Oznaka	Dimenzija oznake	Meseci						$D_{LP}^* = \frac{Sd_{LP}^*}{X_{LPmax}} (\%)$	
1.				Meseci							
2.	Mesec kalendarski		Meseci	VIII	IX	X	XI	XII	I		
3.	Interval interpolacije	X_{LP}	Meseci	1	2	3	4	5	6		
4.	Vrednost resursa	Y	Broj izvršilaca	17	50	86	97	117	131		
5.	Podaci generisane krive	Y_{LP}^*	Broj izvršilaca	27,14	49,48	71,82	94,16	116,5	138,84		
6.	Greška u odnosu na vrednost resursa	Y_{LP}^*	%	-59,65	1,04	16,49	2,93	0,43	-6,7		5,52

Zbog reda veličine greške u petom i šestom mesecu koje odstupaju od reda veličine greške u ostalim mesecima, vrednosti samog resursa radne snage ove dve tačke biće pridružene domenu kvadratnog karaktera.

Veličina srednje relativne greške od 3,67 % svedoči o uspešnoj aproksimaciji u eksponencijalnom domenu.

Veličina greške, nakon pridruživanja dve zadnje vrednosti kvadratnom domenu, pada ispod 1 %, što se može smatrati vanredno uspešnom aproksimacijom eksponencijalnog domena.

10. KVADRATNA ZAVISNOST U PERIODU DOMINACIJE MAŠINSKE MONTAŽE RESURSA RADNE SNAGE

Na osnovu zaključaka prethodnog poglavlja iz eksponencijalnog domena, dve završne tačke će biti uvrštene u kvadratni domen radi boljeg uklapanja.

I u ovom slučaju, aproksimacija kvadratne forme vršice se kao da linearna završna forma ne egzistira. Vrednosti kvadratne funkcije sistematizovane su u tabeli 5.

Analitički oblik kvadratne funkcije dobijen u prvoj aproksimaciji je oblika:

$$y_K^* = 3,8x_K^2 + 62,85x_K + 153,18 \quad (25)$$

Analiziranjem funkcije na osnovu tabele 5, jasno je da su greške vrlo male.

Visok procenat greške samo u zadnjoj tački kvadratne parabole preferira vrlo mali domen linearne završne forme.

Negativna vrednost prve nule kvadratne parabole jasno pokazuje da ona pada van domena definisanosti kvadratne funkcije izrazite dominacije mašinske montaže, tj. ona pada u domen eksponencijalne funkcije. Vrednost druge nule u nekoliko meseci premašuje rok završetka investicione izgradnje, što takođe upućuje na kratak domen linearne završne forme.

Odabiranje tačaka, a samim tim i domena kvadratne forme, je u ovom slučaju veoma pojednostavljeno, s obzirom na to da jedino zadnja tačka ispada svojom vrednošću iz reda veličine tolerisane greške. Selekcijom tačaka po osnovu reda veličine greške, srednja vrednost greške sa 8,1 % pada na 4,74 %.

Pošto se prava ne može povući kroz jednu tačku, nego za njeno definisanje moraju biti poznate barem dve tačke, u ovom slučaju, uzeće se zadnje tri empirijske vrednosti kvadratnog domena za definisanje linearne zavisnosti završne forme. Usled ovakvog proširenja domena linearne završne forme, za očekivati je i visok stepen uklapanja kvadratne i linearne završne forme.

Ovako definisanim kvadratnim domenom dobija se vrlo visoka tačnost aproksimacije kvadratnog karaktera promene.

11. LINEARNA ZAVISNOST - ZAVRŠNOG PERIODA RESURSA RADNE SNAGE

Neophodnost iznalaženja linearne forme završnih radova resursa radne snage proizišla je iz analize završnog opadajućeg toka kvadratne funkcije i vrednosti drugih nula iste funkcije.

Na osnovu usvojenog broja tačaka linearne forme, izvršena je aproksimacija i prikazana u tabeli 6.

Analitički oblik linearne završne forme na bazi minimalnih kvadrata dat je jednačinom:

$$y_{LZ}^* = 110x_{LZ} - 501,33 \quad (26)$$

Usled visoke greške u zadnje dve tačke, zbog kojih se linearna završna forma i uspostavlja, izvršeno je podešavanje linearne jednačine i dobijen oblik:

$$y_{LZ}^{**} = 146x_{LZ} - 599 \quad (27)$$

S obzirom na srednju vrednost greške od 8,95 % u prvoj i 9,82 % u drugoj aproksimaciji, može se uvrstiti u tolerantnu grešku. Međutim, imajući na umu da je linearna završna forma uvedena zbog završne tačke, ako bi se izvela selekcija tačaka druge aproksimacije, greška bi za poslednje dve tačke iznosila 4,18 %.

$$\left| \bar{y}_{LZ}^{**} \right| = \frac{\left| y_{LZ}^{**} \right|}{x_{LZ}}$$

$$\left| \bar{y}_{LZ}^{**} \right| = \frac{8,35}{2} = 4,175 \%$$

Na osnovu ovako male greške nakon selekcije tačaka može se konstatovati izuzetno visoka tačnost aproksimacije linearne završne forme.

12. KOMPOZITNA FUNKCIJA RESURSA RADNE SNAGE

Nakon kompletiranja kompozitne funkcije resursa radne snage montažerske kuće „Termoelektro” - Beograd, ona je i grafički predstavljena na dijagramu (slika 10).

Na osnovu grafičke interpretacije, moguće je bliže sagledati presečne tačke karakterističnih krivih i pristupiti tačnom određivanju presečnih tačaka. Zadovoljavajući stepen tačnosti je određivanje dana

Tabela 4.

Eksponecijalni karakter - prelaznog perioda resursa radne snage „Termoelektro” - Beograd

Redni broj	Godina kalendarska	Meseci kalendarski	$t = x_E$	Y	$\log Y$	b'	$(\log a)b'$	$\log Y_E^* = \log K + (\log a)b'$	Y_E^*	$DY_E^* = \frac{Y - Y_E^*}{Y} \times 100$
1.			Mesec po redu	Broj izvršilaca	/	/	/	/	Broj izvršilaca	%
2.	1985.	I	0	131	2,117 271	1,000 000	0,021 857 5	2,113 883 7	129,98	0,78
3.		II	1	134	2,127 105	1,759 869 5		2,130 492 3	135,05	-0,78
4.			$S_1 \log Y$		4,244 376					
5.		III	2	145	2,161 365	3,097 140 6	0,067 695 1	2,159 721 5	144,45	0,38
6.		IV	3	162	2,209 515	5,450 563 2	0,119 134 5	2,211 160 9	162,62	-,0,38
7.			$S_2 \log Y$		4,370 883					
8.		V	4	221	2,344 392	9,592 279 9	0,209 661 3	2,301 687 7	200,3	9,37
9.		VI	5	262	2,418 301	16,881 16	0,368 976 5	2,461 002 9	289,07	10,33
10.			$S_3 \log Y$		4,762 693				$DY_E^* = \frac{S \Delta Y_{E^*} c}{X_{E_{max}} + I} (\%)$	3,67

Tabela 5.

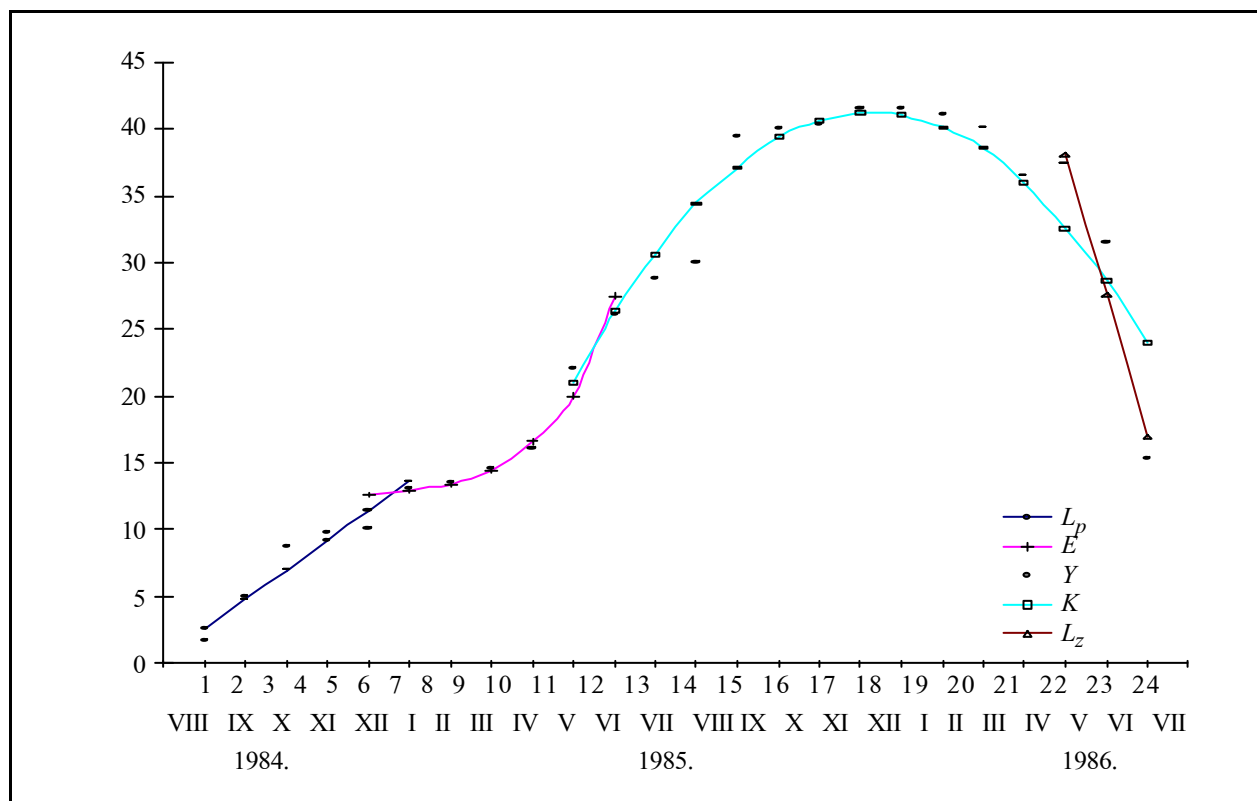
Linearna zavisnost - završnog perioda resursa radne snage „Termoelektro” - Beograd

Redni broj	Kalendarska godina	1986.					
1.		Oznaka	Dimenzija oznake	Meseci			$DY_{LZ}^* = \frac{S \Delta Y_{LZ} c}{X_{LZ \max}}$
2.	Mesec kalendarski		Mesec	V	VI	VII	
3.	Interval interpolacije	X_{LZ}	Meseci	1	2	3	
4.	Vrednost resursa	Y	Broj izvršilaca	374	316	154	
5.	Podaci generisane kri-ve	Y_{LZ}^*	Broj izvršilaca	391,3	281,3	171,3	
		$\frac{Y - Y_{LZ}^*}{Y}$	%	-4,63	10,97	-11,25	8,95
6.	Greška u odnosu na vrednost resursa	Y_{LZ}^{**}	Broj izvršilaca	453	307	161	
		$\frac{Y - Y_{LZ}^{**}}{Y}$	%	-21,12	3,8	-4,55	9,82

Tabela 6.

Kvadratna zavisnost resursa radne snage u periodu izrazite dominacije mašinske montaže
„Termoelektro” - Beograd

Redni broj	Godina kalendarska	1985.								1986.						
		V	VI	VII	VII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
1.	Mesec kalendarski	V	VI	VII	VII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
2.	Mesec po redu X_K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3.	Vrednost resursa Y (broj izvršilaca)	221	262	288	299	393	401	403	415	415	409	402	364	374	316	154
4.	Vrednost resursa na osnovu generisane krive Y_K^* (broj izvršilaca)	212	264	307	343	372	393	406	412	410	401	384	359	326	286	239
5.	Greška $DY_K^* = \frac{Y - Y_K^*}{Y} \times 100(\%)$	4,1	-0,76	-6,6	-14,72	5,34	2,0	-0,74	0,72	1,2	1,96	4,48	1,37	12,83	9,49	55,19
6.	Srednja selektivna greška $ Y_{KS}^* = \frac{\sum \Delta Y_K^* }{X_{KS}} (\%)$	4,74														



Slika 10. „Termoelektro” Beograd dinamika angažovanja resursa radne snage

u mesecu kada će se sa jednog karaktera promene resursa preći na drugi.

Linearni karakter promene resursa radne snage u pripremnom periodu trajao bi od 01. VIII 1984. do 25. I 1985. godine, dakle cca 6 meseci.

Eksponencijalni karakter promene resursa radne snage trajao bi od 25. I 1985. do 22. V 1985. godine, dakle ukupno cca 4 meseca.

Kvadratni karakter promene resursa radne snage trajao bi od 22. V 1985. do 01. VI 1986. godine, dakle cca 12,5 meseci.

Linearni karakter promene resursa radne snage završnih radova trajao bi od 01. VI 1986. do 31. VI 1986. godine, dakle 1 mesec.

13. ZAKLJUČAK

U toku rešavanja kompleksnih zahteva uklopno-prelazne forme, u prvom koraku se prišlo iznalaženju matematičke logističke forme koja će zadovoljiti sve postavke hipoteze. Prioritetno, zahtev hipoteze za postizanjem istog ugla preseka prave (bez obzira na njen koeficijent pravca) i nepoznate krive, koja karakteriše promenu resursa u uklopno-prelaznom delu. Potvrdom o egzistenciji izogonalnih trajektorija koje ispunjavaju postavljene zahteve ovaj problem je apsolviran. Matematičkim rešenjem ovako postavljenog problema, ne samo da je postavljena hipoteza potvrđena, nego je i pronađena funkcija u eksponencijalnom obliku koja karakteriše promenu resursa u domenu uklopno-prelazne faze.

Zaključak na nivou kompozitne funkcije progresivnog gradilišnog resursa radne snage u slučaju montažerske kuće „Termoelektro”, bila bi konstatacija da je generisana funkcija saglasna sa svim teoretskim postavkama.

Praktična provera na bazi empirijskih podataka dala je vrlo visok stepen tačnosti, stoga se može smatrati da je u slučaju egzemplarne provere resursa radne snage na primeru montažerske kuće „Termoelektro” - Beograd, u vrlo visokoj meri postignut cilj provere.

14. LITERATURA

- [1] Bogner M., Petrović A.: PROCENA USLUGA U INVESTICIONOJ IZGRADNJI, Smeits, Beograd 1995.
- [2] Čukić R., Radović, Ž.: INVESTICIJE-IZGRADNJA OBJEKATA, OBEZBEĐENJE SREDSTAVA I OBEZBEĐENJE PLAĆANJA INVESTICIJA, Pravno-ekonomski centar, Beograd 1984.
- [3] Jovanović P., Radulović, N.: ANALIZA OSETLJIVOSTI KRITERIJUMA ZA OCENU INVESTICIONIH PROJEKATA, Naučna konferencija IS'90, Novi Sad 1990.
- [4] Kerzner H.: PROJECT MANAGEMENT, PART I, PART II BALDWIN-WALLACE COLLEGE, Berea 1994.
- [5] Rajnović B.: KARAKTER PROMENA OSNOVNIH RESURSA MAŠINSKE MONTAŽE U INVESTICIONOJ IZGRADNJI, Magistarski rad, Zrenjanin, 1998.
- [6] Riggs J.: ECONOMICS DECISION MODELS FOR ENGINEERS AND MANAGERS, McGraw-Hill Book Co, New York, 1968.
- [7] Savković M.: STATISTIKA, VEKŠ, Novi Sad 1982.
- [8] Stanivuković D., Carić N., Marić B.: ORGANIZACIJA PREDUZEĆA I MENADŽMENT, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 1991.

Rad je primljen u uredništvo 31. 01. 2003. godine



Dr Božidar Rajnović je rođen 22. 03. 1953. godine u Zrenjaninu. Osnovnu školu i gimnaziju završio u Zrenjaninu, a mašinski fakultet u Novom Sadu. Školske 1995/96 upisuje post diplomsku studiju, koje završava u predviđenom roku. Juna 2000. god. je odbranio doktorsku disertaciju pod naslovom „Razvoj modela analize osnovnih resursa u izgradnji energetskih sistema”. Kao spoljašnji saradnik povremeno volonterski predaje na TF-u „Mihajlo Pupin”, u okviru upoznavanja studenata sa logistikom modeliranja složenih sistema izgradnje. Paralelno sa naučnim radom dr Božidar Rajnović je ostvario 20 godina radnog staža u Elektroprivredi. Razvojni put u Elektroprivredi započinje u nadzoru izgradnje TE-TO Zrenjanin, na radnom mestu saradnik I pripravnik. Njegov dalji razvojni put ide preko inženjersko stručnih poslova do rukovodećih, odnosno do radnog mesta Tehničkog direktora TE-TO Zrenjanin. Momentalno radi na radnom mestu Rukovodioca mašinskog održavanja TE-TO Zrenjanin.

Bračno stanje: oženjen, dvoje dece, živi u Zrenjaninu ul. Branka Radicevica br. 14/a u porodičnoj kući.

Ostvarenje elektroenergetskog bilansa jugoslovenskog elektroenergetskog sistema u 2002. godini

Stručni rad
UDK: 621.3.05

Rezime:

Rad prezentira realizaciju elektroenergetskog bilansa u Saveznoj Republici Jugoslaviji kroz prikaz: proizvodnje i potrošnje električne energije, republičku razmjenu električne energije, nabavku i isporuku električne energije drugim elektroenergetskim sistemima, stanje akumulacija hidroelektrana, otkrivku uglja, deponije uglja za termoelektrane, i upoređuje ove veličine sa ostvarenjem u 2001. godini, i planom za 2003. godinu.

Ključne riječi: *ostvarenje elektroenergetskog bilansa jugoslovenskog elektroenergetskog sistema*

Abstract:

**REALIZATION OF THE POWER BALANCE
OF THE YUGOSLAV ELECTRIC POWER SYSTEM IN 2002**

The paper deals with the realization of the electric power balance in the Federal Republic of Yugoslavia, such as: electric power production and consumption, republican electric power interchange, electric power supply from and delivery to other electric power systems, hydro plant reservoirs, coal overburden layers removal, coal deposits for thermal power plants, with a review of the realization in 2001 and 2002, as well as the plan for 2003.

Key words: *realization of power power balance of the Yugoslav electric power system in 2002*

1. UVOD

Elektroenergetski sistem (EES) SR Jugoslavije sada čine elektroenergetski sistemi Republike Srbije i Republike Crne Gore.

Elektroprivrednu delatnost u republikama obavljaju:

Javno preduzeće za proizvodnju, prenos, distribuciju električne energije i proizvodnju uglja, koje posluje pod firmom „Elektroprivreda Srbije” sa potpunom odgovornošću i sedištem u Beogradu, čiji je skraćeni naziv JP „EPS”sa p.o. (u daljem tekstu: EPS). Javno preduzeće je osnovano zakonom o elek-

troprivredi („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 45/91) sa izmenama i dopunama.

Javno elektroprivredno preduzeće za proizvodnju, prenos, nabavku i distribuciju električne energije, koje posluje pod firmom „Elektroprivreda Crne Gore” sa sedištem u Nikšiću (u daljem tekstu: EPCG) osnovano Zakonom o energetici („Službeni list SRCG” br. 16/90) sa izmenama i dopunama. Odlukom Upravnog odbora ovog preduzeća, 18. marta 1998. godine ovo preduzeće je transformisano u „Elektroprivredu Crne Gore” A.D.

Saradnja između ove dve elektroprivrede regulisana je Ugovorom o dugoročnoj poslovnotehnič-

koj saradnji, koji je zaključen marta 1991. godine, uz uvažavanje normativnih akata: Zajednice jugoslovenske elektroprivrede, Elektroprivrede Srbije i Elektroprivrede Crne Gore.

Do donošenja novog zakona o EES SR Jugoslavije, koordinirajuću ulogu u radu ova dva elektroenergetska sistema, u određenom obimu, vrši Stručna služba Zajednice jugoslovenske elektroprivrede (JUGEL), sa Koordinacionim odborom Zajednice jugoslovenske elektroprivrede u sastavu: direktor JUGEL-a, generalni direktor EPS-a i izvršni direktor EPCG AD.

2. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U 2002. godini, energetske bilansima elektroprivreda Srbije i Crne Gore, predviđena je:

– proizvodnja iz sopstvenih izvora 35 592 GWh (HE 10 910 GWh, TE 24 682 GWh) i

– nabavka od EES izvan SRJ 5 198 GWh.

Ukupna proizvodnja električne energije u SRJ je iznosila 34 449,1 GWh (33,3 % iz HE a 66,7 % iz TE), dok su nabavke električne energije od drugih EES izvan SRJ iznosile 5 507,9 GWh.

Plan proizvodnje iz sopstvenih izvora je podbačenju za 1,8 %. HE su svoj plan prebacile 6,5 % a TE su ostvarili sa 94,5 % plana.

Nabavka električne energije od EES izvan SRJ je veća 6,4 % od plana.

Ukupno raspoloživa električna energija je bila manja od plana za 2002. godinu 0,8 %.

Upoređivanjem proizvodnje električne energije u 2002. godini u odnosu na 2001. godinu, dobija se sledeće stanje:

– sopstvena proizvodnja je manja za 0,6 %, pri čemu je proizvodnje HE manja za 6,7 % a TE veća za 2,8 %,.

– nabavka električne energije od EES izvan SRJ je manja za 3,6 %

– raspoloživa električna energija je manja za 1 %.

Svi gore navedeni podaci dati su u tabeli 1 i na slici 1.

U tabeli 2 su dati podaci EEB koji se odnose na 2001, 2002. godinu, upoređeni sa planskim podacima za 2003. godinu.

Karakteristične proizvodnje na pragu elektrana U EPS-u:

– najveća mesečna proizvodnja je bila 3 400,2 GWh i to u januaru 2002. godine (najveća mesečna proizvodnja u 2001. godini 3 598,5 GWh), tog meseca HE su proizvele 715,1 GWh, a TE 2 685,1 GWh;

– najveća mesečna proizvodnja HE je bila u oktobru 2002. godine i iznosila je 1 180,9 GWh (najveća mesečna proizvodnja HE u 2001. godini 1 243,7 GWh);

– najveća mesečna proizvodnja TE je bila u januaru 2002. godine i iznosila je 2 685,1 GWh (najveća mesečna proizvodnja TE u 2001. godini 2 709,8 GWh);

– najveća dnevna proizvodnja je bila 6. januara 2002. godine i iznosila je 120,7 GWh (najveća dnevna proizvodnja u 2001. godini 129 GWh), tog dana HE su proizvele 29,9 GWh, a TE 90,9 GWh;

– najveća dnevna proizvodnja HE je bila 5. aprila 2002. godine i iznosila je 45,4 GWh (najveća dnevna proizvodnja HE u 2001. godini 52,4 GWh);

– najveća dnevna proizvodnja TE je bila 18. januara 2002. godine i iznosila je 103,8 GWh (najve-

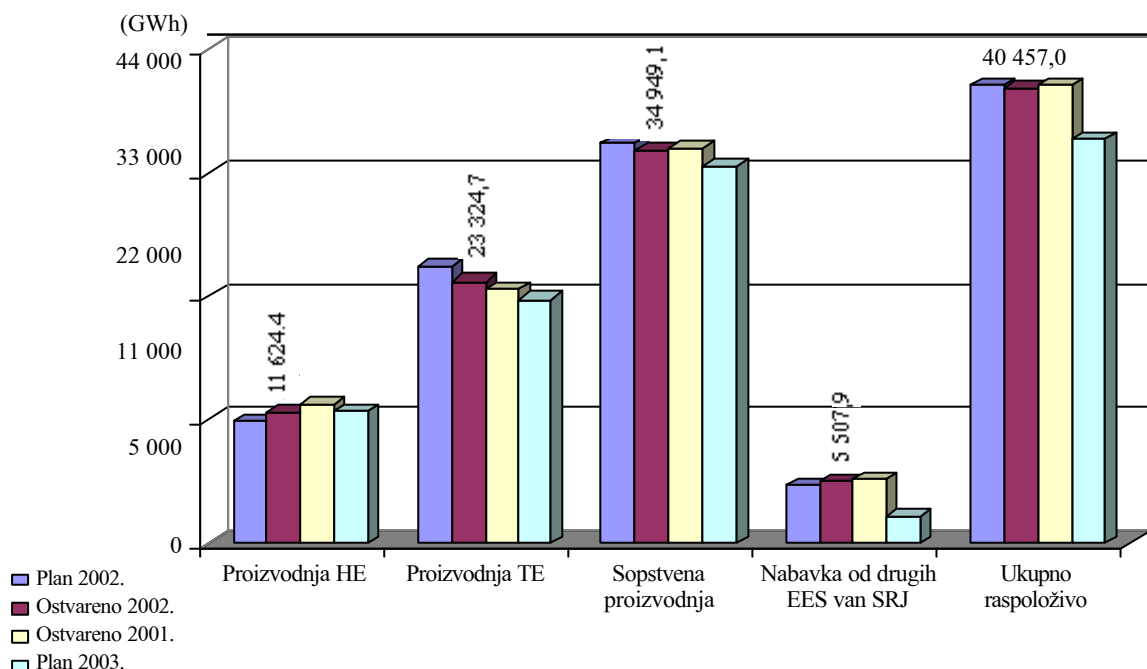
Tabela 1.

Ostvarenje bilansa proizvodnje (na pragu elektrana) i nabavki električne energije EES SR Jugoslavije

Raspoloživo	2002. godina						Ostvareno 2002/ Planirano 2002. (%)		
	Planirano (GWh)			Ostvareno (GWh)					
	SRJ	EPS	EPCG	SRJ	EPS	EPCG	(4/1)	(5/2)	(6/3)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Proizvodnja HE	10 910	9 624	1 286	11 624,4	10 528,5	1 095,8	106,5	109,4	85,2
Proizvodnja TE	24 682	23 609	1 073	23 324,7	22 225,5	1 099,2	94,5	94,1	102,4
Sopstvena proizvodnja	35 592	33 233	2 359	34 949,1	32 754,0	2 195,0	98,2	98,6	93,0
Republička razmena		414	1 065		513,7	1 254,7		124,1	117,8
Nabavka od drugih EES izvan SRJ	5 198	3 862	1 336	5 507,9	4 071,9	1 436,0	106,4	105,4	107,5
Ukupno raspoloživo	40 790	37 509	4 760	40 457,0	37 339,6	4 885,8	99,2	99,5	102,6

Tabela 1. - nastavak

	2001. godina Ostvareno (GWh)			Ostvareno 2002/ Ostvareno 2001. (%)		
	SRJ	EPS	EPCG	(4/10)	(5/11)	(6/12)
	(10)	(11)	(12)	(13)	14)	15)
Proizvodnja HE	12 460,7	10 693,2	1 767,5	93,3	98,5	62,0
Proizvodnja TE	22 688,3	22 043,4	644,9	102,8	100,8	170,4
Sopstvena proizvodnja	35 149,0	32 736,6	2 412,4	99,4	100,1	91,0
Republička razmena		913,8	1 320,8		56,2	95,0
Nabavka od drugih EES izvan SRJ	5 713,0	4 334,5	1 378,6	96,4	93,9	104,2
Ukupno raspoloživo	40 862,0	37 984,8	5 111,8	99,0	98,3	95,6



Slika 1. Ostvarenje EEB EES SR Jugoslavije

ća dnevna proizvodnja TE u 2001. godini 97,7 GWh);

– prosečna dnevna proizvodnja na godišnjem nivou u 2002. godini je iznosila 89,9 GWh (planirana 91,0 GWh), (u 2001. godini ostvarena prosečna dnevna proizvodnja 89,9 GWh).

U EPCG:

– najveća mesečna proizvodnja je bila u decembru 2002. godine i iznosila je 348,1 GWh (najveća mesečna proizvodnja u 2001. godini 314,8 GWh), tog meseca HE su proizvele 220,1 GWh, a TE 128,0 GWh;

– najveća mesečna proizvodnja HE je bila u decembru 2002. godine i iznosila je 220,1 GWh (najve-

ća mesečna proizvodnja HE u 2001. godini 236,0 GWh);

– najveća mesečna proizvodnja TE je bila u julu 2002. godine i iznosila je 130,2 GWh (najveća mesečna proizvodnja TE u 2001. godini 125,9 GWh);

– najveća dnevna proizvodnja je bila 12. oktobra 2002. godine i iznosila je 15,2 GWh (najveća dnevna proizvodnja u 2001. godini 14,2 GWh) tog dana HE su proizvele 11,5, a TE 3,7 GWh;

– prosečna dnevna proizvodnja na godišnjem nivou u 2002. godini je iznosila 6,0 GWh (planirana 6,5 GWh) (u 2001. godini ostvarena prosečna dnevna proizvodnja 6,6 GWh).

3. POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Ukupne potrebe potrošača električne energije u SRJ su iznosile 38 642,8 GWh, dok su isporuke drugim EES izvan SRJ iznosile 1 814,2 GWh.

Plan potrošnje domaćih potrošača električne energije je ostvaren sa 96,3 %, a isporuke električne energije drugim EES izvan SRJ je iznosio 266,8 % plana, tako da je ukupan plasman iznosio 99,2 % plana. U tabeli 3 i na slici 2 se vidi kakvo je učešće potrošača električne energije. Vidi se da nam direktni potrošači nisu ispunili plan za 12,6 % (potrošili su električne energije više nego 2001. godine za 15,6 %). Distributivna potrošnja je 96,3 % plana, i ista ima pad u odnosu na 2001. godinu od 2,1 %. Gubici električne energije u prenosu su na nivou planira-

nih, ali su isti u odnosu na 2001. godinu manji 2,1 %. Na slici 2, prikazana je prosečna potrošnja električne energije.

Bez upoređivanja sa prethodnom godinom, daju se neki rezultati potrošnje električne energije u 2002. godini.

U EPS-u:

– najveća mesečna potrošnja je bila u januaru 2002. godine i iznosila je 3 971,5 GWh, sa pumpanjem (najveća 2001. godini 4 118,3 GWh);

– najveća dnevna potrošnja je bila 15. januara 2002. godine i iznosila je 138,7 GWh, pri minimalnoj dnevnoj temperaturi tog dana u Beogradu od minus 4,0 stepena Celzijusa (najveća dnevna potrošnja

Tabela 2.

Elektroenergetski bilans proizvodnje (na pragu elektrana)
i nabavke električne energije EES SR Jugoslavije

Raspoloživo	Planirano 2003. (GWh)			Ostvareno 2002. (GWh)			Planirano 2003/ Ostvareno 2002. (%)		
	SRJ	EPS	EPCG	SRJ	EPS	EPCG	(4/1)	(5/2)	(6/3)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Proizvodnja HE	11 752	10 012	1 740	11 624,4	10 528,5	1 095,8	101,1	95,1	158,8
Proizvodnja TE	21 765	20 692	1 073	23 324,7	22 225,5	1 099,2	93,3	93,1	97,6
Sopstvena proizvodnja	33 517	30 704	2 813	34 949,1	32 754,0	2 195,0	95,9	93,7	128,2
Republička razmena		762	1 065		513,7	1 254,7		148,3	84,9
Nabavka od drugih EES izvan SRJ	2 454	1 137	1 317	5 507,9	4 071,9	1 436,0	44,6	27,9	91,7
Ukupno raspoloživo	35 971	32 603	5 195	40 457,0	37 339,6	4 885,8	88,9	87,3	106,3

Tabela 2. - nastavak

Raspoloživo	2001. godina Ostvareno (GWh)			Planirano 2003/ Ostvareno 2001. (%)		
	SRJ	EPS	EPCG	(1/10)	(2/11)	(3/12)
	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Proizvodnja HE	12 460,7	10 693,2	1 767,5	94,3	93,6	98,4
Proizvodnja TE	22 688,3	22 043,4	644,9	95,9	93,9	166,4
Sopstvena proizvodnja	35 149,0	32 736,6	2 412,4	95,4	93,8	116,6
Republička razmena		913,8	1 320,8		83,4	80,6
Nabavka od drugih EES izvan SRJ	5 713,0	4 334,5	1 378,6	43,0	26,2	95,5
Ukupno raspoloživo	40 862,0	37 984,8	5 111,8	88,0	85,8	101,6

18. decembra 2001. godine je bila 150,0 GWh, pri temperaturi od minus 8,2 stepena Celzijusa;

– najveća srednja satna snaga je bila 4. januara 6 406 GWh (najveća u 2001. godini 6 812 MW);

– prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2002. godini, sa energijom za pumpanje je iznosila 94,6 GWh (planirana 98,2 GWh), (prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2001. godini 95,6 GWh).

Interesantno je pomenuti kako se primena novog Tarifnog sistema EPS-a odrazila na minimalne i maksimalne prosečne snage (bez pumpanja):

– prosečna minimalna snaga bruto konzuma za period I – III je bila 3 634 MW (bilansom predviđena 3 281 MW);

– prosečna minimalna snaga bruto konzuma za period IV – VI je bila 3 020 MW (bilansom predviđena 2 073 MW);

– prosečna minimalna snaga bruto konzuma za period VII – IX je bila 2 809 MW (bilansom predviđena 2 603 MW);

– prosečna minimalna snaga bruto konzuma za period X – XII je bila 3 358 MW (bilansom predviđena 2 963 MW);

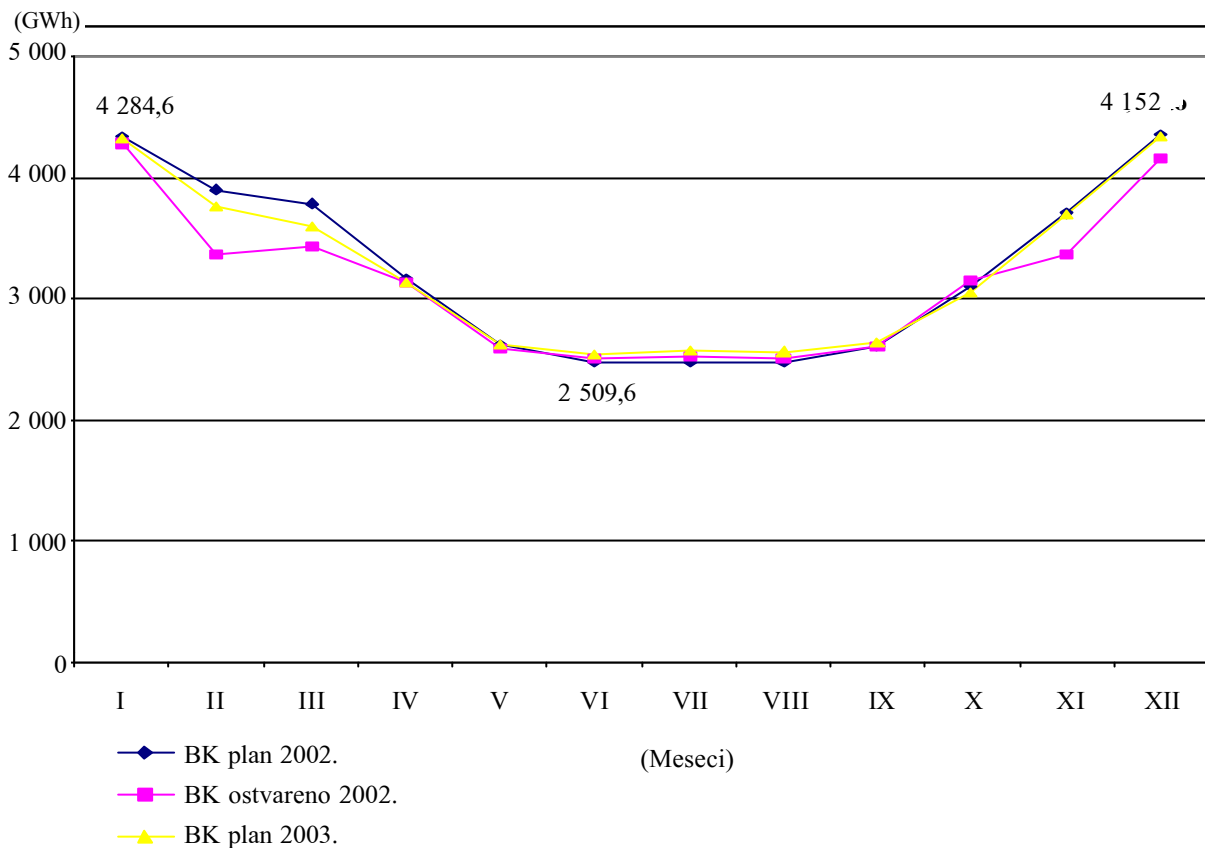
Tabela 3.

Ostvarenje bilansa potrošnje i isporuka električne energije EES SR Jugoslavije

Plasman	2002. godina						Ostvareno 2002/ Planirano 2002. (%)		
	Planirano (GWh)			Ostvareno (GWh)					
	SRJ (1)	EPS (2)	EPCG (3)	SRJ (4)	EPS (5)	EPCG (6)	(4/1) (7)	(5/2) (8)	(6/3) (9)
Direktni potrošači	3 639	1 633	2 006	3 180,0	1 181,3	1 998,6	87,4	72,3	99,6
Distribucije (bruto)	34 184	32 090	2 094	32 921,4	30 844,3	2 077,1	96,3	96,1	99,2
Gubici u prenosu	1 510	1 350	160	1 510,3	1 355,2	155,1	100,0	100,4	97,0
Pumpanje PAP Lisine	68	68		93,6	93,6		137,7	137,7	
Pumpanje RHE Bajina Bašta	709	709		937,5	937,5		132,2	132,2	
Sopstvena potrošnja	40 110	35 850	4 260	38 642,8	34 412,0	4 230,8	96,3	96,0	99,3
Republička razmena		1 065	414		1 254,7	513,7		48,2	303,1
Isporuca drugim EES izvan SRJ	680	594	86	1 814,2	1 673,0	141,2	266,8	281,6	
Ukupan plasman	40 790	37 509	4 760	40 457,0	37 339,6	4 885,8	99,2	99,5	102,6

Tabela 3. - nastavak

Plasman	Ostvareno 2001. godina (GWh)			Ostvareno 2002/ Ostvareno 2001. (%)		
	SRJ	EPS	EPCG	(4/10)	(5/11)	(6/12)
	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Direktni potrošači	2 750,8	865,4	1 885,4	115,6	136,5	106,0
Distribucije (bruto)	33 619,4	31 541,6	2 077,8	97,9	97,8	100,0
Gubici u prenosu	1 542,8	1 390,0	152,8	97,9	97,5	101,5
Pumpanje PAP Lisine	43,1	43,1		217,5	217,5	
Pumpanje RHE Bajina Bašta	1 009,0	1 009,0		92,9	92,9	
Sopstvena potrošnja	38 965,1	34 849,0	4 116,0	99,2	98,7	102,8
Republička razmena		1 320,8	913,8		95,0	56,2
Isporuca drugim EES izvan SRJ	1 896,9	1 815,0	82,0	95,6	92,2	172,2
Ukupan plasman	40 862,0	37 984,8	5 111,8	99,0	98,3	95,6



Slika 2. Mesečni bruto konzum EES SR Jugoslavije tokom 2002. godine

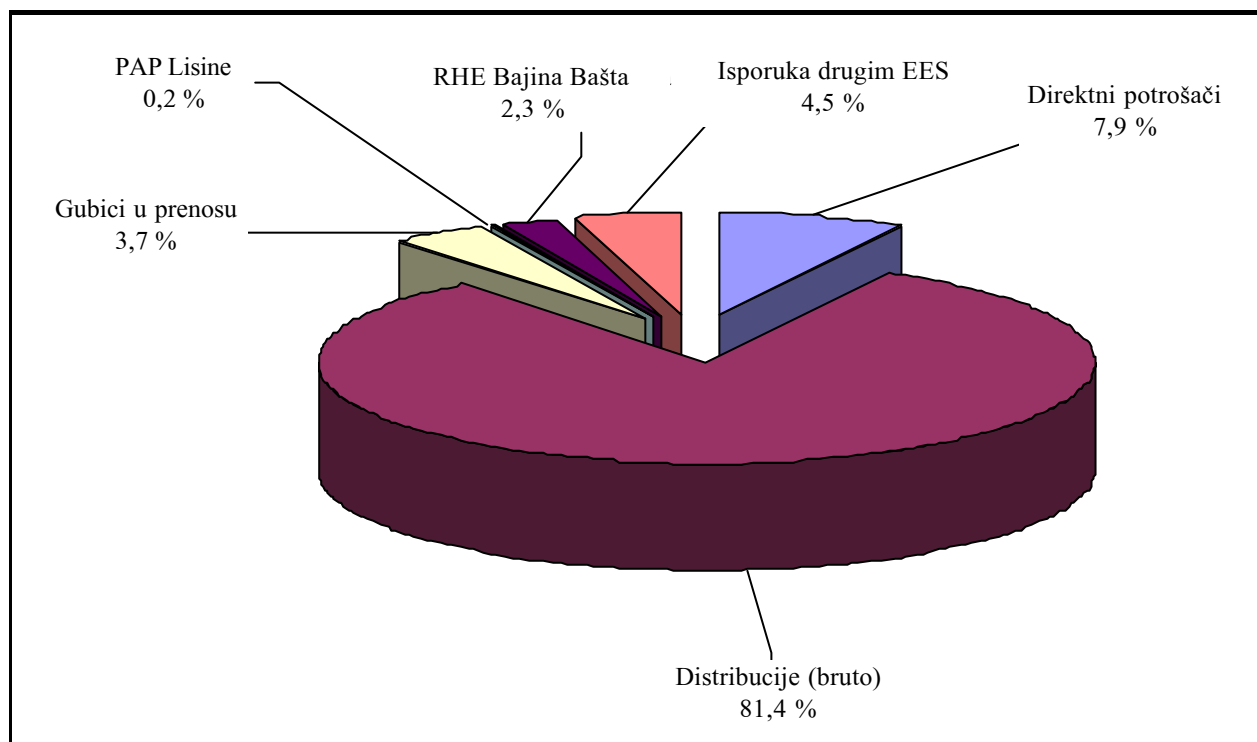
Tabela 4.

Elektroenergetski bilans potrošnje
i isporuke električne energije u EES SR Jugoslavije

Plasman	Planirano 2003. (GWh)			Ostvareno 2002. (GWh)			Planirano 2003./ Ostvareno 2002. (%)		
	SRJ	EPS	EPCG	SRJ	EPS	EPCG	(1/4)	(2/5)	(3/6)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Direktni potrošači	3 406	1 338	2 068	3 180,0	1 181,3	1 998,6	107,1	113,3	103,5
Distribucije (bruto)	30 507	28 330	2 177	32 921,4	30 844,3	2 077,1	92,7	91,8	104,8
Gubici u prenosu	1 443	1 276	167	1 510,3	1 355,2	155,1	95,9	97,1	104,7
Pumpanje PAP Lisine	68	68		93,6	93,6			157,9	
Pumpanje RHE Bajina Bašta	709	709		937,5	937,5			70,3	
Sopstvena potrošnja	40 110	35 850	4 260	38 642,8	34 412,0	4 230,8	92,9	102,9	103,5
Republička razmena		1 065	414		1 254,7	513,7		116,6	31,3
Isporuka drugim EES izvan SRJ	0	0	0	1 814,2	1 673,0	141,2	0,0	0,0	0,0
Ukupan plasman	40 775	37 509	4 745	40 457,0	37 339,6	4 885,8	88,8	87,2	106,3

Tabela 4. - nastavak

Plasman	2001. godina Ostvareno (GWh)			Planirano 2003/ Ostvareno 2001. (%)		
	SRJ	EPS	EPCG	(1/10)	(2/11)	(3/12)
	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Direktni potrošači	2 750,8	865,4	1 885,4	123,8	154,6	109,7
Distribucije (bruto)	33 619,4	31 541,6	2 077,8	90,7	89,8	104,8
Gubici u prenosu	1 542,8	1 390,0	152,8	93,5	91,8	109,3
Pumpanje PAP Lisine	43,1	43,1		171,9	171,9	
Pumpanje RHE Bajina Bašta	1 009,0	1 009,0		48,1	48,1	
Sopstvena potrošnja	38 965,1	34 849,0	4 116,0	92,2	90,4	107,2
Republička razmena		1 320,8	913,8		80,6	85,7
Isporuca drugim EES izvan SRJ	1 896,9	1 815,0	82,0	0,0	0,0	0,0
Ukupan plasman	40 862,0	37 984,8	5 111,8	87,9	85,7	101,6



Slika 3. Učešće potrošača električne energije u ukupnom plasmanu električne energije u EES SR Jugoslavije u 2002. godini

– prosečna minimalna snaga bruto konzuma za period I – XII je bila 3 052 MW (bilansom predviđena 2 572 MW);

– prosečna maksimalna snaga bruto konzuma za period I – III je bila 5 449 MW (bilansom predviđena 6 352 MW);

– prosečna maksimalna snaga bruto konzuma za period IV – VI je bila 4 222 MW (bilansom predviđena 4 682 MW);

– prosečna maksimalna snaga bruto konzuma za period VII – IX je bila 4 476 MW (bilansom predviđena 5 001 MW);

– prosečna maksimalna snaga bruto konzuma za period X – XII je bila 5 135 MW (bilansom predviđena 6 099 MW);

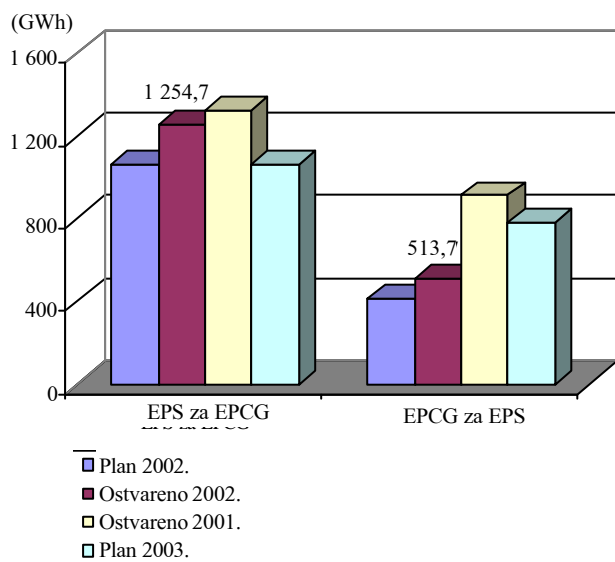
– prosečna maksimalna snaga bruto konzuma za period I – XII je bila 4 821 MW (bilansom predviđena 5 302 MW).

Kao što se vidi iz gornjih podataka, i dalje su pozitivni efekti Tarifnog sistema, odnosno „peglanja” dnevnog dijagrama opterećenja.

No, i pored toga, u pojedinim trenucima zimskih opterećenja nedostaje cca 800 MW snage, a u proseku leti do 3, a zimi i do 25 GWh električne energije dnevno.

U EPCG:

– najveća mesečna bruto potrošnja je bila u decembru 2002. godine i iznosila je 427,7 GWh (najveća mesečna bruto potrošnja u 2001. godini 431,0 GWh);



Slika 4. Razmena električne energije naše dve elektroprivrede

– najveća dnevna potrošnja je bila 21. decembra 2002. godine i iznosila je 14,7 GWh (najveća dnevna potrošnja u 2001. godini 15,1 GWh);

– najveća srednja satna snaga je bila 21. decembra 705 MW u 18 časova (najveća srednja satna snaga u 2001. godini 714 MW) i

– prosečna dnevna potrošnja na godišnjem nivou u 2002. godini je iznosila 11,6 GWh (planirana 11,6 GWh), (u 2001. godini ostvarena prosečna dnevna potrošnja 11,3 GWh).

4. MEĐUSOBNA RAZMENA ELEKTRIČNE ENERGIJE DVE ELEKTROPRIVREDE

Razmena električne energije između dva sistema u 2002. godini je na visokom nivou.

EPS je tokom prošle godine EPCG isporučio električne energije 1 254,7 GWh ili 117,8 % od plana, što je u odnosu na isporučenu električnu energiju u 2001. godini za 9,9 % više (tabela 3 i slika 4).

EPCG je tokom 2002. godine EPS-u isporučio električne energije 513,7 GWh, ili 124,1 % plana, što je u odnosu na 2001. godinu 56,2 % .

5. RAZMJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE SA EES IZVAN SR JUGOSLAVIJE

Elektroprivredna preduzeća koja sačinjavaju EES SRJ, su tokom 2002. godine isporučila električne energije 1 814,2 GWh, dok su u trenucima potreba, pretežno u zimskim mesecima, nabavila električne energije 5 507,9 GWh. Tabele 1 i 3, kao i slika 5 i 6, prikazuju podatke o toj isporuci i nabavci koji su, kada se analiziraju u odnosu na bilans u 2002. godini, sledeći:

– nabavka električne energije u 2002. godini bila je veća od plana za 6,4 %, odnosno za 3,6 % manja od nabavke električne energije u 2001. godini,

Tabela 5.

Razmena električne energije između EPS-a i EPCG u 2002. godini sa osvrtom na 2001. godinu i u odnosu na plan za 2003. godinu

Razmena električne energije između EPS-a i EPCG	Plan za 2002. (GWh)	Ostvareno u 2002. (GWh)	Ostvareno u 2002/ Plan u 2002. (%)	Ostvareno u 2001. (GWh)	Ostvareno 02/01 (%)	Plan za 2003. (GWh)	Plan za 03./02. (%)
EPS isporučio EPCG	1 065	1 254,7	117,8	1 320,8	95,0	1 065	84,9
EPCG isporučio EPS-u	414	513,7	124,1	913,8	56,2	762	148,3

Napomena: pomenutim ugovorom je definisan odnos, između vršne energije koju EPCG daje EPS-u za isporučenu energiju od EPS-a za EPCG u bandu: 1,415 : 1.

– isporuka električne energije (što je pretežno vraćanje električne energije zadužene ranijih godina) je bila za 166,8 % veća od plana, a manja nego 2001. godine 4,4 %.

Glavni deo isporuka električne energije je ostvario EPS (95,7 % od ukupne isporuke električne energije), dok je kod uvoza električne energije, EPCG uvezla električne energije 24,1 % (od ukupnog uvoza SRJ).

Na slikama 5 i 6 prikazano je kako se kretala (mesečno) isporuka i nabavka električne energije EES SR Jugoslavije tokom 2002. godine.

6. STANJE AKUMULACIJA

U tabeli 6 i pripadajućem dijagramu na slici 7 prikazano je stanje akumulacija u EES SRJ tokom 2002. godine, sa poređenjem u odnosu na 2001. i plan za 2003. godinu.

Stanje je bilo tako da je 31.12.2002. godine dočekan sa 121,6 % plana akumulacija (zbiroga plana republičkih bilansa), i to je 84,4 % maksimalno mogućih akumulacija EES SRJ.

7. OTKRIVKA UGLJA

Pošto od veličine otkrivke uglja zavisi proizvodnja uglja, a samim tim i popunjenost deponija

uglja i rad TE, to će u ovom poglavlju kao i na slici 8 i u tabeli 7 biti data i ova problematika, jer njena uspešnost itekako utiče na ostale rezultate ostvarenja EB zemlje.

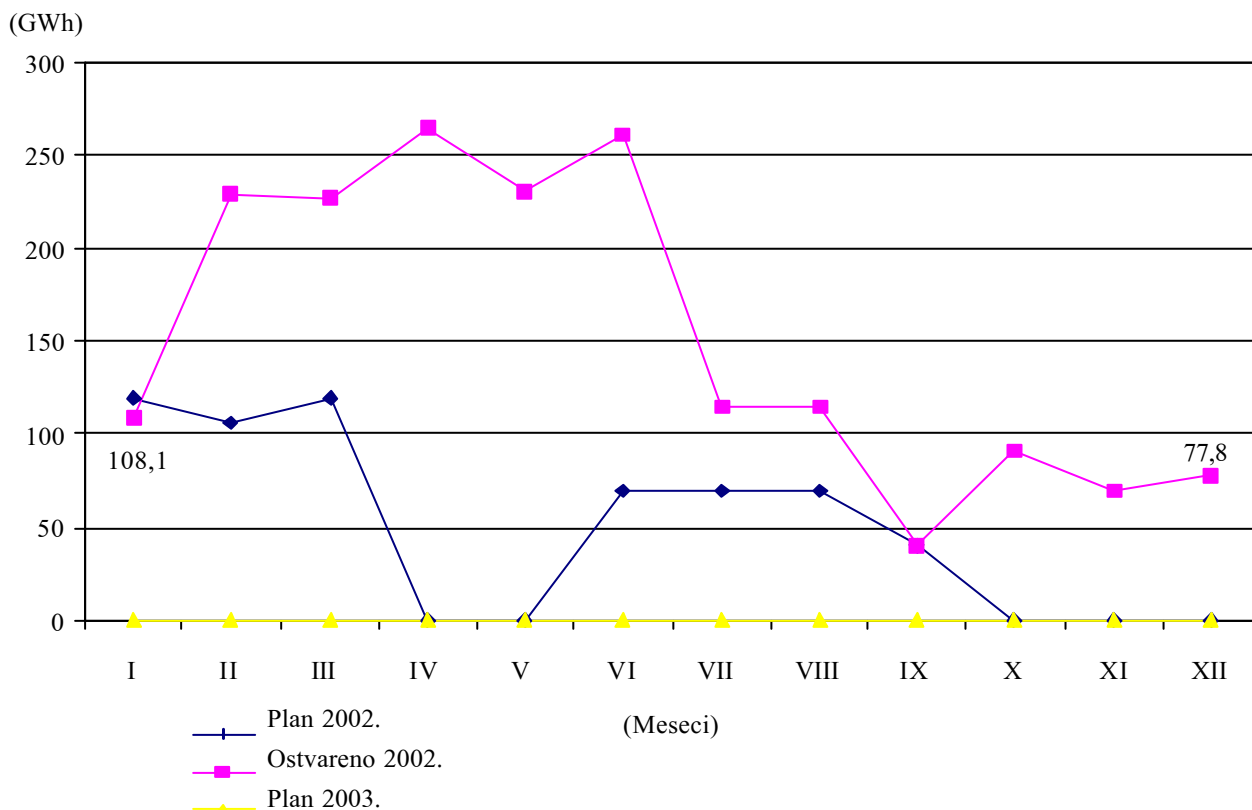
Na nivou zemlje, otkrivka uglja, kao prost zbir otkrivki uglja u Republikama, ostvarena je sa 117,6 % plana (sa isključenjem podataka za plan i proizvodnju na Kosovu i Metohiji, koji nam nisu dostupni).

Ostvarenje plana otkrivke uglja u EPS-u u 2002. godini (bez podataka za plan i proizvodnju na Kosovu i Metohiji) je iznosilo 119,0 % i veća je od ostvarenja u 2001. godini 57,4 %. Plan otkrivke uglja u 2003. godini predviđa smanjenje iste u odnosu na ostvarenu u 2002. godini za cca 7,7 % (samo uzimanje u obzir otkrivke u Kolubari i Kostolcu).

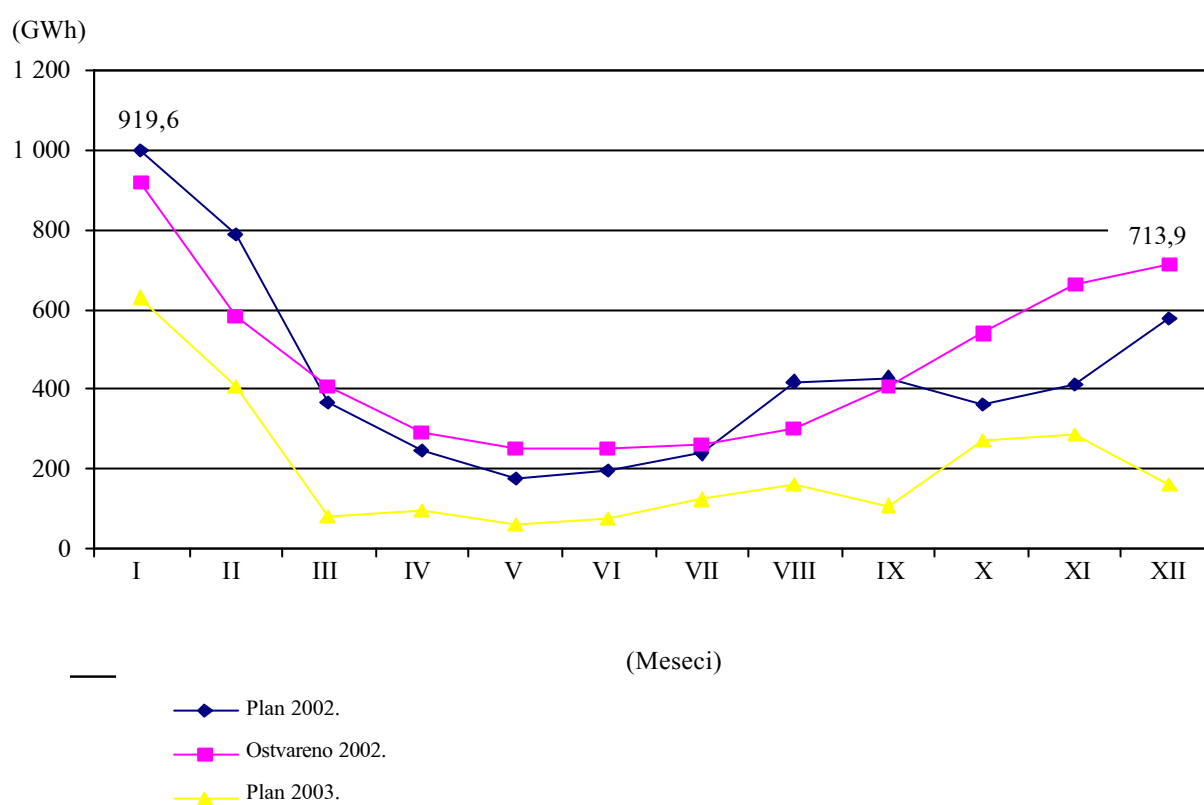
Otkrivka uglja u RCG u 2002. godini je iznosila 93,0 % plana. Ista je veća u odnosu na ostvareno u 2001. godini za 10,2 %, a planom za 2003. godinu predviđeno je da bude veća za 63,5 % od ostvarenog u 2002. godini.

8. DEPONIJE UGLJA ZA TE

U energetskim bilansima Republika, plan deponija uglja za TE je iznosio kao što je to prikazano u tabeli 8.



Slika 5. Isporuka električne energije EES SR Jugoslavije tokom 2002. godine



Slika 6. Nabavka EES SR Jugoslavije tokom 2001. godine
(plan SRJ kao zbir planova elektroprivreda)

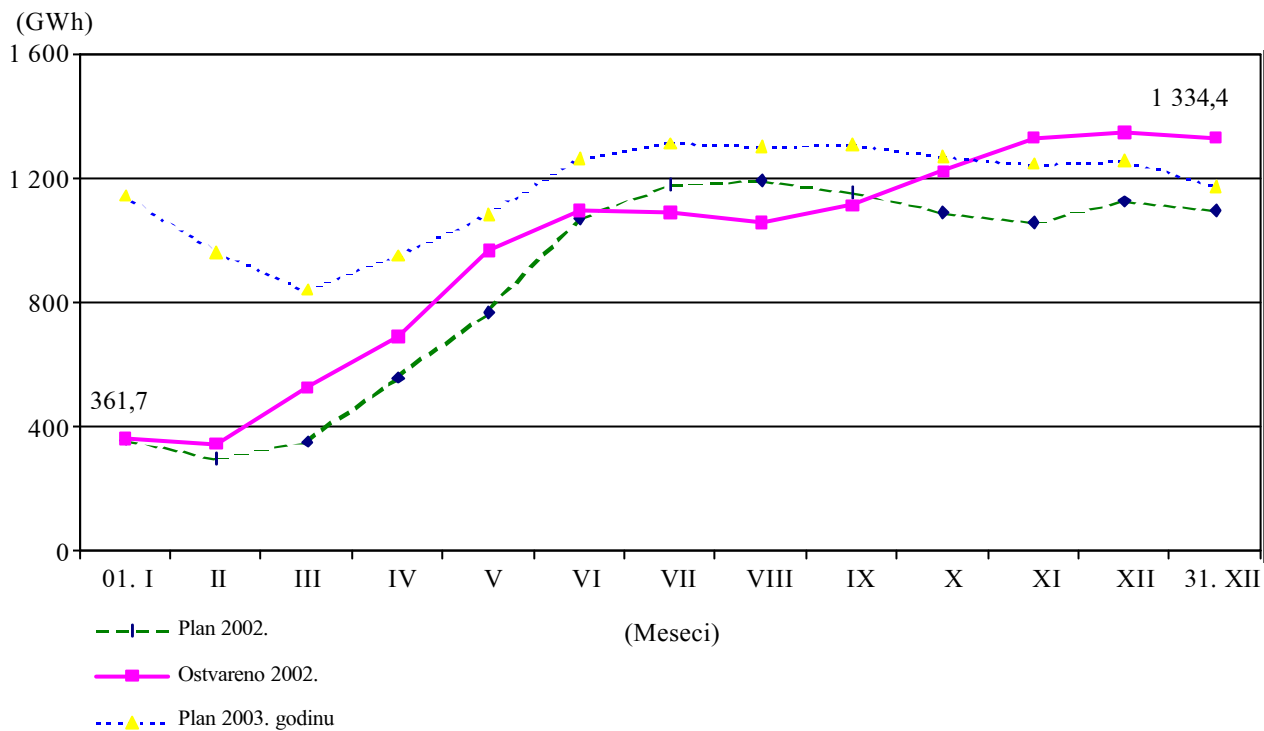
Tabela 6.

Stanje akumulacija za HE

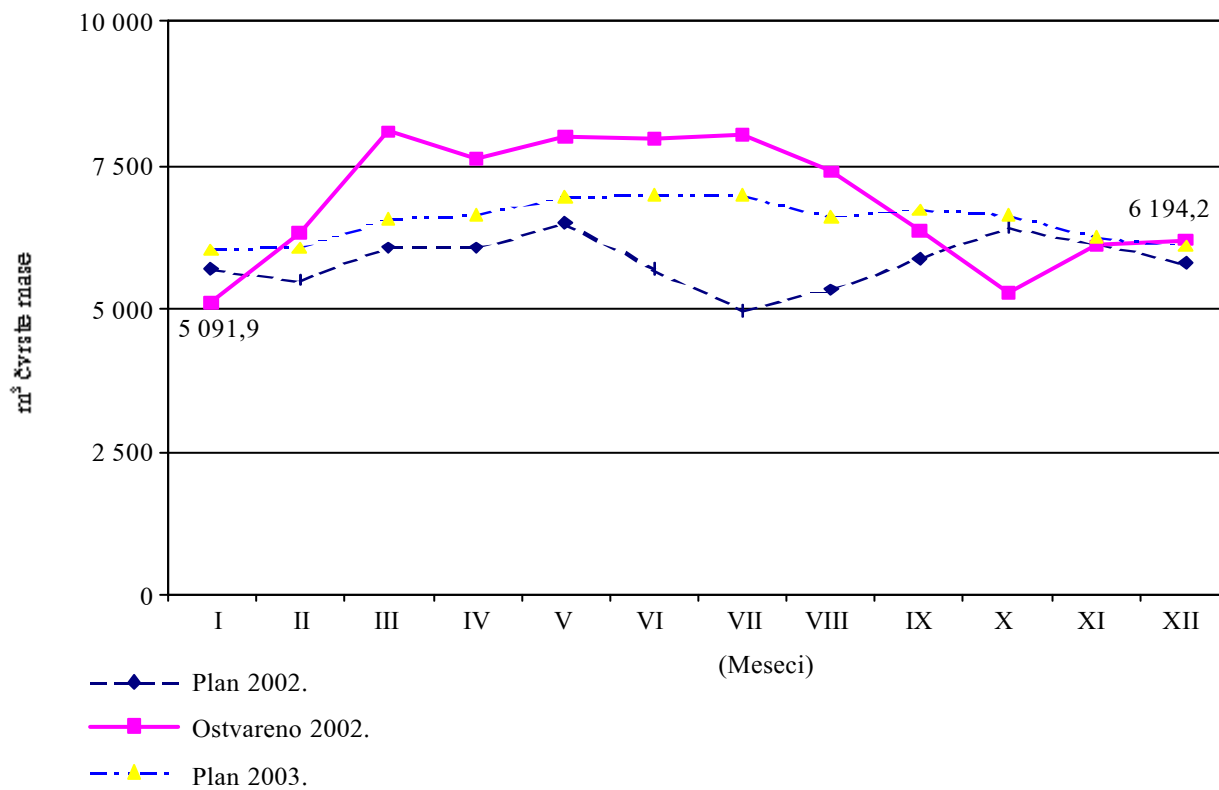
Akumulacije	01. I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	31.XII
Plan 2002. (GWh)	355	298	350	556	768	1 075	1 182	1 192	1 156	1 093	1 062	1 125	1 097
Ostvareno 2002. (GWh)	361,7	347,5	529,8	692,7	967,9	1 098,5	1 089,3	1 063,3	1 115,0	1 225,7	1 332,7	1 352,6	1 334,4
Ostvareno 2002/ Planirano 2002. (%)	101,9	116,5	151,5	124,7	126,0	102,1	92,2	89,2	96,4	112,2	125,5	120,3	121,6
Ostvareno 2001. (GWh)	454,9	626,7	522,0	738,0	902,8	846,1	811,3	728,1	572,2	617,0	490,2	557,9	358,5
Ostvareno 2002/ Ostvareno 2001. (%)	79,5	55,4	101,5	93,9	107,2	129,8	134,3	146,0	194,9	198,7	271,9	242,5	372,3
Ostvareno 2002/ Maksimum (%)	22,9	22,0	33,5	43,8	61,2	69,5	68,9	67,3	70,5	77,5	84,3	85,6	84,4
Plan 2003. (GWh)	1 146	964	843	954	1 084	1 264	1 317	1 305	1 312	1 275	1 248	1 263	1 174
Planirano 2003/ Ostvareno 2002. (%)	316,9	277,4	159,1	137,7	112,0	115,1	120,9	122,7	117,7	104,0	93,6	93,4	88,0
Planirano 2003/ Maksimum (%)	72,5	61,0	53,3	60,4	68,6	80,0	83,3	82,6	83,0	80,7	79,0	79,9	74,3

Napomena:

Maksimalne akumulacije EPS-a sa uticajem Uvca iznose: 995,6 GWh.
 Maksimalne akumulacije EPCG sa Pivom iznose: 585,0 GWh.
 Maksimalne akumulacije SRJ sa uticajem Uvca iznose: 1 580,6 GWh.



Slika 7. Akumulacije za HE EES SR Jugoslavije tokom 2001. godine



Slika 8. Mesečne otkrivke uglja u SRJ

Tabela 7.

Otkrivka uglja i ostvarenje bilansa za 2002. godinu
Poređenje sa ostvarenjem u 2001. i planom za 2003. godinu

Otkrivka	Plan 2002. (m ³ čvrste mase)	Ostvareno 2002. (m ³ čvrste mase)	Ostvareno 2002/ Planirano 2002. (%)	Ostvareno 2001. (m ³ čvrste mase)	Ostvareno 2002/ Ostvareno 2001. (%)	Plan 2003. (m ³ čvrste mase)	Planirano 2003/ Ostvareno 2001. (%)
Otkrivka u rudnicima EPS-a	66 200	78 780,5	119,0	50 035,3	157,4	72 700	92,3
Otkrivka u rudniku „Pljevlja”	3 815	3 546,5	93,0	3 218,8	110,2	5 800	163,5
Ukupna otkrivka uglja u SRJ	70 015	82 327,0	117,6	53 254,1	154,6	78 500	95,4

Napomena: Podaci za EPS su bez Kosova i Metohije

Iz date tabele 8 i slike 9 može se videti mesečno stanje deponija uglja za TE tokom 2002. godine, kao i stanje u 2001. godini i plan za 2002. godinu. Takođe tabela 8 daje odnose stanja deponija u odnosu na 2001. godinu, kao i plan deponija za 2003. godinu.

9. ZAKLJUČAK

Kada se analiziraju proizvodnja i potrošnja električne energije u 2002. godini, kao i ostali as-

pekti vezani za tu vrstu problematike, može se konstatovati sledeće:

- kao posledica kvalitetnijih remonata i održavanja, evidentni su i bolji rezultati u radu i proizvodnji čitavog EES;*
- zahvaljujući primeni novog tarifnog sistema (u EPS-u), došlo je do smanjenja maksimalnog dnevnog opterećenja u mreži EPS-a, kao i do rasta minimalnog dnevnog opterećenja, što dovodi do nešto ravnomernijeg dnevnog dijagrama opterećenja na nivou SRJ;*

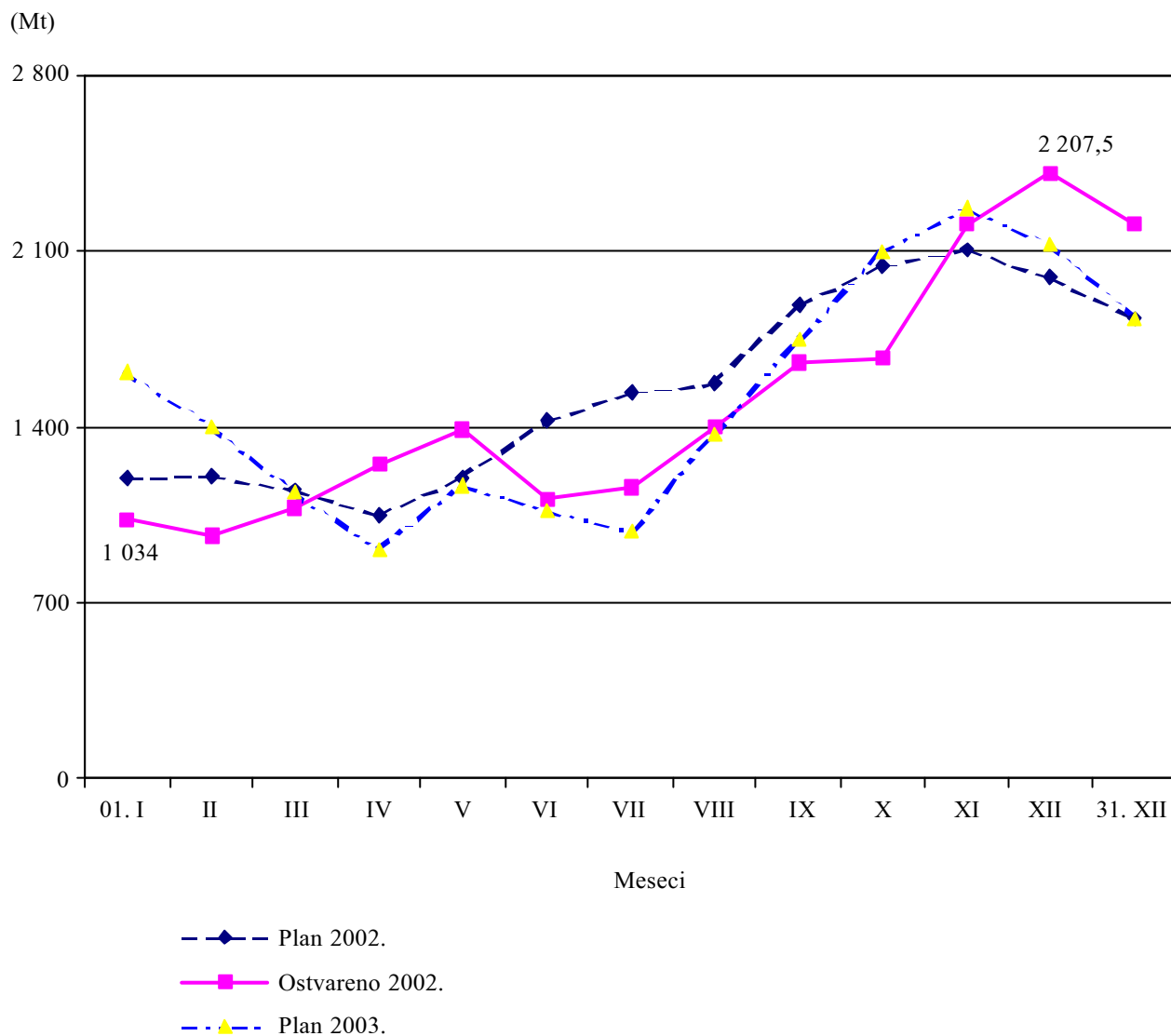
Tabela 8.

Deponije uglja i ostvarenje bilansa tokom 2002. godine
i poređenje sa 2001. godinom i plan za 2003. godinu

u Mt

	01. I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	01. XII	31. XII
Plan 2002. (Mt)	1 200	1 205	1 148	1 046	1 196	1 424	1 541	1 576	1 887	2 046	2 107	2 002	1 830
Stanje 2002. (Mt)	1 034,0	969,0	1 075,0	1 253,6	1 387,5	1 117,6	1 160,3	1 399,5	1 658,7	1 672,1	2 206,9	2 410,6	2 207,5
Stanje 2002/Plan 2002. (%)	86,2	80,4	93,6	119,8	116,0	78,5	75,3	88,8	87,9	81,7	104,7	120,4	120,6
Stanje 2001. (Mt)	1 504,3	1 352,1	1 339,2	1 289,7	1 185,9	1 211,5	1 284,5	1 464,2	1 754,3	1 902,0	1 775,9	1 653,3	1 171,6
Stanje 2002/Stanje 2001. (%)	68,7	71,7	80,3	97,2	117,0	92,2	90,3	95,6	94,6	87,9	124,3	145,8	188,4
Stanje 2002/Maksimum (%)	44,6	41,8	46,3	54,0	59,8	48,2	50,0	60,3	71,5	72,1	95,1	103,9	95,2
Plan 2003. (Mt)	1 620	1 399	1 142	910	1 170	1 070	982	1 372	1 753	2 101	2 272	2 132	1 830
Plan 2003/Stanje 2002. (%)	156,7	144,4	106,2	72,6	84,3	95,7	84,6	98,0	105,7	125,7	103,0	88,4	82,9
Plan 2003/Maksimum (%)	69,8	60,3	49,2	39,2	50,4	46,1	42,3	59,1	75,6	90,6	97,9	91,9	78,9

Napomena: Deponije u EPS-u su bez deponija za Kosovo i Metohiju (max 2 160 Mt) EPCG (max 160 Mt)



Slika 9. Deponije uglja za TE EES SR Jugoslavije tokom 2001. godine

- delimično se popravlja i tehnička efikasnost izvora električne energije;
- potrebno je stvoriti uslove za što racionalnije korišćenje električne energije;
- potrebno je nastaviti sa intenzivnim ulaganjem u remonte na svim nivoima, pripremom revitalizacije, kao i novim investicijama;
- potrebno je što pre ostvariti povezivanje sa prvom sinhronom zonom UCTE.

Generalna napomena čitaocima: ukoliko bi čitalac proveravao zbirove u tabelama, našao bi mala neslaganja, što je posledica zaokruživanja na jednu decimalu, jer su podaci dati, recimo u kWh, a u tabelama su prikazivani u GWh, pa otuda i razlika. Isto važi i kada su procenti (%) u pitanju. Za po-

datke o međurepubličkoj razmeni korišćeni su podaci EPS-a.

11. LITERATURA

- [1] UGOVOR O DUGOROČNOJ POSLOVNO-TEHNIČKOJ SARADNJI, mart 1991. godine.
- [2] EEB REPUBLIKE SRBIJE (aktuelizovani) U 2001, 2002 i 2003. GODINI.
- [3] EB REPUBLIKE CRNE GORE U 2001, 2002 i 2003. GODINI.
- [4] KOMERCIJALNI PODACI EPS-a O OSTVARENJU EEB u 2002, Beograd, 00. 00. 2003. godine.
- [5] IZVEŠTAJ O PROIZVODNJI I PROMETU ELEKTRIČNE ENERGIJE EPCG u 2002, Podgorica 3 001/1-97-871 od 00. 00. 2003. godine.

- [6] IZVEŠTAJ EPS-a O OSTVARENJU PROIZVODNJE UGLJA, Beograd, br. 708, 00. 00. 2003. godine.
- [7] IZVEŠTAJ RUDNIKA UGLJA PLJEVLJA O OSTVARENJU PROIZVODNJE UGLJA, Pljevlja, januar 2003. godine.
- [8] ELEKTROPRIVREDA SRBIJE 2002. GODINA, Beograd, 2003. godine.
- [9] ELEKTROPRIVREDA CRNE GORE 2002. GODINA, Nikšić, 2003. godine.

Rad je primljen u uredništvo 09. 02. 2003. godine



Branislav A. Bošković je rođen 1946. godine u Kolašinu. Srednju tehničku školu i prvi stepen elektrotehničkog fakulteta završio u Titogradu (danas Podgorica), a drugi stepen u Beogradu. Po završetku studija, radio u Minelu i Elektronu, kao i za strane kompanije, na izgradnji elektroenergetskih i industrijskih postrojenja u zemlji i inostranstvu. Od 1996. godine zaposlen u Zajednici jugoslovenske elektroprivrede. Oblast rada u ZJE je bio EEB SRJ.

Uputstvo autorima za saradnju u stručnom glasilu „Elektroprivreda”

**U stručnom glasilu se objavljuju kategorisani članci:
originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi i stručni radovi
iz oblasti elektroprivrede, odnosno energetike.**

Pismo: ćirilica ili latinica. Na početku se navode imena autora sa zvanjima i akademskim titulama, naziv preduzeća, odnosno dela preduzeća ili ustanove sa adresom, kao i naslov rada (na srpskom i engleskom jeziku). Rezime rada (na srpskom i engleskom jeziku) sadrži kratko izloženu osnovnu strukturu i sadržaj rada, i ne treba da sadrži više od 200 reči. Ključne reči se takođe navode na srpskom i engleskom jeziku.

Treba izbegavati celovita matematička izvođenja vezana za relacije koje opterećuju praćenje rada. Neophodna matematička izvođenja mogu se dati, po potrebi, kao celine u vidu jednog ili više priloga. Treba obavezno koristiti SI sistem jedinica i opšte prihvaćene pojmove.

Jednačine treba numerisati uz desnu marginu teksta, u malim (okruglim) zagradama. Pozivanje na jednačine u tekstu vrši se pomoću malih zagrada, a pozivanje na literaturu pomoću srednjih (uglastih) zagrada. Značenje skraćenice objasniti pri njenom prvom korišćenju u tekstu. Strane reči se prevode na srpski, a original se piše u zagradi iza prevoda. Napomena u tekstu treba da bude što manje, a ukoliko ih ima, treba da budu kratke. Napomene se označavaju rednim arapskim brojevima i navode se na dnu stranice, kao fusnote. Napomene u tabelama označavaju se malim slovima i navode se odmah ispod tabele. Na kraju rada prilaže se spisak korišćene literature. Za članke, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov ra-

da, pun naziv časopisa, broj i godina publikovanja i prvi i poslednji broj stranice. Za knjige, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naslov knjige, izdavač i godina izdanja. Za referate sa konferencija, navode se prezimena i početna slova imena svih autora, naziv referata, pun naziv konferencije, broj referata, mesto i vreme održavanja konferencije.

Rad ne treba da prelazi 15 kucanih strana formata A4 sa marginama od 3 cm. Tabele, slike i fotografije treba obeležiti po redosledu i uključiti u tekst.

Autor može dati predlog kategorizacije rada u skladu sa Uputstvom za uređivanje časopisa (originalni naučni rad, prethodno saopštenje, pregledni članak i stručni članak). Autor ne može istu ili sličnu verziju rada istovremeno ponuditi drugim časopisima radi objavljivanja.

Autor dostavlja rad u elektronskom obliku na disketi i na papiru, u tri primerka. Za elektronski oblik rada, preporučuje se autoru da koristi program za pisanje teksta Word i tip slova Times New Roman (font 12, a razmak 1,5).

Rad se šalje na adresu:

**ZAJEDNICA
JUGOSLOVENSKE
ELEKTROPRIVREDE**
Balkanska 13/II, 11000 Beograd



Elektroprivreda

Elektroprivreda

Ministarstvo elektroprivrede FNRJ

BILTEN

Biro-a za unapredjenje proizvodnje

God. 1 br. 1

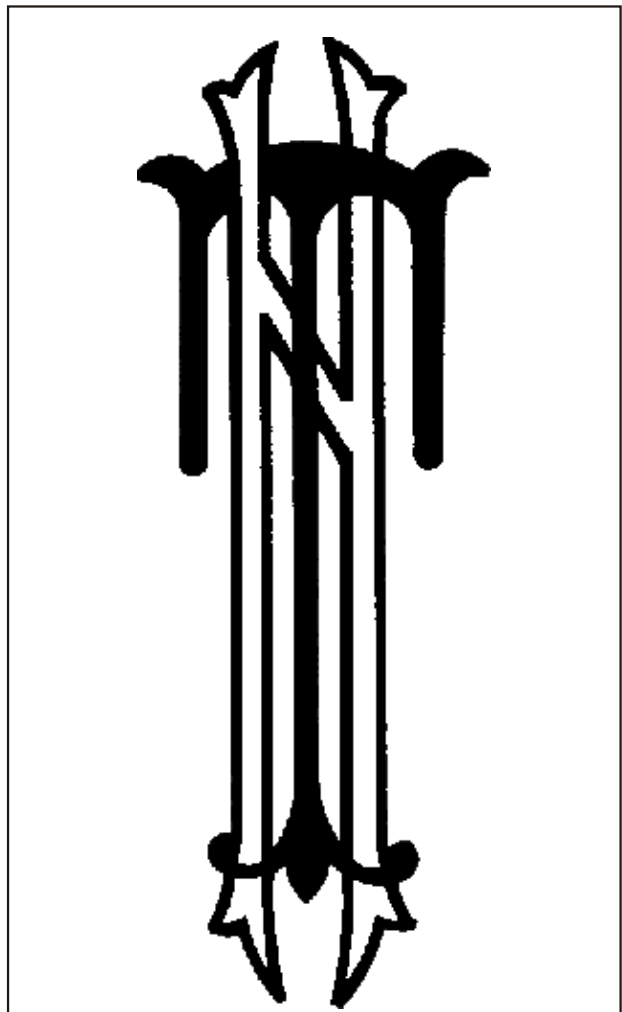
Izdavač: Ministarstvo elektroprivrede FNRJ – Biro za unapredjenje proizvodnje.

Urednje redakcioni odbor, odgovorni urednik: **Ing. Herman Mates.**

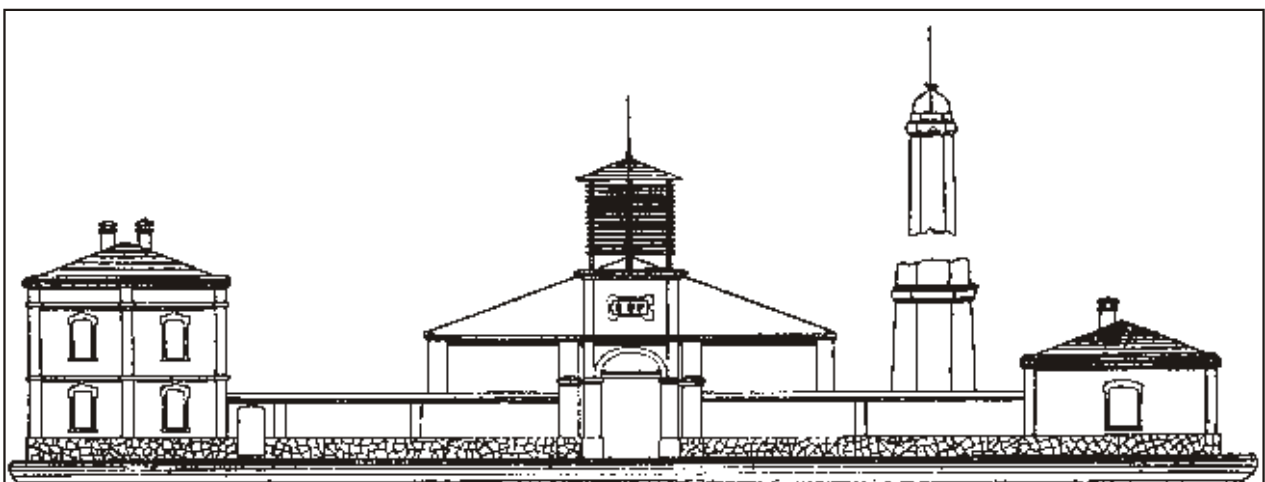
Uredništvo: Beograd, Bulevar Vojvode Mišića 41, tel. 50-831, lok. 153.

Oktoibar 1948 god.

ELEKTROPRIVREDA



NIKOLA TESLA



Skica prve Javne električne centrale u Srbiji – Beograd, 1893. godina