



Elektroprivreda

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

Godina LXI April-Jun Broj 2
Year LXXI Aprile-June No. 2

Sadržaj Strana Page Content

	<i>Branislav A. Bošković</i>		
	UVODNA REČ	3	INTRODUCTORY WORD
	<i>Aleksandar B. Nikolić i Borislav I. Jęstęnić</i>		
PRIMENA DIREKTNE KONTROLE MOMENTA U ASINHRONOM POGONU SA STRUJNIM INVERTOROM		5	DIRECT TORQUE CONTROL APPLICATION IN INDUCTION MOTOR DRIVE WITH CURRENT SOURCE INVERTER
	<i>Dragan P. Popović,</i> <i>Ivan Stanislavljević i Miloš Stojković</i>		
METODOLOŠKI I PRAKTIČNI ASPEKTI IZBORA ODNOSA KRATKOG SPOJA I SINHRONIH REAKTANSI GENERATORA U TE KOLUBARA B I TE NIKOLA TESLA B3		19	THE CHOICE OF SHORT CIRCUIT RATIO AND SYNCHRONOUS REACTANCES OF GENERATORS IN TPP KOLUBARA B AND TPP NIKOLA TESLA B3
	<i>Saša Milić, Dragan Kovačević</i> <i>Nebojša Karanović, Zoran Kršęnković i Miša Kožićić</i>		
SISTEM ZA TEMPERATURNI MONITORING NAMOTAJA ROTORA HIDROGENERATORA		29	SYSTEM FOR TEMPERATURE MONITORING OF ROTOR WINDINGS OF HYDRO GENERATORS
	<i>Tina Dašić i Branislav Đorđević</i>		
MODELIRANJE EKOLOŠKIH PROCESA U AKUMULACIJAMA HIDROENERGETSKIH SISTEMA		38	MATHEMATICAL MODELLING OF ECOLOGICAL PROCESSES IN RESERVOIRS OF HYDROENERGETIC SYSTEMS
	<i>Miodrag Mesarović i Milan Čalović</i>		
KOGENERACIJA U SRBIJI – ZAŠTO SE OKLEVA?		52	COGENERATION IN SERBIA – WHY A HESITATION?
	<i>Vladica Mijailović</i>		
KONCEPTI ODRŽAVANJA VISOKONAPONSKE OPREME I INOSTRANA PRAKSA		67	HV EQUIPMENT MAINTENANCE CONCEPTS AND INTERNATIONAL PRACTICE
	<i>Josif V. Spirić,</i> <i>Aleksandar S. Jović i Miroslav B. Dočić</i>		
UTICAJ PROMENE NAMENE PROIZVODNIH PROSTORA I TEHNOLOŠKIH PROCESA NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGJE		75	THE INFLUENCE OF MANUFACTURING PREMISES AND TECHNOLOGICAL PROCESSES ORIENTATION CHANGE ON POWER QUALITY
	<i>Siniša Spremić</i>		
PRIMENA SPEKTROSKOPIJE U FREKVENTNOM PODRUČJU ZA ODREĐIVANJE STANJA IZOLACIJE 110 kV PROVODNIH IZOLATORA		86	APPLICATION OF FREQUENCY DOMAIN SPECTROSCOPY FOR DETERMINING INSULATION CONDITION OF 110 kV BUSHINGS
	<i>Žarko Markov</i>		
TEHNIČKI USLOVI ZA TELEFONSKU MREŽU ELEKTROPRIVREDE SRBIJE		97	TECHNICAL REQUIREMENT FOR EPS TELEPHONE NETWORK
	<i>Recenzije rukopisa</i>		<i>Reviews of the manuscripts</i>
	<i>T. Bojković, M. Tanasković i D. Perić</i>		
DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGJE – REŠENI PRIMERI		102	ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION - SOLVED EXAMPLES
	<i>Recenzije rukopisa</i>		<i>Reviews of the manuscripts</i>
	<i>dr Ranko Antunović</i>		
NADZOR I DIJAGNOSTIKA TEHNIČKIH SISTEMA		105	SURVEILLANCE AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS

IZDAVAČ:**PUBLISHER:****ZAJEDNICA JUGOSLOVENSKE ELEKTROPRIVREDE
UNION OF YUGOSLAV ELECTRIC POWER INDUSTRY**

11 000 Beograd, Balkanska 13

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

Telefaks: 2686-398

Internet strana: www.eps.co.yu; www.epcg.cg.yu;Elektronska pošta: jugel@sezampro.yu; jugel@beocity.net**VD DIREKTORA I GLAVNOG I ODGOVORNOG UREDNIKA
ACTING DIRECTOR AND CHIEF EDITOR**

Branislav A. Bošković, dipl. ing. el.

IZDAVAČKI SAVET**PUBLISHING COUNCIL**

Branislav A. Bošković, dipl. inž. el., predsednik,

Prof. dr Dragutin Salamon, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, član,

Dr Slavoljub Lukić, dipl. inž. el. iz JP „Elektroprivreda Srbije”, član,

Dr Slobodan Đekić, dipl. inž. maš. iz JP „Elektroprivreda Srbije”, član,

Dragutin Martinović, dipl. inž. el. iz „Elektroprivreda Crne Gore” AD, član,

Vladimir Vujović, dipl. inž. el. iz „Elektroprivreda Crne Gore” AD, član,

Mr Gojko Dotlić, dipl. inž. el. iz JP „Elektromreža Srbije”, član,

Mr Vladan Radulović, dipl. inž. el. iz AD Prenos-Podgorica, član.

REDAKCIONI ODBOR**EDITORIAL BOARD**

Redakcioni odbor za stručno glasilo „Elektroprivreda”

Prof. dr Marko Ivetić, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, član;

Prof. dr Nešo Mijušković, JP „Elektromreža Srbije”, član;

Prof. dr Vladimir Pavlović, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, član;

Prof. dr Dragoslav Perić, JP „Elektromreža Srbije”, član;

Prof. dr Milan Petrović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, član;

Prof. dr Jadranka Radović, Elektrotehnički fakultet Univerzitet Crne Gore, član;

Prof. dr Dragutin Salamon, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, predsednik;

Prof. dr Vladimir Strezoski, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, član;

Prof. dr Ninel Čukalevski, Institut „Mihailo Pupin”, član;

Vanr. prof. dr Saša Stojković, Tehnički fakultet Čačak Univerziteta u Kragujevcu, član;

Dr Petar Vukelja, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, član;

Dr Veselin Ilić, AD Prenos-Podgorica, član;

Dr Duško Tubić, JP „Elektromreža Srbije”, član;

Mr. Boško Bogetić, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, član;

Mr. Vladimir Janković, JP „Elektromreža Srbije”, član;

Mr. Milanko Koruga, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, član;

Mr. Miroslav Marković, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, zamenik predsednika;

Mr. Predrag Mijajlović, AD Prenos-Podgorica, član;

Mr. Velimir Strugar, „Elektroprivreda Crne Gore” AD, član;

Milan Miroslavljević, dipl. inž. el., JP „Elektroprivreda Srbije”, član;

Aleksandra Čanak Nedić, dipl. inž., JP „Elektroprivreda Srbije”, član;

Vojislav Škundrić, dipl. inž. el., JP „Elektroprivreda Srbije”, član.

**LEKTOR I PREVODILAC
LINGUISTIC REVIEW
& TRANSLATION**Zlata Milinović,
dipl. filolog

Časopis „Elektroprivreda” izlazi kvartalno.

The „Elektroprivreda” journal is issued quarterly.

Prelom teksta: Agencija „Negativ”, 11 070 Novi Beograd, Ismeta Mujezinovića 20 a**Layout and design:** Agencija „Negativ”, 11 070 Novi Beograd, Ismeta Mujezinovića 20 a**Štampa:** „BS print”, 11 070 Novi Beograd, Bežanijskih ilegalaca 21**Printed by:** „BS print”, 11 070 Novi Beograd, Bežanijskih ilegalaca 21**Tiraž:** 1 100 primeraka**Circulation:** 1,100 copiesCIP – Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.9

ELEKTROPRIVREDA : časopis Zajednice
jugoslovenske elektroprivrede / v. d. glavnog i
odgovornog urednika Branislav Bošković. –
God. 1, br. 1 (1948)– . – Beograd
(Balkanska 13) : Zajednica jugoslovenske
elektroprivrede, 1948– (Beograd : BS print).
– 28 cm

Tromesečno

ISSN 0013-5755 = Elektroprivreda

COBISS.SR-ID 32023

Branislav A. Bošković

Uvodna reč

Poštovani čitaoci

Ovaj broj uređuju i vode novoizabrani Izdavački savet (IS) i Redakcioni odbor (RO), što se vidi u Impresumu. Kao Glavni i odgovorni urednik časopisa-po službenoj dužnosti, želim ovom prilikom da se najtoplije zahvalim predhodnim članovima IS i RO na svesrdnoj pomoći i zalaganju da naš časopis bude što kvalitetniji. Odras te i takve saradnje je i njegovo priznanje kao časopisa od nacionalnog interesa. Siguran sam da, sada, uključanjem JP Elektromreža Srbije i Akcionarskog društva Prenos-Podgorica, polako ali sigurno ide na put regionalnog časopisa, što je prva stepenica ka Međunarodnom časopisu, što nam je cilj.

Sa željom da naš časopis i dalje pobuđuje vaše interesovanje i težnju da prati trendove stručnih časopisa, obraćam(o) vam se sa par sugestija, koje nisu nažalost urodile plodom do sada, mada su slične onima od prije nekoliko godina.

Očekujem(o) od vas da nam se povremeno javite sa dobronamernim sugestijama, posebno sa željom da pokrenemo, zajedno, kritičku rubriku radova koje objavljujemo, svakako i sa pitanjima za autore ako ih ima, a nadamo se da ih ima. Napominjemo da se, prema praksi koja se primenjuje u poznatim svetskim stručnim časopisima, neće objavljivati afirmativni prilozi, kao ni prilozi van tematike kojom se bavi predmetni rad i, uopšte, naš časopis.

Vaš stav, ukoliko poštuje navedeno, ćemo objaviti u narednom broju časopisa. Svakako, posle tog objavljivanja omogućićemo i autoru komentarsanog rada da da odgovor na eventualno postavljena pitanja i potrebna objašnjenja, sve u meri i ukoliko on bude nalazio za shodno, koji bi usledio u tom broju ili narednom, zavisno od toga kada će stići odgovor, stav, autora, čime bi se završio komentar predmetnog rada.

Dear readers,

This issue is edited and published by the newly appointed Publishing Council (PC) and Editorial Board (EB), as shown in the Impressum. As a Editor-in-Chief of the Journal, I take this opportunity to present my warmest thanks to all previous members of the Publishing Council and Editorial Board for the comprehensive and abundant help and efforts to contribute to an even higher quality of our journal. Such cooperation resulted in recognizing it as the journal of national interest. I am sure that now, with including JP Elektromreza Srbije and Akcionarsko drustvo Prenos – Podgorica, it is heading, slowly but certainly towards becoming regional journal, which is the first step towards becoming an international journal, the aim we would like to attain.

Wishing that our journal continues to arouse your interest and strive to follow the trends of specialized journals, we would like to address you a few suggestions, similar to those made a few years ago, which, unfortunately, have not given any result so far.

I (We) expect you to write to us occasionally with well intentioned suggestions, especially with a desire to initiate together with you a column intended for criticism on papers published in our journal. Your questions to authors, if any, would also be welcome and we hope that there are such questions. Please note that in accordance with the practice applied in well known international journals, we shall not publish any affirmative supplements, nor supplements referring to matters not covered in a referent paper nor in our journal.

Your opinion, provided it respects the aforesaid, will be published in the following issue of our journal. After publishing your comments, we shall certainly make it possible for the author of the commented paper to reply to possible questions and to give necessary explanations, to the extent he finds

Mislimo da će na ovaj način naš i, svakako, i vaš časopis, poštovani čitaoci, dobiti na kvalitetu, što nam je svima, verujem, cilj.

Ujedno vas pozivamo da nadete prostora u vašem slobodnom vremenu i napišete rad koji je u direktnoj ili indirektnoj vezi sa elektroprivrednom delatnošću kojom se bavite, i na taj način upoznate širu stručnu javnost sa problemima iz prakse na koje ste naišli, kao i sa načinom kako ste ih sa uspehom prevazišli, čime biste pomogli svojim kolegama da eventualno slične probleme lakše reše. U praksi se sigurno često susrećete sa prilično teškim problemima koje mukotrpno rešavate a da to drugi i ne znaju. Neka vam i to bude razlog da napišete rad, koji ćemo rado objaviti, svakako po propozicijama koje važe za časopis.

Smatramo da ovi predlozi neće ostatiti bez odjeka, jer višedecenijsko izlaženje (na početku smo sedme decenije izlaženja) našeg i vašeg časopisa to zaslužuje.

Unapred hvala svima koji će nas podržati u našoj želji da časopis postane još kvalitetniji, samim tim i prisutniji među vama.

Ovaj broj, kao uostalom i prethodni, obiluje nizom interesantnih tema, u šta će se svaki čitalac ponaosob uveriti pročitavši rezimee, koji će ih u većini, verujem, zaintrigirati da rad pročitaju u celosti pa onda, možda, i da se obrate sa nekim komentarom ili dobronamernom sugestijom, primedbom.

S poštovanjem,

Glavni i odgovorni urednik

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

appropriate, which would be published in the same or the following issue, depending on the time of arrival of the author's reply, thereby concluding the comments on the referent paper.

We hope, dear readers, that this will contribute to the quality of our common journal, which I believe is the aim of all of us.

Your efforts to find time to write a paper directly or indirectly referring to your particular field of activities within the electric power industry would be very much appreciated, as a large number of our professional readership would be thus informed on the problems which you had come across in your practice and on the way you had successfully overcome them, and you would thereby help your colleagues in solving their similar problems. You have probably been facing many difficult problems in your practice which can be solved with great difficulty, but which many people are not aware of. Let that be one of the reasons for writing a paper on that subject, which we shall be glad to publish, of course according to the propositions applying to our journal.

We are sure that these suggestions will not be left without a response, as many decades of publishing (we are concluding the sixth decade of publishing) our common journal deserves that.

A great appreciation is extended in advance to all those who will support us in our desire to contribute to an even higher quality of our journal and thus bring our journal closer to our dear readers.

This issue, as well as the previous one, offers a series of interesting subjects that every reader will discover by reading abstracts, that will in majority, I believe, incite readers to read a paper in a whole and then comment it or give a well-intentioned suggestion or remark.

Yours faithfully,

Editor-in-Chief

Branislav A. Bošković

Aleksandar B. Nikolić i Borislav I. Jeftenić

Primena direktne kontrole momenta u asinhronom pogonu sa strujnim inverterom

Originalan naučni rad
UDK: 521.232; 621.3.018.5; 621.314.572

Rezime:

Direktna kontrola momenta je jedna od dve najnaprednije metode upravljanja asinhronim motorima. Primena ove metode na pogon sa strujnim pretvaračem učestanosti predstavlja originalan doprinos u ovoj oblasti, s obzirom da u stručnoj literaturi nema radova na tu temu. U ovom radu je predstavljeno originalno rešenje upravljanja direktnom kontrolom momenta pomoću algoritma koji obezbeđuje konstantnu učestanost invertora. Uz to su zadržane prednosti osnovne strukture direktne kontrole momenta koja koristi optimalnu tablicu izbora prekidača u inverteru, ali modifikovanu na odgovarajući način. Dodatne prednosti predstavljenog rešenja se ogledaju u potpunom odsustvu senzora na motoru, jer se sva merenja vrše isključivo u jednosmernom međukolu pretvarača. Na osnovu tih vrednosti, poznajući karakteristike pretvarača, rekonstruišu se struja i napon motora i na osnovu njih estimira fluks motora, pri čemu je primenjen estimator zasnovan na kompenzaciji ofseta indukovanog napona. Svi rezultati analitičkog projektovanja su provereni simulacijom na računaru, i potvrđeni eksperimentalno na razvijenom laboratorijskom prototipu.

Ključne reči: direktna kontrola momenta, asinhroni motor, strujni inverter

Abstract:

DIRECT TORQUE CONTROL APPLICATION IN INDUCTION MOTOR DRIVE WITH CURRENT SOURCE INVERTER

Direct torque control is one of two most advanced control methods for induction motors. Application of this method in the drive with current source inverter represents original contribution in this field, considering that there is no any paper on this topic in the literature. In this paper an original solution of direct torque control is shown using algorithm that provides constant inverter frequency. Also, advantages of basic direct torque control structure are retained, using optimal switching table with a proper modification. Additional improvements of proposed solution are in a complete removal of sensors on motor, since all measurements are performed only in DC link. Using such values, knowing the converter characteristics, motor current and voltage are reconstructed and used for flux estimation. Flux estimator is based on compensation of the induced voltage offset. All results of analytical development are checked by computer simulation and verified experimentally on developed laboratory prototype.

Key words: direct torque control, induction motor, current source inverter

Dr Aleksandar B. Nikolić, dipl. ing. el. – Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” a.d., 11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a
Prof. dr Borislav I. Jeftenić – Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 11 000 Beograd, Bulevar Kralja Aleksandra 73

1. UVOD

Razvoj upravljačkih strategija u regulisanim elektromotornim pogonima koji koriste poluprovodničke pretvarače polazi od pogona sa jednosmernim motorom (slika 1). Kod ovog pogona moment se upravlja direktno promenom struje indukta. Orije-tacija magnetnog polja je postignuta mehanički ko-mutatorom, tako da je i upravljanje fluksa direktno. Nedostaci su veliki inicijalni troškovi i troškovi odr-žavanja, kao i neophodan senzor brzine na vratilu motora.

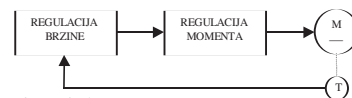
Razvoj energetske elektronike krajem 70-tih godina prošlog veka je omogućio primenu asinhronih motora koji su, za istu snagu, manjeg gabarita i cene od jednosmernih, a i jednostavnije im je održavanje. Osnovna upravljačka strategija je skalarno upravljanje, poznatije kao U/f ili Volt-Hertz upravljanje. Asinhronim motorom se upravlja tako što se na osnovu zadate frekvencije održava konstantan odnos napona i frekvencije, čime se obezbeđuje rad pri konstantnom fluksu, a dalje se ovaj odnos koristi za upravljanje inverterom preko PWM modulatora. Nedostaci ove strategije su, i pored odsustva senzora brzine, ni direktno a ni indirektno upravljanje momentom i fluksom, pa samim tim i veoma spor odziv momenta. I pored toga, ova strategija je i danas najrasprostranjenija u standardnim industrijskim pogonima.

Dalji razvoj, kako energetske tako i digitalne elektronike (mikrokontrolera, DSP kontrolera i složenijih integrisanih FPGA struktura), je omogućio primenu složenih algoritama upravljanja poput vektorske kontrole, koja predstavlja emulaciju rada jednosmerne mašine. Pri tome se ovde orijentacija magnetnog polja postiže elektronski, a ne mehanički, odnosno matematičkim modelovanjem karakteristika motora. Prednosti su veoma brz odziv momenta, iako je upravljanje momentom indirektno preko PWM modulatora, a nedostaci su složenost implementacije, osetljivost na promene parametara rotorskog kola i, u najvećem broju slučajeva, neophodan senzor brzine na vratilu motora.

Direktna kontrola momenta (skraćeno DTC od engl. *Direct Torque Control*) je poslednja upravljačka strategija u nizu, razvijena sa ciljem da se dobije kombinacija jednostavnosti implementacije poput one kod U/f kontrole, a sa performansama vektorski upravljaniog pogona. Cilj ovakve kontrole nije variranje amplitude i frekvencije napona napajanja ili emulacija jednosmerne mašine, već iskorišćenje mogućnosti asinhronog motora da proizvede fluks i moment kada se napaja iz invertora. Ova metoda omogućava direktno upravljanje i momentom i fluksom preko histerezisnih komparatora, uz brži odziv

momenta nego kod jednosmernog pogona i pogona sa vektorskim upravljanjem. Za aplikacije umerenih zahteva za tačnošću brzine (tipično 0,1 % do 0,3 %), nije neophodan senzor na vratilu motora.

1. Pogon sa jednosmernim motorom:



2. Skalarno (U/f) upravljanje asinhronog motora:



3. Vektorsko upravljanje asinhronog motora:



4. Direktna kontrola momenta asinhronog motora:



Slika 1. Pregled razvoja upravljačkih algoritama u regulisanim elektromotornim pogonima

Metoda direktne kontrole momenta je uvedena 1985-1986. [1]–[3] i generalizovana za sve pogone sa naizmeničnim mašinama 1988. godine [4].

Godine 1995. ova upravljačka metoda je našla i industrijsku primenu [5], a danas se koristi u pogonima snaga od 2 kW do 2 MW, u osnovi implementirana na istoj upravljačkoj elektronici i korišćenjem istog softvera.

Za asinhronne pogone na srednjem naponu reda 4,5 kV snaga od 500 kVA do 6 000 kVA takođe postoje industrijska rešenja sa DTC metodom upravljanja [6]. U ovim pogonima se kao poluprovodnički prekidač koristi nova komponenta nazvana IGCT (od engl. Insulated Gate Commutated Thyristor) koja je nastala usavršavanjem GTO tiristora.

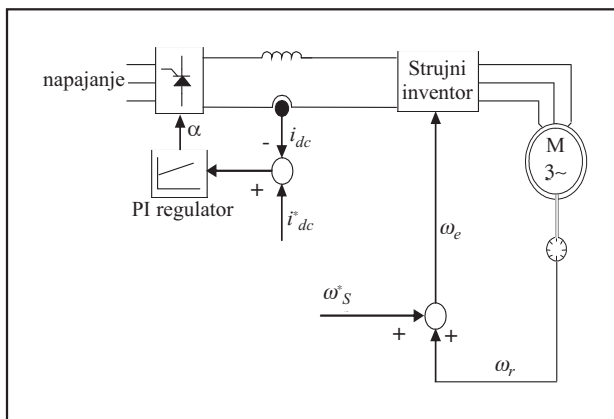
Takođe se može očekivati razvoj i primena u industrijskim uslovima DTC metode kod pogona sa velikim sinhronim motorima, gde se predlaže rešenje sa strujnim inverterom [7].

Za pogon sa asinhronim motorom napajanim iz strujnog invertora jedino rešenje predstavljeno u literaturi je ono koje su predložili autori ovog rada, a publikovano je na međunarodnim konferencijama i u međunarodnim časopisima [8]–[13].

2. UPRAVLJAČKE STRATEGIJE U POGONIMA SA STRUJNIM INVERTOROM

Za razliku od naponskog invertora, strujnim inverterom ne može da se upravlja u otvorenoj sprezi, već je minimalni upravljački sistem predstavljen ne-

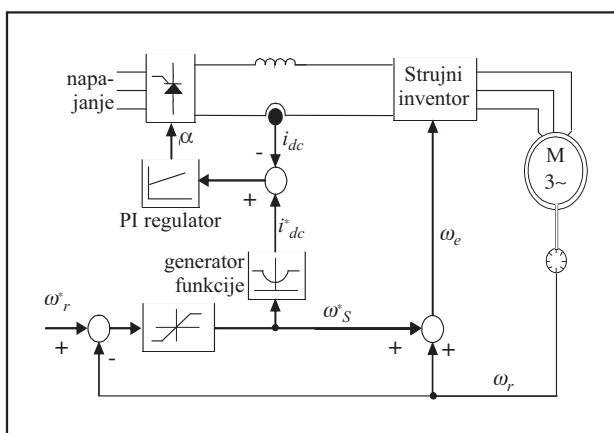
zavisnom regulacijom struje i klizanja (slika 2). Osnovni nedostatak je nepostojanje kontrole nad fluksom u zazoru, pa se retko koristi u praksi.



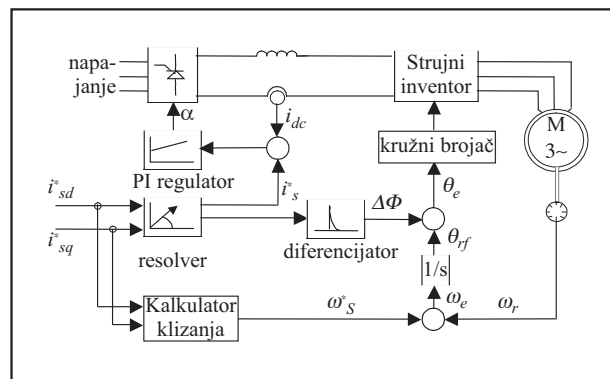
Slika 2. Osnovno upravljanje strujnim inverterom

Skalarno upravljanje sa konstantim fluksom se dobija kada se u prethodnoj šemi doda generator funkcije kojim se referentna struja generiše u zavisnosti od klizanja kako bi se održao konstantan fluks u zazoru (slika 3). Za upravljanje u otvorenoj sprezi se zadavanje frekvencije može vršiti iz naponskog regulatora čiji je ulaz merena vrednost napona motora [14].

Osnovna struktura sistema indirektnog vektorskog upravljanja pogonom sa strujnim inverterom je prikazana na slici 4. Referenca struje je raspregnuta u sinhronom $d-q$ sistemu koordinata, a klizanje se izračunava na osnovu referenci i parametara rotorskog kola. Problem upravljanja predstavlja spor odziv momenta (mada značajno brži od skalarnog) i greške u faznom stavu pri trenutnim promenama reference.



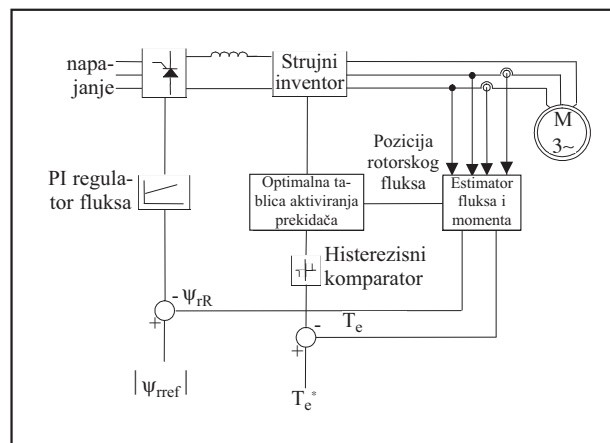
Slika 3. Skalarno upravljanje pogonom sa strujnim inverterom



Slika 4. Osnovna šema vektorskog upravljanja asinhronim pogonom sa strujnim inverterom

Iako je direktna kontrola momenta razvijena za naponske invertore, Peter Vas u svojoj knjizi [15] prikazuje i rešenje kod strujnog invertora. Ovde postoji samo histerezijsni komparator momenta, dok se fluksom rotora upravlja preko PI regulatora delovanjem na napon ulaznog pretvarača (slika 5).

Ovo je jedino pominjanje ove vrste upravljanja strujnim inverterom u literaturi, ali bez rezultata simulacije i eksperimentalne verifikacije. To je predmet istraživanja prikazanih u ovom radu.



Slika 5. Osnovni algoritam direktne kontrole momenta u asinhronom pogonu sa strujnim inverterom

3. ESTIMACIJA FLUKSA

Metoda direktne kontrole momenta podrazumeva poznavanje fluksa motora za potrebe upravljačkog algoritma. Iako je fluks moguće meriti primenom ugrađenih senzora u mašini, za praktične (industrijske) aplikacije to je neprihvatljivo, tako da se vrši estimacija fluksa koja predstavlja veoma važnu oblast istraživanja u elektromotornim pogonima.

Najjednostavniji način estimacije fluksa je integracija kontraelektromotorne sile dobijene merenjem napona i struje motora:

$$\Psi_s = \int (u_s - R_s \cdot i_s) dt \quad (1)$$

Za praktične primene je, bez dodatne adaptacije, neprihvatljiva zbog problema početnih uslova i pojave jednosmernog odstupanja [16].

Napredni način estimacije, zasnovan na Model Reference Adaptive Sistemima (MRAS), uvodi i rotorski model u estimator kako bi se greškom koja odgovara razlici statorskog i rotorskog modela kompenzovala odstupanja u estimiranoj vrednosti fluksa [17].

Estimatori zasnovani na observeru fluksa statora koriste kao povratnu spregu razliku između merenog izlaza observera i estimiranog izlaza i kontinualno koriguju model preko signala greške. Ovakav observer je značajno robusniji od estimatora u otvorenoj sprezi, a performanse su mu kao kod računski zahtevnijih rešenja poput proširenog Kalmanovog filtra [18].

Ukoliko se meri brzina motora moguće je primeniti estimator zasnovan na rotorskom modelu implementiranom u statorskim koordinatama [19]. Mogući problemi u radu su kako pri malim brzinama tako i pri većim brzinama kada je klizanje malo, što se reflektuje na grešku u faznom uglu struje magnećenja.

Estimator sa kompenzacijom ofseta indukovannog napona predlaže Holtz kao pogodno i robusno rešenje [20], naročito kod pogona kod kojih se upravlja fluksom u zatvorenoj sprezi poput direktne kontrole momenta. Pošto je ovaj estimator primenjen sa odgovarajućim prilagođenjima na pogon sa strujnim inverterom, o njemu će nešto kasnije biti više reči.

3.1. Rekonstrukcija struja i napona motora

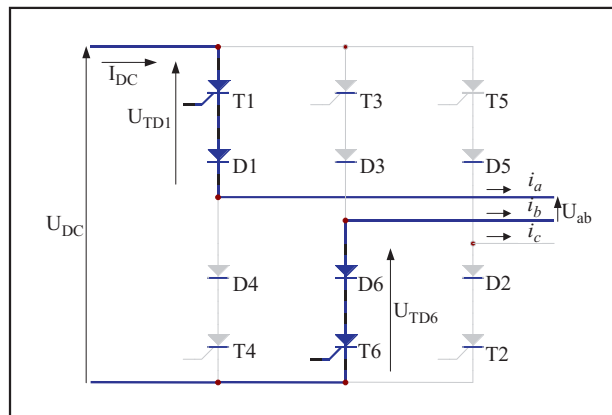
Za većinu estimatora fluksa ulazni signali su napon i struja motora, a kod strujnog invertora se mogu odrediti i na sledeći način [21]. Na slici 6. je prikazana pojednostavljena šema strujnog invertora, bez komutacionih kondenzatora. Pod pretpostavkom da su aktivni tiristori T_1 i T_6 , struja jednosmernog kola će teći kroz faze a i b, dok će u fazi c struja biti jednaka nuli:

$$i_a = I_{DC}, i_b = -I_{DC}, i_c = 0 \quad (2)$$

$$U_{ab} = U_{DC} - (U_{TD1} + U_{TD6}) \quad (3)$$

Napon između krajeva a i b je jednak naponu jednosmernog kola U_{DC} , umanjenom za padove napona na rednim vezama tiristor-dioda. Ovaj pad napona (označen sa U_{TD}) u trenutku kada su i tiristor i dioda provodni obično iznosi oko 2 V (forward vol-

tage, VF), a može se odrediti ili iz proizvođačke dokumentacije ili eksperimentalno.



Slika 6. Pojednostavljena šema strujnog invertora pri aktivnim tiristorima T_1 i T_6

S obzirom da u periodu napona strujni inverter ima 6 komutacija, jednostavno je izvršiti rekonstrukciju napona i struja, ako se poznaje trenutno stanje prekidača u inverteru. U [21] je detaljno za svaki interval izvedena rekonstruisana vrednost napona, a ovde će samo biti dat konačni zaključak u zavisnosti od toga da li je provodan posmatrani tiristor T_x , tiristor iz iste polovine mosta ili tiristor iz iste grane mosta:

1. $U_{TDx} = V_F$
2. $U_{TDx} = 0,5 \cdot U_{DC}$
3. $U_{TDx} = U_{DC} - V_F$

Prednost predložene metode leži u činjenici da se izbegava primena senzora za merenje struje i napona na motoru, a s druge strane se merene vrednosti jednosmernog međukola već koriste za regulaciju ulaznog ispravljača (struja) i funkcije zaštite (prekostrujna i prenaponska zaštita).

3.2. Određivanje otpornosti statora

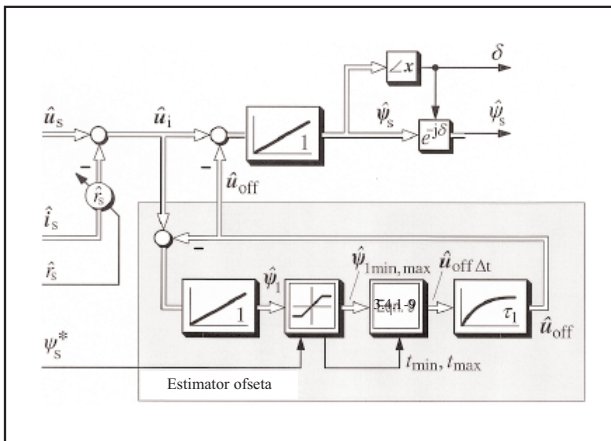
Prethodno izložena metoda može da se iskoristi i za određivanje otpornosti statora neposredno pre startovanja motora, ako se u stanju mirovanja aktiviraju dva tiristora, npr. T_1 i T_6 , kao na slici 6. Odatle je otpor statora jednak odnosu napona U_{ab} i struje kroz otpornik, odnosno u opštem slučaju,

$$R_s = \frac{U_{ab}}{k_s \cdot i_a} = \frac{U_{DC} - 2 \cdot V_F}{k_s \cdot I_{DC}} \quad (4)$$

gde je $k_s = 2$ za spregu zvezda kao na slici 6. ili $2/3$ za spregu trougao.

3.3. Estimator sa kompenzacijom ofseta indukovnog napona

U svom radu [20], u kojem je kritički poredio dotadašnje algoritme za estimaciju fluksa, Holtz je predložio rešenje estimatora kod kojeg se vrši estimacija ofseta u signalu indukovnog napona. Na osnovu relacije prostog integratora fluksa (1) se vidi da će čak i zanemarljive DC komponente u signalu napona i struje akumulirati značajan ofset u estimiranoj vrednosti vektora statorskog fluksa. Rešenje ovog problema leži u činjenici da se vektor ofseta uglavnom kreće u jednom smeru, dok izvedeni vektor cirkularne putanje rotira. Na sledećoj slici je prikazan blok dijagram estimatora ofseta indukovnog napona.



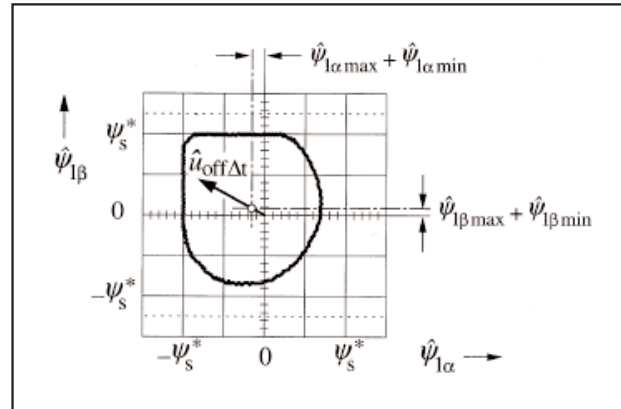
Slika 7. Tok signala pri estimaciji statorskog fluksa i ofseta indukovnog napona

Indukovani napon koji se računa na osnovu:

$$\hat{u}_i = \hat{u}_s - \hat{R}_s \cdot \hat{i}_s \quad (5)$$

predstavlja ulazni signal, gde su sa \hat{u}_s i \hat{i}_s označene rekonstruisane vrednosti napona i struje statora. Kako je prikazano na prethodnoj slici vektor \hat{u} , se integriše da bi se dobio vektor Ψ_1 . Komponente ovog vektora se zatim limitiraju na vrednost amplitude referentnog fluksa statora Ψ_s^* . U prisustvu DC ofseta trajektorija vektora fluksa Ψ_1 nije cirkularna (slika 8).

Pošto je pod dejstvom regulatora fluksa poluprečnik neizobličene trajektorije fluksa jednak Ψ_s^* , zaključuje se da će komponente ofseta težiti da pomeraju trajektoriju ka jednoj od granica jednakih $\pm \Psi_s^*$. Izgled ovako narušene trajektorije fluksa je prikazan na slici 8, gde se vidi da su pod uticajem ofseta srednje vrednosti komponenti fluksa Ψ_1 ($\Psi_{1\alpha}$ i $\Psi_{1\beta}$) različite od nule.



Slika 8. Trajektorija fluksa pri nekompensovanom ofsetu

Odatle, doprinos vektora ofseta napona \hat{u}_{off} može da se estimira na osnovu pomeraja trajektorije fluksa Ψ_1 kao:

$$\hat{u}_{off\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \cdot (\hat{\Psi}_{1min} + \hat{\Psi}_{1max}) \quad (6)$$

gde se minimalna i maksimalna vrednost odnose na komponente $\Psi_{1\alpha}$ i $\Psi_{1\beta}$, a Δt je vremenska razlika između dva prolaska kroz nulu vektora fluksa Ψ_1 koja definiše osnovnu periodu fluksa.

Usled nelinearnog izobličenja trajektorije vektora fluksa Ψ_1 , algoritam dat relacijom (6) je više aproksimacija pod uslovima prikazanim na slici 8. Radi poboljšanja, signal $\hat{u}_{off\Delta t}$ se filtrira niskopropusnim filtrom i vraća nazad na ulaz integratora da bi se poništila komponenta ofseta u signalu \hat{u}_i . Nakon toga, ulaz integratora teži ka nuli u kvazistacionarnom stanju, zbog čega vektor estimiranog napona \hat{u}_{off} postaje jednak postojećem ofsetu u signalu \hat{u}_i . Trajektorija vektora fluksa Ψ_1 postaje tačna kružnica u ovom slučaju, što garantuje precizno praćenje vektora ofseta napona. Pošto je drift ofseta uglavnom temperaturni efekat koji menja DC ofset veoma sporo, vreme odziva estimatora ofseta nije kritično.

Važno je istaći da dinamika estimacije fluksa statora ne zavisi od odziva estimatora ofseta, što je još jedan od razloga za prilagođenje ovog estimatora u predloženom pogonu sa strujnim invertorom.

3.4. Određivanje amplitude i pozicije vektora fluksa

Nakon što estimator odredi vektor fluksa, potrebno je izračunati njegovu amplitudu i ugao. Amplituda fluksa se određuje kao kvadratni koren zbira kvadrata komponenti fluksa u statorskom koordinatnom sistemu:

$$|\Psi| = \sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2} \quad (7)$$

dok se ugao određuje pomoću trigonometrijske funkcije arctan:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Psi_\beta}{\Psi_\alpha}\right) \quad (8)$$

Za praktične primene u mikrokontroleru obe funkcije su nepogodne zbog izuzetno dugog vremena potrebnog za izračunavanje, mnogo dužeg od periode upravljačkog algoritma. Zato je za određivanje amplitude primenjen algoritam zasnovan na linearnoj kombinaciji komponenti fluksa [22]:

$$|\Psi| \cong A \cdot \max(|\Psi_\alpha|, |\Psi_\beta|) + B \cdot \min(|\Psi_\alpha|, |\Psi_\beta|) \quad (9)$$

gde su A i B konstante koje se biraju tako da se smanji RMS greška, maksimalna greška ili složenost implementacije. U narednoj tabeli date su neke moguće vrednosti ovih konstanti.

Tabela 1.
Različite vrednosti koeficijenata A i B

	A	B	Srednja greška	RMS greška (dB)	Vršna greška (dB)
Min. R MS	0,947 543	0,392485	0,000 547	-32,6	-25,6
Min, Vršna	0,960 433	0,397824	-0,013 049	-31,4	-28,1
1, 1/2	1	0,5	-0,086 775	-20,7	-18,6
1, 1/4	1	0,25	0,006 456	-27,6	-18,7
1, 11/32	1	0,34375	-0,028 505	-28,0	-24,8
15/16, 15/32	0,937 5	0,46875	-0,018 851	-29,2	-24,1
31/32, 11/32	0,968 75	0,34375	-0,000 371	-31,6	-22,9
61/64, 3/8	0,953 125	0,375	0,002 043	-32,5	-24,3

Algoritam opisan relacijom (9) radi na sledeći način. Pomoću apsolutnih vrednosti kompleksni broj se svodi na opseg od 0 do 90 stepeni, a sa operacijama maksimuma i minimuma se dodatno svodi na opseg od 0 do 45 stepeni. Unutar ovako limitiranog opsega, linearna kombinacija Ψ_a i Ψ_b je veoma dobra aproksimacija amplitude fluksa [22]. Za primenu u 16-bitnom mikrokontroleru kod koga se izračunavanja vrše sa fiksnom zapetom, za konstante A i B su izabrane sledeće vrednosti:

$$A = 31/32 \text{ (0,968 75)} \quad (10)$$

$$B = 11/32 \text{ (0,343 75)} \quad (11)$$

pri čemu je srednja vrednost greške 0,037 1 %, RMS -31,6 dB, a vršna vrednost -22,9 dB. U [22] je eksperimentalno verifikovano trajanje predloženog algoritma na 16-bitnom mikrokontroleru pri taktu od 20 MHz od samo 6,7 μ s, dok iterativni postupak izračunavanja kvadratnog korena u zavisnosti od inicijalno pretpostavljene početne vrednosti traje od 24 μ s do 236 μ s.

Za određivanje pozicije vektora fluksa može se izbeći trigonometrijska funkcija data sa (8), s obzirom da nije potrebno znati njegovu tačnu poziciju, već samo u kom se sektoru veličine 60° nalazi. Jedno od jednostavnih rešenja za određivanje sektora u kome se nalazi vektor fluksa je korišćenje samo znaka komponenti fluksa u α i β osi [15]. Na primer, ukoliko se vektor fluksa nalazi u sektoru 1 očigledno je da će α komponenta biti pozitivna. S druge strane, β komponenta može biti i pozitivna i negativna (isto važi i za četvrti sektor), tako da je u tom slučaju pogodnije koristiti znak fluksa u osi β . Uz dodatno izračunavanje b komponente fluksa, navedena metoda nije pogodna i zbog gubitka tačne informacije na prelasku između 1. i 6. sektora, što može da dovede do neželjenih aktiviranja prekidača i samim tim pulsacija momenta.

Kod DSC metode opisane u [2], gde je broj promena stanja prekidača invertora u periodu smanjen na šest, potrebno je sa dovoljnom tačnošću odrediti trenutak kada vektor fluksa dostiže ugao pravilnog šestougla. Iz tih razloga je analizirana mogućnost da se razvije algoritam koji će osim jednostavne implementacije bez zahteva za većim procesorskim kapacitetima (brzina, količina memorije) dati dovoljnu preciznost potrebnu za primenu ne samo u DTC pogonima.

Kod DSP procesora ili mikrokontrolera kod kojih se izračunavanja vrše sa fiksnim zarezom, operacija deljenja u jednačini (8) može da da vrednost izvan opsega [-1,1). Da bi se ovo prevazišlo, predlaže se rešenje kod kojeg se ugao vektora fluksa određuje izračunavanjem faktora normalizacije u zavisnosti od kvadranta u kojem se nalazi vektor fluksa.

Na primer, ako se vektor fluksa nalazi u prvom kvadrantu, faktor normalizacije je određen sa:

$$r = \frac{\Psi_\alpha - \Psi_\beta}{\Psi_\alpha + \Psi_\beta} \quad (12)$$

a odgovarajući ugao sa:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4} - r \cdot \frac{\pi}{4} \quad (13)$$

Ukoliko se vektor fluksa nalazi u drugom kvadrantu, faktor normalizacije i ugao su dati sa:

$$r = \frac{\Psi_\alpha + \Psi_\beta}{\Psi_\beta - \Psi_\alpha} \quad (14)$$

$$\theta_2 = \frac{3\pi}{4} - r \cdot \frac{\pi}{4} \quad (15)$$

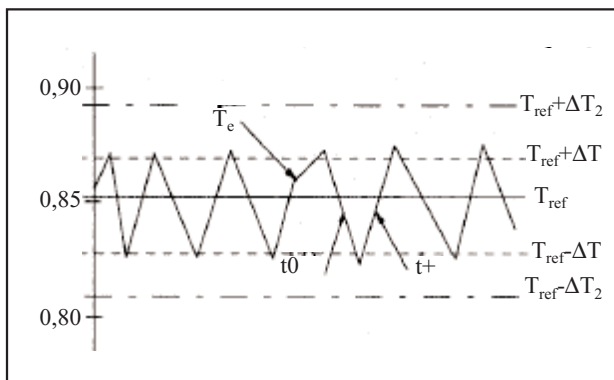
Kada je vektor fluksa u trećem ili četvrtom kvadrantu, ugao se izračunava negacijom rezultata dobijenih jednačinama (13) i (15), respektivno.

Tačnost navedenog algoritma je veoma zadovoljavajuća s obzirom da se koristi polinom prvog re-

da za estimaciju ugla, jer je maksimalna greška oko 0,07 radijana. S obzirom da je kod DTC pogona potrebno poznavati položaj ugla vektora fluksa u jednom od sektora veličine 60 stepeni odnosno 1,047 radijana, navedena tačnost je više nego dovoljna. Trajanje predložene funkcije kojom se izračunava pozicija vektora fluksa je oko 12 μ s, dok funkcija arctan data relacijom (8) na istom mikrokontroleru traje 2,78 ms [22], što nije prihvatljivo za primenu u navedenom DTC pogonu, s obzirom da je vreme odabiranja upravljačkog algoritma 303 μ s.

4. REGULACIJA MOMENTA

Kao što je rečeno u uvodu rada, osnovu DTC metode upravljanja čine histerezisni komparatori (regulatori) momenta i fluksa. Histerezisni komparator momenta ima zadatak da na osnovu razlike zadatog i estimiranog momenta da na izlazu jedno od tri moguća upravljačka stanja označena sa dT_e : povećanje momenta (1), smanjenje momenta (-1) i zadržavanje postojeće vrednosti (0). Na osnovu ove vrednosti i pozicije vektora fluksa iz odgovarajuće tablice se bira aktivni vektor napona (struje). Način rada histerezisnog regulatora se može objasniti pomoću slike 9 [5], na kojoj se vidi zašto je vrlo važno izabrati odgovarajuću širinu histerezisa.



Slika 9. Način rada histerezisnog regulatora momenta

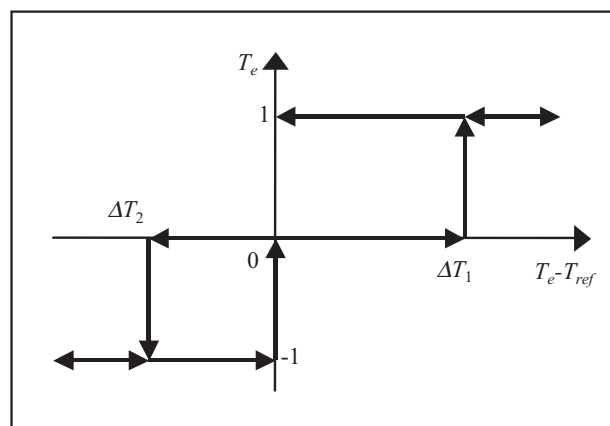
Oznaka t_0 na prethodnom dijagramu znači da nije potrebno promeniti vrednost momenta, jer se trenutna vrednost nalazi unutar zadatog opsega histerezisa tako da se bira nulti vektor. Trenutna vrednost momenta T_e nastavlja da opada (u motornom režimu) sve dok moment ne opadne ispod vrednosti $T_{ref} - \Delta T_1$. Nakon toga se bira odgovarajući aktivni vektor napona kako bi se povećao moment (oznaka t_+). Treba istaći da izvod momenta zavisi od prirode motora, učestanosti rotora i izabranog aktivnog vektora napona. Promena nagiba momenta pri porastu koja se može uočiti na prethodnoj slici potiče od uticaja regulatora fluksa na izbor vektora napona. Ako

se stvarna vrednost momenta razlikuje više od limita histerezisa ΔT_2 , takođe je dozvoljeno promeniti aktivni vektor napona u cilju smanjenja/povećanja momenta.

Jasno je da se, u slučaju strujnog invertora, kod koga su pulsacije momenta izraženije nego kod naponskog, širina histerezisa mora menjati u zavisnosti od brzine tako da raste sa brzinom obrtanja motora. Na taj način bi bilo izbegnuto pojavljivanje PWM talasnog oblika struje motora pri većim brzinama.

4.1. Adaptivni histerezisni regulator momenta

Pored podešavanja histerezisa momenta u zavisnosti od brzine, moguće je primeniti i modifikovani histerezisni komparator [9], kod kojeg se razlikuje širina pozitivnog i negativnog dela histerezisa (slika 10).



Slika 10. Modifikovani histerezisni komparator

Sa slike 9. se vidi da se priraštaj momenta razlikuje za pozitivne i negativne reference. Razlog je taj što je jači uticaj vektora napona koji smanjuju moment od onih čijim se izborom povećava moment, naročito pri većim brzinama. U tom slučaju je bolje izabrati veću vrednost za ΔT_1 nego za ΔT_2 , kako je prikazano na slici 10. Kod pogona predstavljenog u [9] izabrane su vrednosti od $\Delta T_1 = 0,1 \cdot T_{nom}$ and $\Delta T_2 = 0,06 \cdot T_{nom}$, gde je T_{nom} nominalna vrednost momenta.

4.2. Regulacija momenta sa konstantnom učestanošću invertora

Problem upravljanja direktnom kontrolom momenta korišćenjem standardnog histerezisnog komparatora je uočilo dosta autora, koji uglavnom ističu veliki ripl momenta koji se tom prilikom javlja. Rešenje problema pojedini autori nude u uvođenju većeg broja aktivnih vektora napona (12 ili čak i više), dok drugi predlažu korišćenje modulacije prostor-

nog vektora napona (SVM) [23]. U tim slučajevima se umesto histerezisnog komparatora momenta koristi *PI* regulator, čiji je izlaz ili referenca momenta na osnovu koje se određuje referentni statorski fluks ili sinhrona učestanost koja određuje direktno učestanost vektora statorskog fluksa. Ovde će biti prikazano rešenje koje kombinuje jednostavnost izbora aktivnog vektora na osnovu tablice izbora prekidača kao kod osnovnih DTC algoritama i rad invertora sa konstantnom učestanošću bez problema koje unosi histerezisni komparator.

Osnovna izmena standardnog rešenja datog u literaturi [15] je ta što je izlaz regulatora fluksa *d* komponenta struje u sinhronom rotacionom sistemu, a ne struja ili napon ispravljača. Ukupna referentna struja ispravljača se računa na osnovu komponentni struje u sinhronom rotacionom sistemu, tako što se prethodno *q* komponenta struje odredi na osnovu referenci momenta i fluksa rotora:

$$i_{sq}^* = \frac{2 \cdot L_r}{3 \cdot P \cdot L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|\Psi_r^*|} \quad (16)$$

pa se referentna struja ispravljača i odgovarajući ugao izračunavaju na osnovu:

$$i_{s_ref} = \sqrt{(i_{sd}^*)^2 + (i_{sq}^*)^2} \quad (17)$$

$$\Phi_s = \arctan(i_{sq}^* / i_{sd}^*) \quad (18)$$

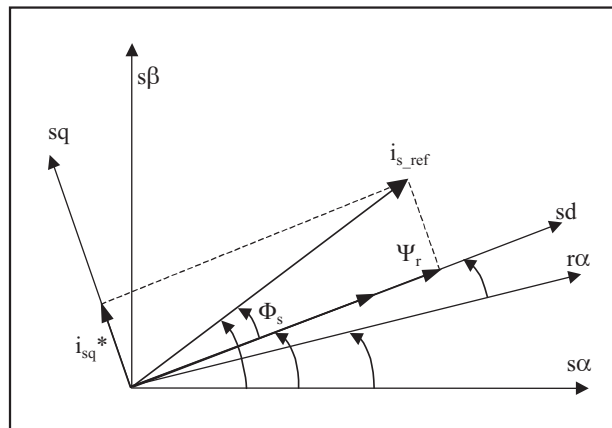
Ovako određena referenca struje ispravljača će uticati da se pri promeni reference momenta promeni i amplituda struje ispravljača, a samim tim i motora, poput vektorskog upravljanja istim pogonom opisanog u poglavlju 2.

Ukoliko se umesto ugla rotorskog fluksa u tablicu izbora aktivnog vektora struja uvede zbir ovog ugla i faznog stava između *d-q* komponenti datog relacijom (18), dobiće se redosled upravljačkih impulsa prekidača u invertoru kojim se postiže:

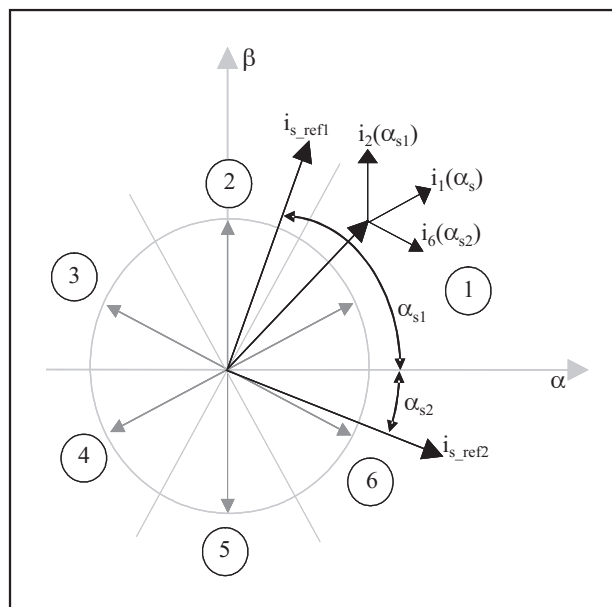
- brza i precizna promena faznog stava,
- motor se ravnomerno ubrzava/usporava bez riplova momenta koji su prouzrokovani izborom nultog vektora struje,
- izbegnuti su problemi koji su posledica rada histerezisnog komparatora,
- jednostavnija implementacija, jer se ne koristi obrtna transformacija.

Na ovaj način je, umesto izlaza histerezisnog komparatora, ugao Φ_s postao upravljačka promenljiva, tako što se promenom reference momenta direktno određuje *q* komponenta struje i odgovarajuća vrednost ugla Φ_s koja utiče na promenu aktivnog vektora struje. Na slici 11. je dat fazorski dijagram na kojem su prikazani referentni vektor struje statora

i vektor rotorskog fluksa, a na slici 12. je predstavljen način upravljanja predloženom DTC metodom.



Slika 11. Položaj vektora struje statora i rotorskog fluksa



Slika 12. Princip upravljanja pomoću nove DTC metode

Ukoliko se vektor fluksa rotora nalazi u prvom sektoru kako je prikazano na slici 12, u zavisnosti od zadate komande momenta referentna struja će imati odgovarajući fazni stav α_s , koji će uticati na to koji od vektora struje treba aktivirati: i_2 za povećanje momenta, i_6 za smanjenje momenta ili i_1 ukoliko ne treba menjati vrednost momenta.

Navedena modifikacija DTC algoritma podrazumeva i nešto drugačiju tablicu aktiviranja prekidača u odnosu na onu datu u [15], kako je prikazano u tabeli 2, gde je sa α_s označen ugao između α ose stacionarnog referentnog sistema i vektora referentne struje ispravljača. U tabeli su posebno naznačeni sektori 3 i 4, jer se opseg ugla razlikuje u odnosu na

standardnu tablicu izbora prekidača [15] da bi se izbegle nagle promene momenta pri promeni ugla fluksa sa $+180^\circ$ na -180° .

Na osnovu gore izloženog sada je moguće izvesti blok dijagram predložene upravljačke strategije zasnovane na direktnoj kontroli momenta (slika 13). Pri tome ugao Φ_s kao upravljačka promenljiva obezbeđuje brz odziv, dok PI regulator momenta koji na svom izlazu generiše potrebnu referencu T_e^* ima zadatak da obezbedi preciznost upravljanja momentom, s obzirom da regulator fluksa ne može da osigura da stvarni moment bude tačno jednak zadatom usled kolebanja parametara, grešaka merenja i efekata mrtvog vremena prekidača u inverteru.

Tabela 2.

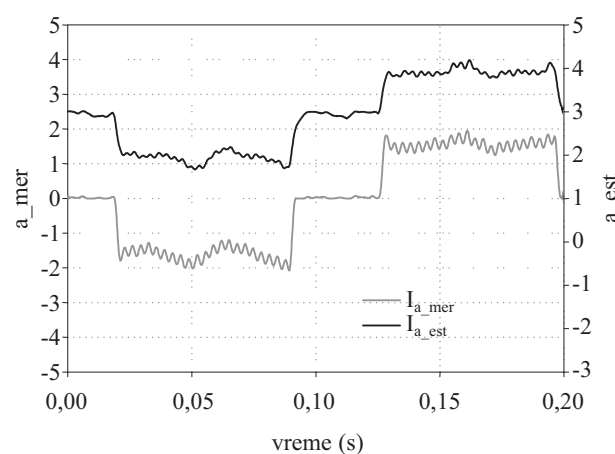
Optimalna tablica aktiviranja prekidača kod predložene DTC metode

i_{ref}	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6
α_s	α_{s1}	α_{s2}	α_{s3}	α_{s4}	α_{s5}	α_{s6}
$T_e^* > 0$	$>0^\circ$ i $\leq 60^\circ$	$>60^\circ$ i $\leq 120^\circ$	$>120^\circ$ i $\leq 180^\circ$	$>180^\circ$ ili $\leq -120^\circ$	$>-120^\circ$ i $\leq -60^\circ$	$>-60^\circ$ i $\leq 0^\circ$
$T_e^* < 0$	$>0^\circ$ i $\leq 60^\circ$	$>60^\circ$ i $\leq 120^\circ$	$>120^\circ$ ili $\leq 180^\circ$	$>-180^\circ$ i $\leq -120^\circ$	$>-120^\circ$ i $\leq -60^\circ$	$>-60^\circ$ i $\leq 0^\circ$

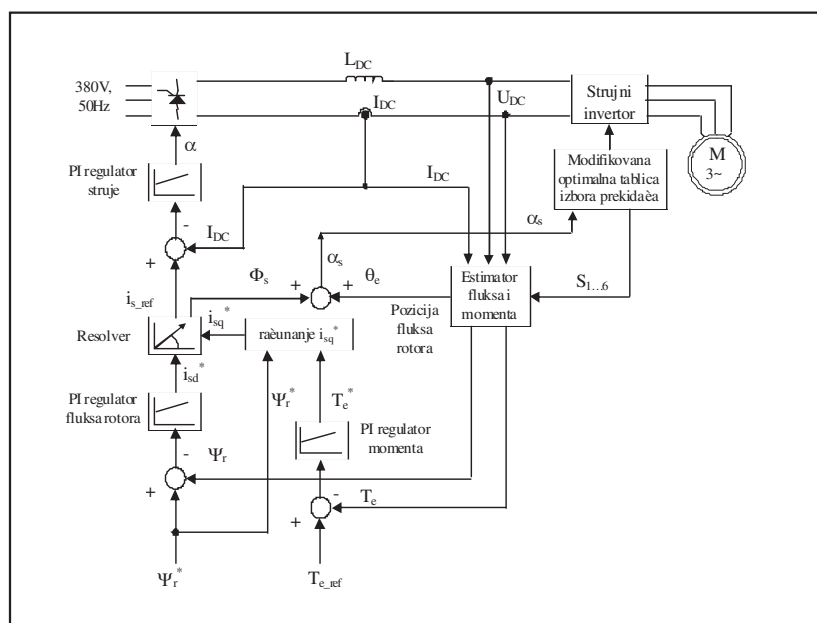
5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Da bi se analizirao predloženi algoritam razvijen je složeni matematički model sa ciljem da se što više približi realnom pogonu i samim tim ubrza proces implementacije. Korišćen je programski paket Matlab/Simulink i pri tome je energetska deo pogo-

na modelovan sa realnim modelima poluprovodnika i ostalih komponenti, uzimajući vrednosti sa postojećeg laboratorijskog prototipa. Svi blokovi u simulacionom programu koji čine upravljački DTC algoritam su realizovani u vidu funkcija napisanih u programskom jeziku C, upravo onako kako će biti implementirani u realnom mikroprocesorskom sistemu. Na ovaj način je pored skraćenog vremena implementacije vršeno i podešavanje pojedinih funkcija tokom same implementacije korišćenjem simulacionih modela. Rezultati dobijeni na osnovu simulacija su potvrdili ispravnost predloženog rešenja, pa se nakon toga pristupilo eksperimentalnoj verifikaciji. S obzirom na obimnost rezultata, u radu će biti prikazani samo eksperimentalni rezultati.



Slika 14. Merena i rekonstruisana fazna struja motora



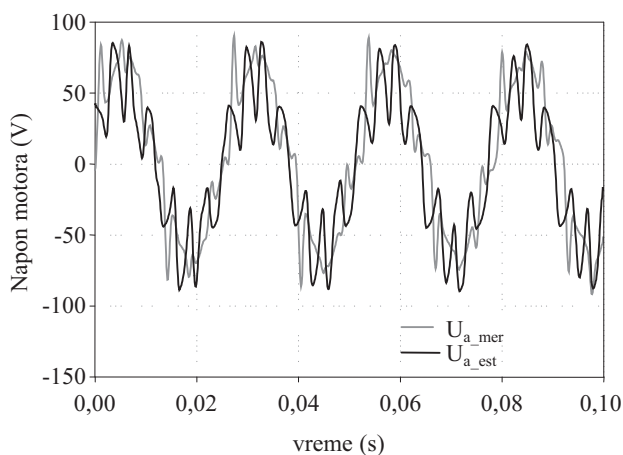
Slika 13. Nova upravljačka struktura DTC algoritma u asinhronom pogonu sa strujnim inverterom

Eksperimenti su izvršeni na razvijenom laboratorijskom prototipu u Laboratoriji za elektromorne pogone. Korišćen je asinhroni motor snage 4 kW, a kao opterećenje jednosmerna mašina snage 6 kW sa direktnim zadavanjem struje induktiva.

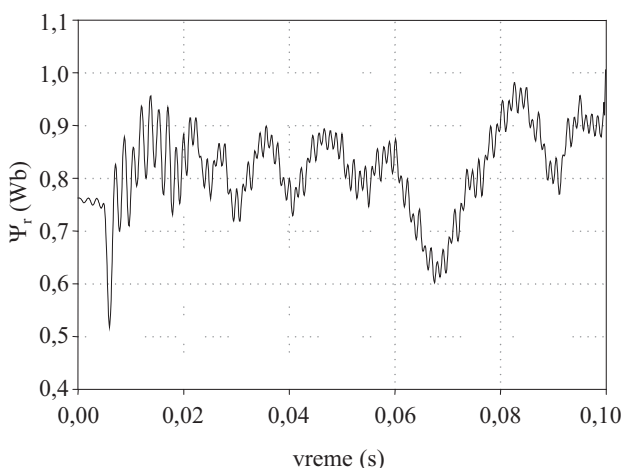
Upravljački algoritam je realizovan na mikrokontroleru Intel 196 KC na taktu od 20 MHz, a nadređeno upravljanje, zadavanje parametara i analiza estimiranih vrednosti je vršena na PC računaru u za te svrhe posebno razvijenoj Matlab aplikaciji komunikacijom preko serijske RS232 veze.

Ispravnost metode rekonstrukcije statorskih veličina samo na osnovu merenja u jednosmernom međukolu se vidi na osnovu rezultata merene i rekonstruisane struje

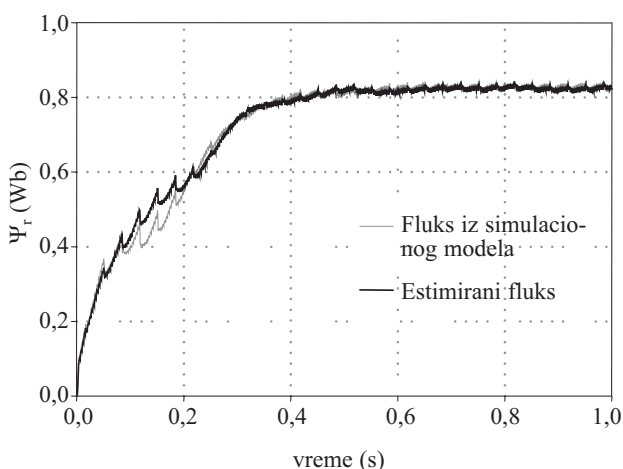
statora (slika 14), kao i merenog i rekonstruisanog međufaznog napona (slika 15).



Slika 15. Mereni i rekonstruisani međufazni napon motora

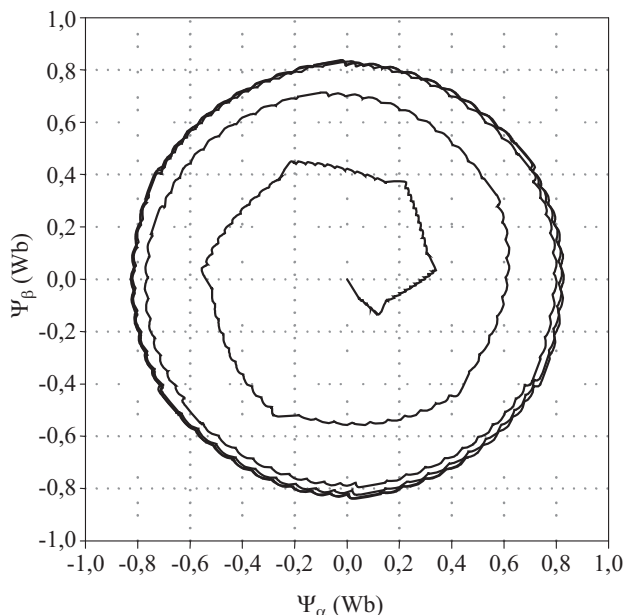


Slika 16. Fluks rotora dobijen primenom prostog integratora



Slika 17. Odziv fluksa rotora kod Holtcovog estimatora

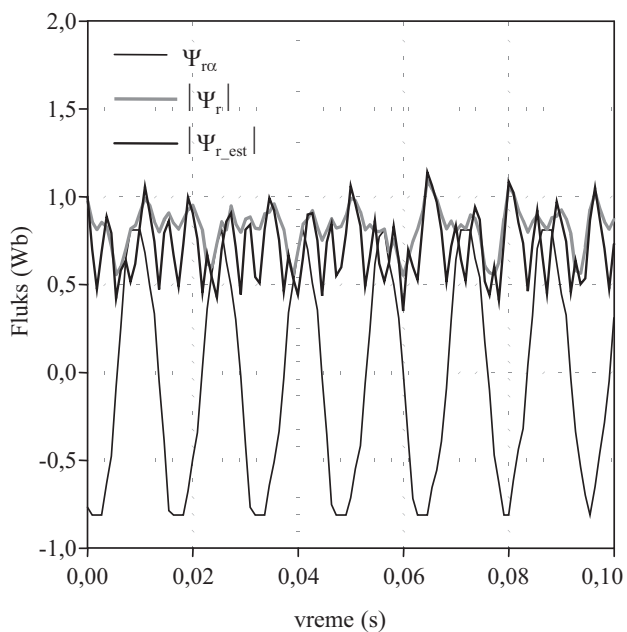
Problemi rada estimatora fluksa kada se koristi prost integrator se vide na sledećoj slici. Pri tome ni-



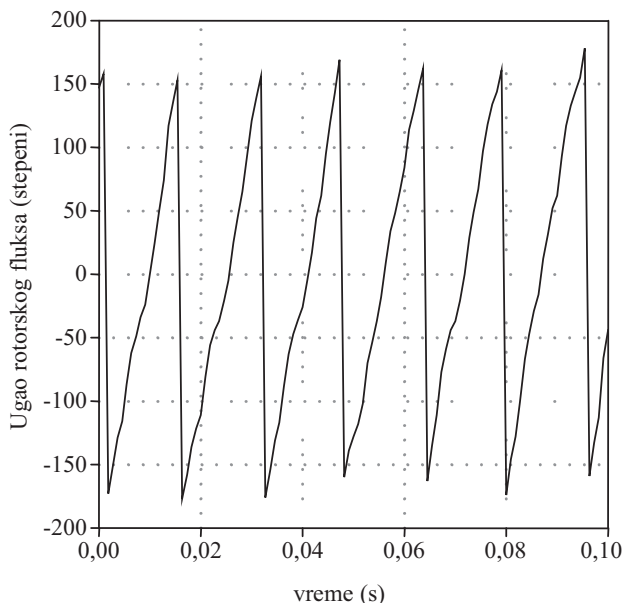
Slika 18. Putanja fluksa rotora kod Holtcovog estimatora

je zatvorena povratna sprega po fluksu, jer je očigledno da pogon ne bi mogao da radi stabilno.

Provera korektnog rada primenjenog estimatora fluksa je izvršena poređenjem odziva estimiranog fluksa sa rezultatom iz simulacionog modela (slika 17), kao i na osnovu trajektorije vektora fluksa (slika 18).



Slika 19. Određivanje amplitude vektora rotorskog fluksa



Slika 20. Određivanje pozicije vektora rotorskog fluksa

Amplituda i pozicija vektora rotorskog fluksa dobijenih primenom DSP algoritama o kojima je bilo reči u poglavlju 3.4 su prikazani na slikama 19 i 20, respektivno.

Rad kompletnog predloženog DTC algoritma je analiziran na osnovu odziva momenta i brzine pri različitim vrednostima referenci momenta u otvorenoj i zatvorenoj sprezi po brzini. Pri tome je pri zatvorenoj sprezi po brzini korišćena sledeća relacija za procenu brzine, s obzirom da pogon ne radi pri brzinama manjim od 150 ob/min:

$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{P} \cdot \left(\omega_e - R_r \cdot \frac{\hat{T}_e}{|\hat{\Psi}_r|^2} \right) \quad (19)$$

Vrednost momenta je na izlazu iz regulatora brzine limitirana tako da pri maksimalno zadatom momentu vrednost klizanja bude jednaka prevalnom klizanju, koje je pri strujnom upravljanju:

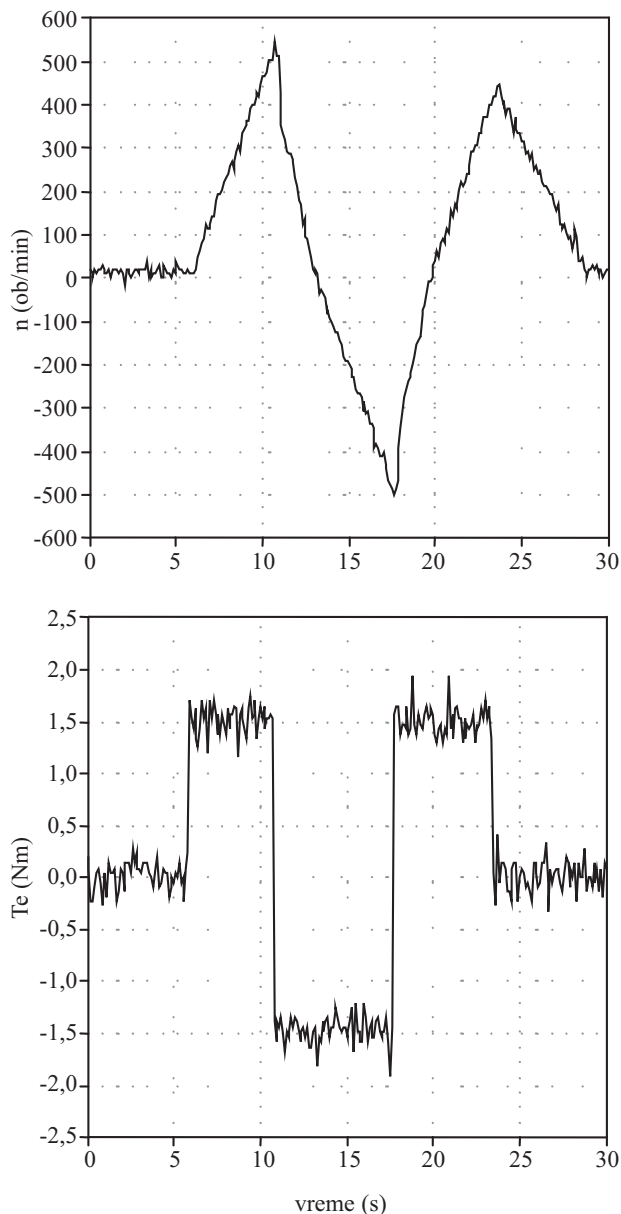
$$s_{pr} = \frac{1}{\omega_e \cdot T_r} \quad (20)$$

gde je ω_e sinhrona učestanost, a T_r vremenska konstanta rotora.

Na slici 21. je prikazan odziv brzine i momenta pri direktnom zadavanju momenta od $\pm 1,5$ Nm i isključenom regulatoru brzine.

Na slici 22. je prikazan odziv momenta pri zatvorenoj regulacionoj petlji po brzini, a može se uočiti da u oba slučaja (slike 21. i 22) pogon ima veoma brz odziv momenta uz korektno praćenje zadatih vrednosti.

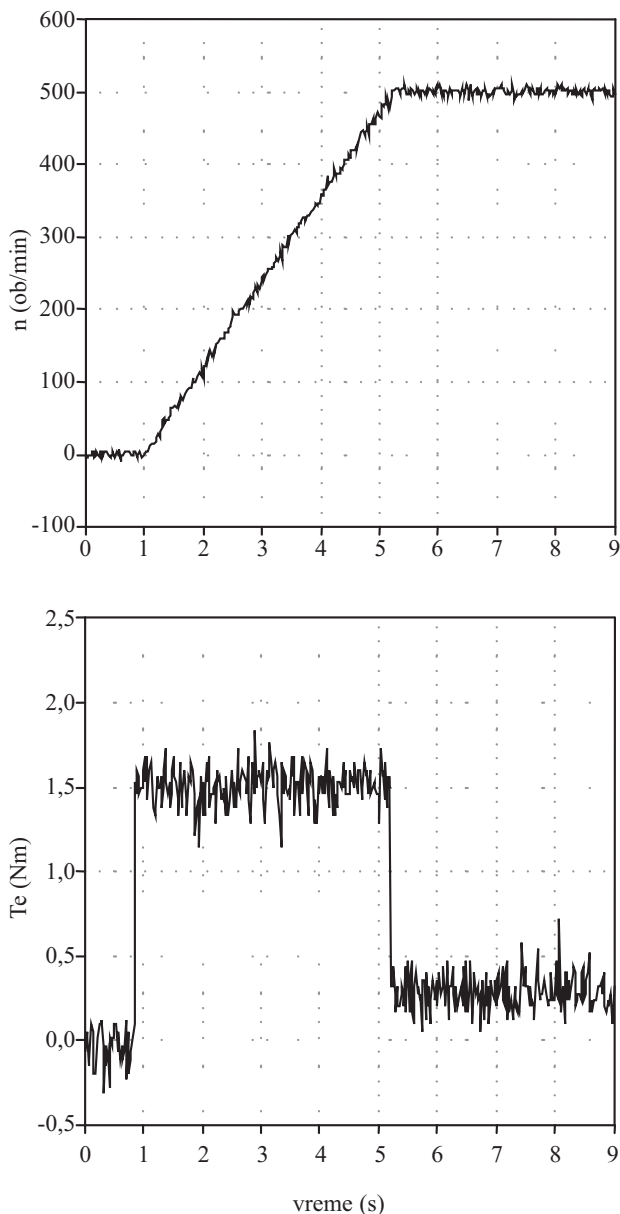
Jedna od značajnih prednosti pogona sa strujnim invertorom je mogućnost rekuperacije energije



Slika 21. Odziv brzine (gore) i momenta (dole) pri upravljanju bez regulatora brzine

u napojnu mrežu pri kočenju. Za potrebe ovog eksperimenta korišćena je jednosmerna mašina snage 6 kW upravljana regulacijom struje indukta pomoću trofaznog punoupravljivog ispravljača. Smer obrtanja jednosmerne mašine je izabran tako da bude saglasan sa pozitivnim smerom obrtanja asinhronog motora.

Nakon uspostavljanja referentnog fluksa u asinhronom motoru i zadavanja brzine obrtanja od 500 ob/min, u trenutku $t=9$ s uključen je pogon jednosmerne mašine sa tako podešenom strujom indukta pri kojoj moment asinhronne mašine menja znak, odnosno motor ulazi u režim kočenja kako bi se odr-



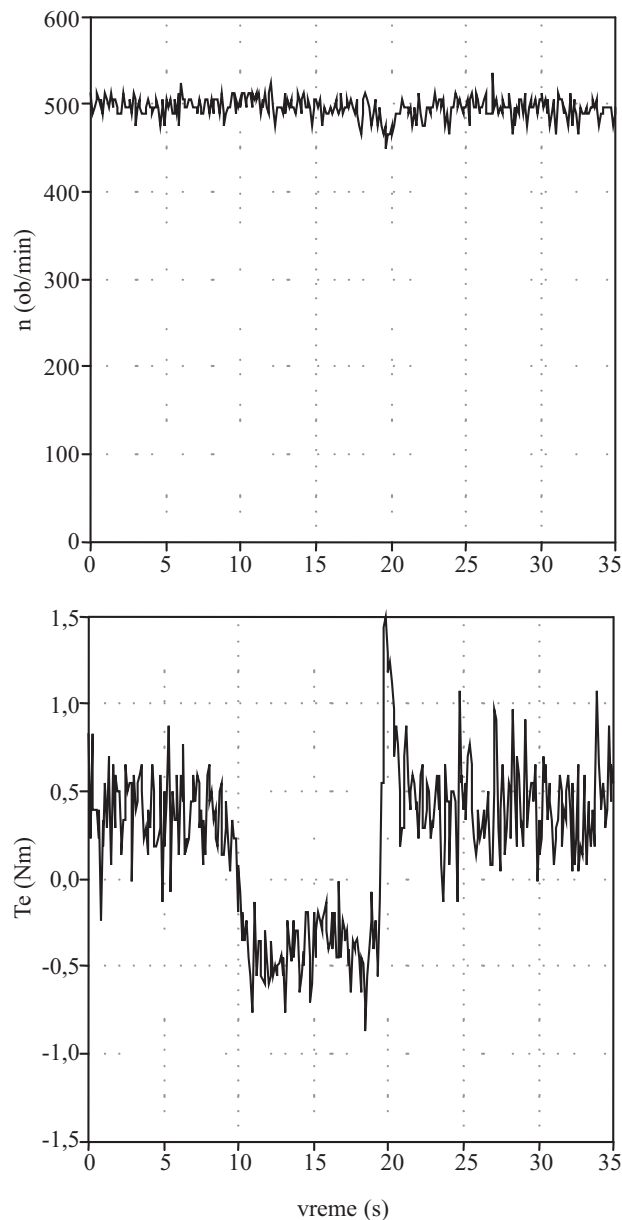
Slika 22. Odziv brzine (gore) i momenta (dole) pri upravljanju sa regulatorom brzine

žala zadata brzina od 500 ob/min. U trenutku $t=19$ s isključeno je opterećenje (tj. upravljanje jednosmernom mašinom) tako da je moment asinhronog motora ponovo pozitivan (slika 23).

Sa slike 23. se vidi da je pri opterećenju pogon zadržao trenutnu zadatu vrednost brzine obrtanja, kao i da se pri rasterećenju vrednost momenta uz brzu promenu vratila na prethodnu vrednost.

6. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljeno originalno rešenje upravljanja elektromotornim pogonom sa strujnim



Slika 23. Odziv brzine (gore) i momenta (dole) sa prelaskom u režim rekuperativnog kočenja pri promeni opterećenja

inverterom korišćenjem metode direktne kontrole momenta (DTC). Primena ove metode na pogon sa strujnim pretvaračem učestanosti predstavlja originalan doprinos u ovoj oblasti, s obzirom da u stručnoj literaturi nema radova osim onih koje su do sada publikovali autori ovog rada. Osim činjenice da je primenjeno DTC upravljanje u pogonu sa strujnim inverterom, u okviru upravljačkog algoritma je dato nekoliko rešenja kojima je dodatno unapređena upravljačka struktura kao i rad celokupnog pogona.

U cilju eliminacije senzora na motoru, primenjeno je rešenje sa rekonstrukcijom struja i napona

motora samo na osnovu merenja u jednosmernom međukolu poznavajući karakteristike strujnog invertora i primenjenih poluprovodnika (tiristora i dioda).

Detaljno je prikazan način estimacije fluksa sa kompenzacijom ofseta indukovano napona kao jedno od najpogodnijih rešenja za implementaciju u navedenom pogonu.

Za određivanje amplitude i pozicije vektora fluksa primenjeni su DSP algoritmi koji su jednostavni za implementaciju u mikroprocesorskom sistemu upravljanja, pri čemu je obezbeđena potrebna tačnost za primenu u ovim i sličnim DTC pogonima.

Umesto histerezisnih komparatora, predloženi DTC algoritam objedinjuje rad pretvarača sa konstantnom učestanošću uz upotrebu optimalne tablice izbora prekidača prilagođene novom načinu upravljanja.

Svi rezultati analitičkog projektovanja su provereni simulacijom na računaru, i potvrđeni eksperimentalno na razvijenom laboratorijskom prototipu. Postignuti rezultati ukazuju na izuzetno dobre performanse za pogon sa strujnim invertorom (odziv momenta je do 30 ms, pri čemu se 80 % vrednosti momenta uspostavi već za 10 ms).

7. LITERATURA

- [1] I. Takahashi, S. Asakawa, ULTRA-WIDE SPEED CONTROL STRATEGY OF AN INDUCTION MOTOR COVERED 106 RANGE, IEEE Trans. on Industry Applications, IA25, pp. 227-232, 1987.
- [2] M. Depenbrok, DIRECT SELF-CONTROL (DSC) OF INVERTER-FED INDUCTION MACHINE, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. PE-3, No. 4, pp. 420-429, Oct. 1988.
- [3] I. Takahashi, T. Noguchi, A NEW QUICK-RESPONSE AND HIGH-EFFICIENCY CONTROL STRATEGY OF AN INDUCTION MOTOR, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 22, No. 5, pp. 820-827, Sept/Oct 1986.
- [4] I. Boldea, S. A. Nasar, TORQUE VECTOR CONTROL. A CLASS OF FAST AND ROBUST TORQUE, SPEED AND POSITION DIGITAL CONTROLLERS FOR ELECTRIC DRIVES, Proceedings of EMPS Conference, Vol. 15, pp. 135-147, 1988.
- [5] P. Tiitinen, P. Pohkalainen, and J. Lalu, THE NEXT GENERATION MOTOR CONTROL METHOD: DIRECT TORQUE CONTROL (DTC), EPE Journal, Vol. 5, pp. 14-18, Mar. 1995.
- [6] Ph. Lataire, WHITE PAPER ON THE NEW ABB MEDIUM VOLTAGE DRIVE SYSTEM, USING IGBT POWER SEMICONDUCTORS AND DIRECT TORQUE CONTROL, EPE Journal, Vol. 7 – No 3/4, pp. 40-45, Dec. 1998.
- [7] I. Boldea, DIRECT TORQUE AND FLUX (DTFC) OF A. C. DRIVES: A REVIEW, Proceedings of the 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control – EPE-PEMC'2000, Vol. 1, Sept. 2000, pp. 88-97.
- [8] A. B. Nikolić, B. I. Jeftenić, DTC OF A CSI-FED INDUCTION MOTOR WITH DC LINK BASED ADAPTIVE ESTIMATOR, IEEE Industrial Electronics Conference IECON 2002, Session PE-35, Paper SF-003700, Sevilla, Spain, November 2002.
- [9] A. Nikolic, B. Jeftenic, SPEED SENSORLESS DIRECT TORQUE CONTROL IMPLEMENTATION IN A CURRENT SOURCE INVERTER FED INDUCTION MOTOR DRIVE, IEEE Power Electronics Specialist Conference PESC 2004, pp. 2843-2848, Aachen, Germany, July 2004.
- [10] A. Nikolic, B. Jeftenic, IMPROVEMENTS IN DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR SUPPLIED BY CSI, IEEE Industrial Electronics Conference IECON 2006, pp. 476-481, Paris, France, November 2006.
- [11] A. Nikolic, B. Jeftenic (invited paper), HYSTERESIS CONTROL AND CONSTANT-SWITCHING STRATEGY IN DIRECT TORQUE CONTROL DRIVE – A COMPARATIVE ANALYSIS, in Proceedings of the 12th WSEAS International Multi-Conference on Circuits, Systems, Computers and Communications, Crete Island, Greece, July 2008.
- [12] A. Nikolic, DIRECT TORQUE CONTROL STRATEGY BASED ON CONSTANT SWITCHING FREQUENCY APPLIED IN CURRENT SOURCE INVERTER FED INDUCTION MOTOR DRIVE, International Review of Electrical Engineering (IREE), Praise Worthy Prize, ISSN 1827-6660, Vol. 2, N. 6, pp. 827-834, November-December 2007.
- [13] A. Nikolic, B. Jeftenic, DIFFERENT METHODS FOR DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR FED FROM CURRENT SOURCE INVERTER, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, ISSN 1109-2734, Issue 7, Volume 7, pp. 738-748, July 2008.
- [14] Sever, MONOVERTER – TEHNIČKI OPIS SA PRINCIPOM REGULACIJE, Subotica, YU, 1986.
- [15] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford University Press, 1998.
- [16] J. Hu, B. Wu, NEW INTEGRATION ALGORITHMS FOR ESTIMATING MOTOR FLUX OVER A WIDE SPEED RANGE, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, No. 5, pp. 969-977, September 1998.

- [17] Cristian Lascu, Ion Boldea, Frede Blaabjerg, A MODIFIED DIRECT TORQUE CONTROL FOR INDUCTION MOTOR SENSORLESS DRIVE, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1, pp. 122-130, January/February 2000.
- [18] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, A PHYSICALLY INSIGHTFUL APPROACH TO THE DESIGN AND ACCURACY ASSESSMENT OF FLUX OBSERVERS FOR FIELD ORIENTED I. M. DRIVES, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, pp. 101-110, Jan. /Feb. 1994.
- [19] J. Rodriguez, J. Pontt, C. Silva, S. Kouro, and H. Miranda, A NOVEL DIRECT TORQUE CONTROL SCHEME FOR INDUCTION MACHINES WITH SPACE VECTOR MODULATION, IEEE Power Electronics Specialist Conference PESC 2004, pp. 1392-1397, Aachen, Germany, July 2004.
- [20] J. Holtz, J. Quan DRIFT – AND PARAMETER-COMPENSATED FLUX ESTIMATOR FOR PERSISTENT ZERO-STATOR-FREQUENCY OPERATION OF SENSORLESS-CONTROLLED INDUCTION MOTORS, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, July/August 2003.
- [21] A. Nikolić, B. Jeftenić, REKONSTRUKCIJA NAPONA I STRUJE ASINHRONOG MOTORA U POGONU SA STRUJNIM INVERTOROM, Zbornik radova sa XLV konferencije ETRAN, Arandjelovac, Jun 2001.
- [22] A. Nikolic, B. Jeftenic, FIXED-POINT DSP ALGORITHM FOR FLUX VECTOR ESTIMATION IN DTC IM DRIVE, in Proceedings of the IEEE Region 8 EUROCON Conference EUROCON 2005, Belgrade, Serbia & Montenegro, November 21-24 2005.
- [23] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri and F. Profumo, PERFORMANCE ANALYSIS OF A SPEED-SENSORLESS INDUCTION MOTOR DRIVE BASED ON A CONSTANT-SWITCHING-FREQUENCY DTC SCHEME, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 2, March/April 2003.

Rad je primljen u uredništvo 18. 05. 2009. godine



Aleksandar B. Nikolić je rođen 1966. godine u Beogradu. Diplomirao je 1991, magistrirao 1999. i doktorirao 2009. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. U periodu od 1992. do 2005. godine radio je u Fabrici hartije Beograd, Energoprojekt ENTEL-u i IBL Duga Holding, a od 2005. je na mestu savetnika u Centru elektromerjenja u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Beogradu. Od 1995. godine je spoljni saradnik Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Katedre za energetske pretvarače i pogone, a 2001. godine je na istoj katedri izabran u zvanje honorarnog asistenta za predmet regulacija elektromotornih pogona.

U 2006. godini je od strane IEEE izabran u zvanje Senior Member.

Do sada je objavio više od 50 naučnih i stručnih radova, a takođe je i redovni recenzent nekoliko međunarodnih konferencija iz oblasti energetske elektronike i elektromotornih pogona i dva međunarodna časopisa.



Borislav I. Jeftenić je rođen 1948. godine u Beogradu. Diplomirao je 1972. godine, magistrirao 1977. i doktorirao 1987. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Od 1974. godine je zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, gde predaje na diplomskim i postdiplomskim studijama iz oblasti elektromotornih pogona i upravljanja pogonima. Osnovao je i vodi Laboratoriju za elektromotorne pogone pri Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Autor je i koautor mnogobrojnih domaćih i međunarodnih naučnih i stručnih radova. Rukovodilac je mnogobrojnih projekata iz oblasti elektromotornih pogona u oblasti rudarstva, papirne industrije, energetske efikasnosti, oblasti proizvodnje električne energije i mnogih drugih oblasti.

Metodološki i praktični aspekti izbora odnosa kratkog spoja i sinhronih reaktansi generatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3

Stručni rad
UDK: 621.3.011.2; 621.313.322

Rezime:

U radu se izlažu relevantni metodološki i praktični aspekti izbora najpovoljnijih vrednosti odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronih reaktansi generatora. Predmet pažnje su nove termoelektrane Kolubara B i Nikola Tesla B3. Taj izbor je baziran na rezultatima sprovedenih analiza statičke stabilnosti elektroenergetskog sistema Srbije, u njegovom širokom okruženju, za očekivana maksimalna i minimalna stanja 2015, 2020. i 2025. godine. Pri tome, modelovana je realna elektroenergetska interkonekcija, koju sačinjavaju pored elektroenergetskog sistema Srbije, elektroenergetski sistemi Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije.

Ključne reči: izbor, odnos kratkog spoja, sinhrona reaktanse, generator, statička stabilnost

Abstract:

**THE CHOICE OF SHORT CIRCUIT RATIO AND SYNCHRONOUS REACTANCES
OF GENERATORS IN TPP KOLUBARA B AND TPP NIKOLA TESLA B3**

This paper presents the relevant methodological and practical aspects of choosing the best values of generator short circuit ratio and synchronous reactances. New thermo power plants Kolubara B and Nikola Tesla B3 are observed. This choice is based on results of steady-state stability analyses of Serbian EPS, in own wide environment, for expected peak-load and low-load conditions in years 2015, 2020. and 2025. Those analyses have been established on the model of real interconnection, which consists of the EPSs of Serbia, Montenegro, Bosnia and Herzegovina, Hungary, Croatia, Macedonia, Romania, Bulgaria, Greece and Albania.

Key words: choice, short circuit ratio, synchronous reactances, generator, steady-state stability

1. UVOD

Generalno gledano, dobrim izborom osnovnih parametara novih generatora, odnosno agregata i njihovih blok-transformatora, postiže se najracional-

niji rad proizvodnog bloka. Takvim izborom, u interaktivnoj sprezi sa elektroenergetskim sistemom (EES) na koji se priključuje, postiže se maksimalno, odnosno, racionalno iskorišćenje njegovih performansi. Kod izbora parametara sinhronih generatora,

uz uvažavanje ekonomskih kriterijuma, neophodno je da se postigne razumni kompromis između cene njihovih konstrukcija, pogonskih troškova i kvaliteta plasirane električne energije u EES, odnosno neophodno je da se uvažavaju i zahtevi koje neminovno nameće EES (tzv. sistemski zahtevi).

Poznato je da su prisutni ekonomski i tehničko-tehnološki faktori uslovlili porast jediničnih snaga generatora, a time su, po pravilu, doveli i do pogoršanja (sa aspekta zahteva EES-a) određenih parametara generatora. To je u prvom redu vezano za turbo-generatore, čiji gabarit nije bio srazmerno praćen sa povećanjem njihove snage. A koji su to relevantni parametri generatora, odnosno agregata i njihovih blok-transformatora?

To su najpre vrednost nominalnog faktora snage generatora i parametri i karakteristike njegovog blok-transformatora. Zatim, to su vrednosti odnosa kratkog spoja (K_c) i sinhronih reaktansi u podužnoj osi (x_d) generatora. To su veličine koje u najvećoj meri utiču na iznos rezerve statičke stabilnosti. S druge strane, K_c (odnosno x_d) je parametar koji bitno utiče na karakteristike i gabarit sinhronne mašine, odnosno neposredno utiče na pogonske uslove rada generatora, kao i na njegovu veličinu i cenu.

Pomenuti odnos kratkog spoja (K_c), uz tranzijentnu reaktansu u podužnoj osi generatora (x'_d), vremensku konstantu inercije agregata (T_i) i karakteristike pobudnog sistema i njegove regulacije, u svojoj povezanosti, sa različitim pojedinačnim uticajem, u najvećoj meri definišu dinamičko ponašanje agregata u okviru kratkotrajnih dinamičkih procesa EES-a. Veličina tranzijentne reaktanse (x'_d), kao i odnosa kratkog spoja (K_c), takođe utiče na cenu generatora. Na primer, ako bi razlozi obezbeđenja stabilnosti zahtevali smanjenje vrednosti tranzijentne reaktanse, to bi za sobom povlačilo smanjivanje elektromagnetnog iskorišćenja materijala, što bi nužno dovelo do povećanja odgovarajućih dimenzija generatora, a time i njegove cene.

Prethodno pomenuti parametri spadaju u dominantnu grupu parametara generatora, odnosno agregata, za koje se vezuju različiti zahtevi EES-a u statičkom i dinamičkom smislu. Ostali parametri generatora (na primer, subtranzijentne, nulte i inverzne reaktanse i niz vremenskih konstanti) nemaju takav dominantan značaj (tzv. sistemski). Po pravilu, u dosadašnjoj praksi operisalo se sa njihovim tzv. „prirodnim vrednostima”, odnosno utvrđivali su se efekti tih vrednosti, u kontekstu analiza različitih vrsta prelaznih stanja sinhronih mašina, odnosno EES-a u kome se one nalaze.

Ova problematika izbora je od posebnog praktičnog značaja za planirane nove termoagregate u TE Kolubara B (2x350 MW) i TE Nikola Tesla B3

(750 MW), imajući u vidu veličine njihovih snaga i mesta priključenja na EES Srbije, odnosno njihov veliki uticaj na efikasno i stabilno funkcionisanje EES-a Srbije. U tom cilju je urađena Studija [1]. Njen osnovni cilj je bio da izvrši široke analize karakterističnih statičkih stanja i da izvrši proveru statičke i tranzijentne stabilnosti rada novih agregata u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, sa uobičajenim vrednostima relevantnih parametara. Zatim, na osnovu analize dobijenih rezultata, cilj je bio da se definišu zadovoljavajući opsezi svih relevantnih parametara razmatranih turboagregata i da se definišu poželjne karakteristike njihovih blok-transformatora. Dobijeni rezultati će neposredno da posluže kod izrade tendera za izbor i ugovaranje novih agregata u razmatranim novim TE.

Predmet ovog rada vezan je samo za izbor najpovoljnijih vrednosti odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronih reaktansi pomenutih novih turbogeneratora. Problematika izbora nominalnog faktora snage generatora i karakteristika blok-transformatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 tretirana je u [1, 2], a problematika izbora vremenske konstante inercije, tranzijentnih reaktansi i pobudnog sistema agregata u ovim novim TE, u radovima [1, 3].

U ovom radu najpre se daju definicije i objašnjenja prirode veličina odnosa kratkog spoja i sinhronih reaktansi generatora. Zatim se daju metodološki i praktični aspekti izbora najpovoljnijih vrednosti za ove važne parametre, vezani za analize statičke stabilnosti. Rezultati sprovedenih obimnih analiza statičke stabilnosti EES-a Srbije, u njegovom širokom okruženju, uz obuhvatanje maksimalnih i minimalnih stanja, koja se očekuju 2015, 2020. i 2025. godine, dali su dobru osnovu za izbor najpovoljnijih vrednosti odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronih reaktansi razmatranih novih turbogeneratora.

2. DEFINICIJE ODNOSA KRATKOG SPOJA I SINHRONIH REAKTANSI GENERATORA

Jedan od osnovnih parametara sinhronne mašine je odnos kratkog spoja (K_s). Taj važan parametar se određuje iz karakteristika (ogleda) praznog hoda i kratkog spoja sinhronne mašine, odnosno generatora. On predstavlja odnos pobudne struje generatora, koja odgovara nominalnom naponu generatora u praznom hodu i pobudne struje koja odgovara nominalnoj struji pri kratkom spoju.

Drugi važan parametar je sinhrona reaktansa u podužnoj (direktnoj) osi x_d . Određuje se, pored ostalog, takođe iz karakteristika (ogleda) praznog hoda i kratkog spoja generatora. Ta reaktansa predstavlja odnos napona praznog hoda, sa pravolinijske (line-

arne) karakteristike praznog hoda i struje sa karakteristike kratkog spoja, za istu vrednost pobudne struje. To je njena nezasićena vrednost. Produžetak pravolinijskog dela karakteristike praznog hoda predstavlja magnetnu karakteristiku međugvožđa generatora.

Međutim, stvarna karakteristika praznog hoda nije linearna, kao posledica prisutnog zasićenja magnetnog kola. Permeabilitet magnetnog kola nije konstantna veličina, jer se menja sa promenom magnetnopobudne sile (*m_{ps}*). Smanjuje se sa porastom *m_{ps}*, tako da magnetna indukcija, odnosno elektromotorna sila (*e_{ms}*) koja je njoj proporcionalna, raste sporije od struje pobude. To je poznati fenomen zasićenja, koji unosi nelinearnost u odnosima između pojedinih međusobno zavisnih veličina. Permeabilitet, dakle i zasićenje magnetnog kola, generalno gledano, zavise od rezultatne *m_{ps}*, odnosno indukcije rotora i statora i od njihovog međusobnog položaja, odnosno od radnog faktora snage generatora.

Inverzna vrednost odnosa kratkog spoja $1/K_s$ i sinhrona reaktanse u podužnoj osi (nezasićena x_d i zasićena x_{dz} vrednost) imaju sledeći odnos:

$$1/K_s = x_d / k = x_{dz},$$

gde je k – faktor zasićenja.

Vrlo je važno da se napomene da odnos kratkog spoja, odnosno sinhrona reaktansa po podužnoj osi neposredno utiče na pogonske karakteristike i gabarit sinhrona mašine. U prvom redu to se odnosi na rezervu stabilnosti (statičke), kao i uticaj na elektromagnetne i fizičke parametre generatora. Odnosno, pri zadatim gabaritima, veća vrednost K_s odgovara većem zazoru (manjoj vrednosti sinhrona reaktanse), što dovodi do povećanja *m_{ps}* rotora. To, sa tehnološko-konstrukcionog aspekta može da predstavlja problem. Sa povećanjem K_s smanjuje se snaga mašine za isti gabarit, i obratno, što neposredno utiče na cenu generatora. Dalje, veličina trajne struje kratkog spoja generatora je direktno proporcionalna K_s . Takva proporcionalnost postoji i za sposobnost apsorbovanja reaktivne snage generatora iz EES-a.

Na taj način, veličina odnosa kratkog spoja je od neposrednog uticaja na pogonske performanse generatora, kao i na njegovu veličinu i cenu. Manja vrednost K_s , za istu snagu, znači da je generator manjeg gabarita i niže cene, ali se zahteva veća promena pobudne struje za održavanje zadate vrednosti napona na krajevima generatora, pri promeni njegovog opterećenja. To eksplicira zahteve za pobudnim sistemima i njihovoj regulaciji, u smislu većih promena pobudne struje, uz odgovarajuću brzinu i pouzdanost. Stoga, razvoj savremenih pobudnih sistema

i sistema njihove regulacije omogućava da se savremeni generatori izrađuju sa nižim vrednostima K_s , odnosno omogućena je izgradnja generatora većih snaga uz niže jedinične cene.

U tehničko-tehnološkom smislu, kako je to već istaknuto, porast vrednosti reaktansi generatora pogoršava uslove rada generatora. Drugim rečima, sa ovog aspekta je poželjno da vrednosti reaktansi generatora budu što manje (izuzetak od toga zahteva je subtranzijentna reaktansa). Međutim, u tom je smislu neophodno sagledavanje i druge strane problema, a to su zahtevi ekonomike i tehnologije gradnje generatora.

3. METODOLOŠKI ASPEKTI IZBORA ODNOSA KRATKOG SPOJA I SINHRONIH REAKTANSI GENERATORA

3. 1. Uvodne napomene

U prethodnom tekstu uveden je pojam „prirodna vrednost” parametara. Pod tim pojmom smatra se ona vrednost parametra koja se dobija optimalnim dimenzionisanjem generatora, odnosno agregata, u električnom i mehaničkom pogledu, za zadatu prividnu snagu i učestanost (za hidrogeneratore, i za dati pad i dozvoljenu brzinu pobega). Ove vrednosti mogu da se razlikuju, zavisno od načina i prilaza tzv. optimalnoj konstrukciji od strane proizvođača generatora. Međutim, u odgovarajućim standardima ne postoji termin „prirodna vrednost”, pa je pogodnija formulacija da su to „tipične vrednosti”, ili „konstrukcione vrednosti”, odnosno vrednosti koje daje konstruktor generatora. U dosadašnjoj studijskoj praksi, po pravilu, utvrđivalo se da li su te prirodne (tipične) vrednosti (odnosno njihov mogući opseg) zadovoljavajuće sa aspekata različitih zahteva EES-a (u statičkom i dinamičkom pogledu). Ako se utvrdi da te prirodne vrednosti zadovoljavaju ove zahteve, onda su to praktično i najpovoljnija rešenja (izbegavajući termin – optimalna rešenja).

Kada su u pitanju eksploatacioni aspekti izbora odnosa kratkog spoja, oni se prvenstveno vezuju za statičku stabilnost. Naime, odnos kratkog spoja neposredno utiče na pogonske karakteristike sinhrona mašine. Ujedno, veličina odnosa kratkog spoja utiče i na elektromagnetne i fizičke parametre sinhrona mašine, odnosno na njen gabarit.

Na taj način, nezaobilazne su analize statičke stabilnosti, koje se vrše prvenstveno u cilju utvrđivanja povoljnog opsega vrednosti odnosa kratkog spoja (K_s), odnosno sinhronih reaktansi u podužnoj osi (x_d) razmatranih turbogeneratora, jer su to veličine koje u najvećoj meri utiču na iznos rezerve statičke stabilnosti. Uticaj veličine odnosa kratkog spoja

razmatra se u interaktivnoj sprezi sa uticajem zamajnog momenata agregata, odnosno njegove vremenske konstante inercije, vremenske konstante pobudnog kola pri otvorenom statorskom namotaju, kao i sa uticajem parametara pobudnog sistema razmatranih turbogeneratora.

Takođe, kod ovog izbora poželjno je da se uključe i ekonomski aspekti. U tom cilju, bilo bi neophodno da se raspolaze sa pouzdanom informacijom o uticaju ovog izbora na cenu generatora. Nažalost, do takvih podataka (zavisnost cene generatora od vrednosti odnosa kratkog spoja), uz niz pokušaja, nije bilo moguće da se dođe, jer niko od potencijalnih isporučioaca iz razumljivih razloga to neće da daje, da ne bi ugrozio svoju poziciju u tenderskom nadmetanju. Međutim, kako će to biti pokazano u narednom tekstu, nedostatak ovih podataka ne ugrožava donošenje, u datim uslovima, najracionalnijih rešenja.

3. 2. Metodološki i praktični aspekti analiza statičke stabilnosti

Uobičajeni, odnosno i danas prisutni prilazi analizi statičke stabilnosti, bazirani su na linearizaciji aktuelnih sistema diferencijalnih jednačina, koja se opravdava malim poremećajima, čiji se efekti analiziraju. Koristeći se koncepcijom prostora stanja, formiraju se odgovarajuće matrice stanja saglasno stepenu modelovanja relevantnih komponenti EES-a i određuju se njihove sopstvene vrednosti i sopstveni vektori.

Za razliku od prethodno pomenutih, uobičajenih prilaza analizi statičke stabilnosti u Institutu „Nikola Tesla” razvijen je drukčiji prilaz. U tom prilazu, uz uvažavanje svih bitnih nelinearnosti koje su svojstvene EES-u, omogućeno je praćenje stanja na svim njegovim elementima tokom odvijanja prelaznog procesa, u dovoljno dugom vremenskom periodu (do 30 s) nakon nastanka „malog regularnog poremećaja” (na primer, simultana promena ukupne aktivne i reaktivne potrošnje za nekoliko procenata). Dakle, takav prilaz je u potpunosti respektovao paragraf 3.3.3.6.4. aktuelnih Pravila o radu prenosnog sistema Elektromreže Srbije [4], koji glasi:

„Prilikom analize statičke stabilnosti (stabilnost malih poremećaja) koriste se odgovarajući modeli pri proračunima (mogu se koristiti i linearizovani, ali se ne preporučuju). Ova analiza usredsređuje se na ispitivanje stabilnosti prilikom pojave nihanja rotora generatora i pojave oscilacije tokova aktivne snage u mreži (ispituju se karakteristike primarnih i regulatora pobude)”

U ovom prilazu, uz tretiranje individualne dinamike svake od sinhronih mašina, odnosno uz određivanje njihovih sopstvenih učestanosti, prati se i

kretanje „centra inercije” kompletnog EES-a, u dovoljno dugom vremenskom periodu (do 20 s), koje je indikativno za sagledavanje globalnih efekata. Takođe, prate se i stanja na odabranim elementima tokom odvijanja prelaznog elektromehaničkog procesa (određivanje aktivnih i reaktivnih snaga, struja i fazora napona), čime se dobija detaljni uvid u sam tok odvijanja „odziva” EES-a na pojavu „malog regularnog poremećaja”. Naravno, ne bi trebalo da se posebno naglašava koliko je ovakav prilaz efikasniji od uobičajenih (a koji su bazirani na linearizaciji).

Takav prilaz je zahtevao modelovanje kompletne električne mreže EES-a i svih njegovih komponenti, koje su od uticaja na dinamičko ponašanje, uključujući odgovarajuće regulacione i zaštitne uređaje (u prvom redu to se odnosi na detaljnije modelovanje sinhronih mašina i njihovih regulacionih sistema). Ovaj prilaz baziran je na tzv. standardnim modelima komponenti EES-a, koji se uobičajeno koriste u tzv. sistemskim analizama.

U okviru analiza dinamičke sigurnosti, nezaobilazno je obuhvatanje prelaznih stanja u pobudnom sistemu i sistemu regulacije pobude sinhronih mašina. Za te svrhe poslužili su standardizovani, tzv. „IEEE modeli” pobudnih sistema i sistema regulacije pobude [5, 6, 7]. Međutim, u okviru ovih modela, nije se nalazio model tzv. multivarijabilnog, odnosno višeulaznog sistema regulacije pobude, koji postoji u našem sistemu. Stoga je, koristeći kao osnovu referencu [6], posebno razvijen model višeulaznog sistema regulacije pobude [8], za potrebe analiza različitih karakterističnih dinamičkih stanja EES-a Srbije i njegovog okruženja.

Na bazi prethodno pomenutih tzv. standardnih modela i razvijenih tehnika njihovog rešavanja (efikasna metoda numeričke integracije aktuelnih sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina [8, 9, 10]), u Institutu „Nikola Tesla”, razvijen je modularno organizovani računarski program STATSTAB. U njegovoj realizaciji primenjen je Visual Fortran Professional Edition 6.0.0. Omogućeno je tretiranje interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora i 200 regulacionih basena. Unošenje ulaznih podataka i prikazivanje dobijenih rezultata sprovedenih analiza je omogućeno posebnim editorima za čiji je razvoj korišćen Microsoft Visual Basic 5.0. Korisniku ovog računarskog programa je omogućeno sledeće:

- definisanje veličine procenta simultane promene ukupne potrošnje u analiziranom EES;
- definisanje vrste i mesta veličina koja se prate i koje se na odgovarajući način grafički interpretiraju, tokom trajanja nastalog prelaznog procesa;
- praćenje individualne „dinamike” svake od sinhronih mašina, preko dinamike promene njihovih

električnih uglova, odnosno njihovih sopstvenih učestanosti;

- praćenje kretanja tzv. „centra inercije” kompletnog EES-a, koje je indikativno za sagledavanje globalnih efekata nastalog debalansa;
- praćenje stanja na odabranim elementima tokom odvijanja prelaznog elektromehaničkog procesa, preko određivanja dinamike promene aktivnih i reaktivnih snaga, struja i fazora napona;
- grafička interpretacija na pregledan način, čime se dobija detaljni uvid u sam tok odvijanja prelaznog procesa, odnosno „odziva” EES-a na pojavu „malog regularnog poremećaja”;
- dobijanje svih bitnih pokazatelja, koji se odnose na uspostavljeno postdinamičko kvazistacionarno stanje razmatranog EES-a, u njegovom širokom okruženju.

4. REZULTATI I KOMENTAR ANALIZA STATIČKE STABILNOSTI

4.1. Uvodne napomene

Primenom računarskog programa STATSTAB obavljene su obimne analize statičke stabilnosti EES-a Srbije, u njegovom širokom okruženju, odnosno razmatrana je realna elektroenergetska interkonekcija koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 kV i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i delovi mreže 150 kV, koji su od uticaja), uz napomenu da je kompletno modelovana mreža 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/X kV/kV. Pri tome je u potpunosti respektovan dalji razvoj prenosne mreže Srbije, saglasno rezultatima Studije [11]. Za potrebe analiza dinamičkih stanja EES-a Srbije, korišćeni su interni podaci Instituta „Nikola Tesla”, koji su godinama skupljani, proveravani, sređivani i ažurirani, a inovirani podaci, vezani za pobudne sisteme i sisteme regulacije pobude generatora u EES Srbije, preuzeti su iz [12]. Takođe, korišćeni su i podaci, prikupljeni i sređivani tokom rada na Studiji „Izrada i verifikacija računarskog dinamičkog simulacionog modela elektroenergetskog sistema Republike Srbije sa okruženjem”, koja je urađena za potrebe Elektromreže Srbije.

Obuhvaćena su maksimalna i minimalna stanja prenosne mreže Srbije, koja se očekuju 2015, 2020. i 2025. godine. Tako je, na primer, u analizama koje se odnose na 2025. godinu, modelovano 1 135 čvorova (od toga, 126 generatorskih), 1731 grana (1 456 vodova i 275 transformatora). „Regularni poremećaj” je simuliran simultanim povećanjem ukupne

aktivne i reaktivne snage potrošača u razmatranoj interkonekciji za 10 %. Ocena stabilnosti (ugaone) je vršena preko evaluacije krivih oscilovanja rotora angažovanih generatora, formiranih za dovoljno dugi vremenski period (do 20 s).

4. 2. Prikaz dobijenih karakterističnih rezultata analiza statičke stabilnosti

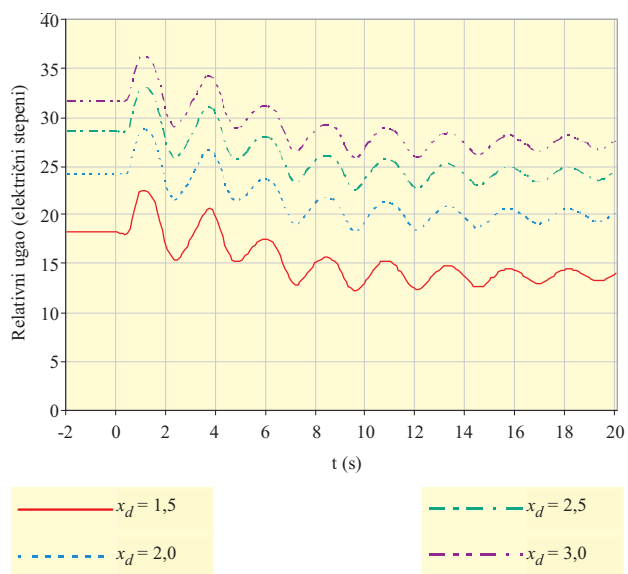
4. 2. 1. Rezultati analiza maksimalnih stanja

U okviru analiza statičke stabilnosti, obuhvaćen je niz radnih stanja generatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, saglasno zahtevima aktuelnih Pravila o radu prenosnog sistema Elektromreže Srbije [4]. Od niza dobijenih rezultata koji se odnose na maksimalna stanja, daju se naredne slike 1 – 6. Na njima se daju dinamički odzivi (u vremenskom domenu do 20 s) maksimalno opterećenih generatora u TE Kolubara B (slike 1 – 3) i TE Nikola Tesla B3 (slike 4 – 6), za razmatrani „regularni poremećaj”. To se daje za niz vrednosti sinhronne reaktanse u podužnoj osi x_d (1,5, 2,0, 2,5 i 3,0 r.j.). U pitanju su bile vrednosti zasićenih reaktansi, kojima odgovaraju sledeće vrednosti odnosa kratkog spoja 0,667, 0,500, 0,400 i 0,333, respektivno.

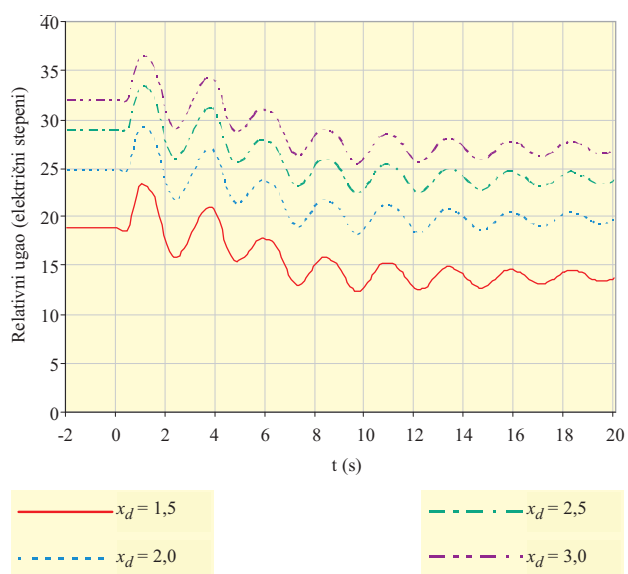
Svi izloženi rezultati su dobijeni za slučaj kada generatori u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 imaju statičke poluprovodničke (tiristorske) samopobudne sisteme, sa jednostavnim elektronskim regulatorom pobude, čija se regulaciona greška u osnovi formira na bazi otklona napona na krajevima generatora („proporcionalna” regulacija). Takođe, oni odgovaraju slučaju kada generatori u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 imaju savremene elektrohidraulične turbinske regulatore, sa statizmom od 7 % i „mrtvom” zonom od ± 10 mHz. Dalje, svi izloženi rezultati su dobijeni za slučaj kada je NE Kozlodui (BG), priključena na naponski nivo 400 kV, uzeta kao referentna elektrana. U cilju dobijanja šire slike o mogućem karakteru i toku dinamičkog odziva razmatranih turbogeneratora, oni su prikazani na slikama 3 i 6, koje su dobijene uz pretpostavku da je turbinski regulator u NE Kozlodui „blokiran”.

Dobijeni rezultati analiza, koji se odnose na maksimalna stanja, čiji je manji deo prikazan u radu, evidentno ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) razmatranih novih turbogeneratora, kao i ostalih generatora u EES Srbije, za razmatrani „regularni poremećaj” (simultano povećanje ukupnog konzuma u razmatranoj interkonekciji za 10 %). Na taj način, rezultati analiza statičke stabilnosti, koji uključuju i rezultate analiza osetljivosti na varijacije odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronne reaktanse po podužnoj osi, ukazuju da je i u uslo-

vima šireg opsega vrednosti ovih parametara, koji može da se sretne u praksi, obezbeđena potrebna rezerva statičke stabilnosti. To praktično znači da je kod razmatranih novih turbogenerators u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 omogućen izbor njihovih prirodnih, odnosno tipičnih vrednosti, koje su i najekonomičnije rešenje.

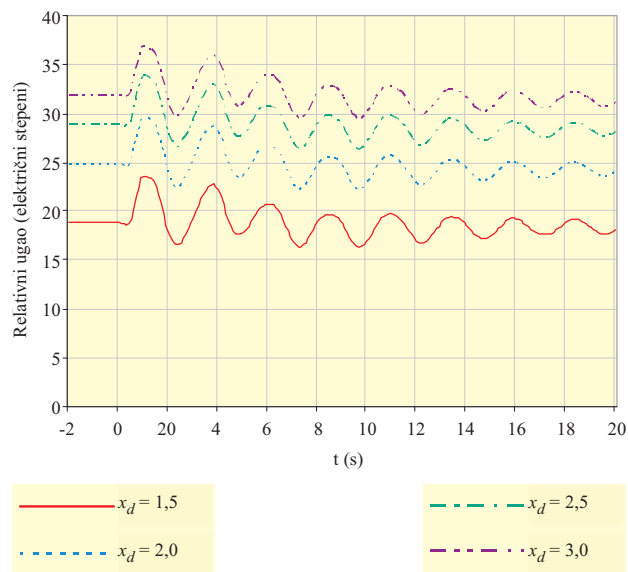


Slika 1. Dinamički odziv generatora u TE Kolubara B, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – maksimalno stanje 2015. godine

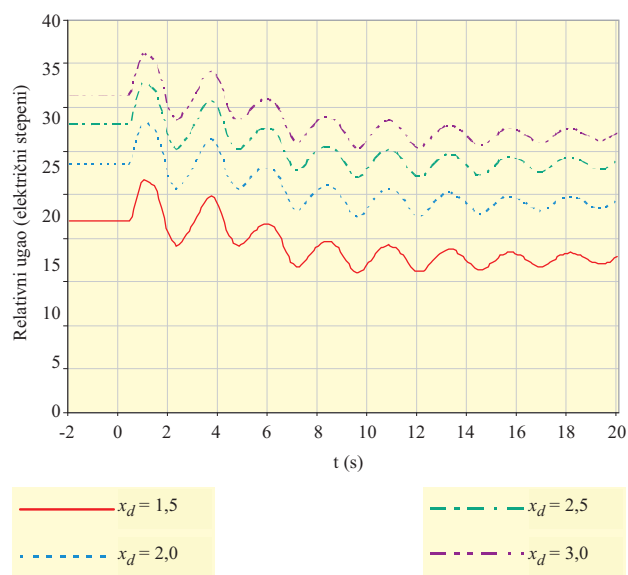


Slika 2. Dinamički odziv generatora u TE Kolubara B, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – maksimalno stanje 2020. godine

Već je bilo rečeno da se prikazani rezultati analiza statičke stabilnosti odnose na slučaj kada generatori u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 imaju

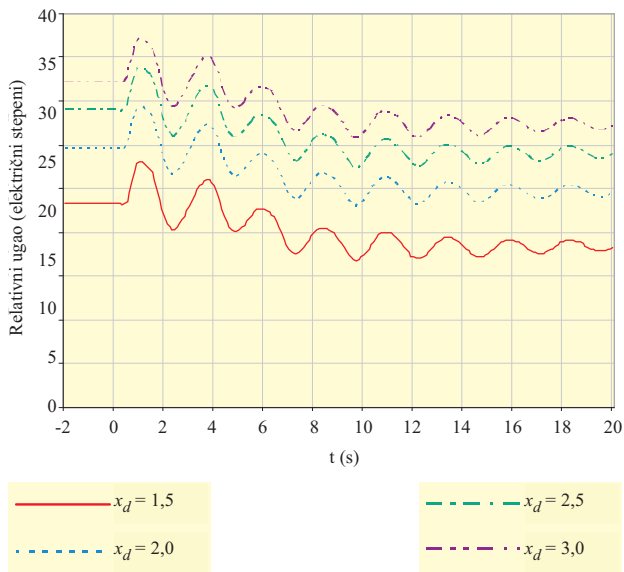


Slika 3. Dinamički odziv generatora u TE Kolubara B, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – maksimalno stanje 2020. godine; U NE Kozlodui (BG) „blokiran” turbinski regulator

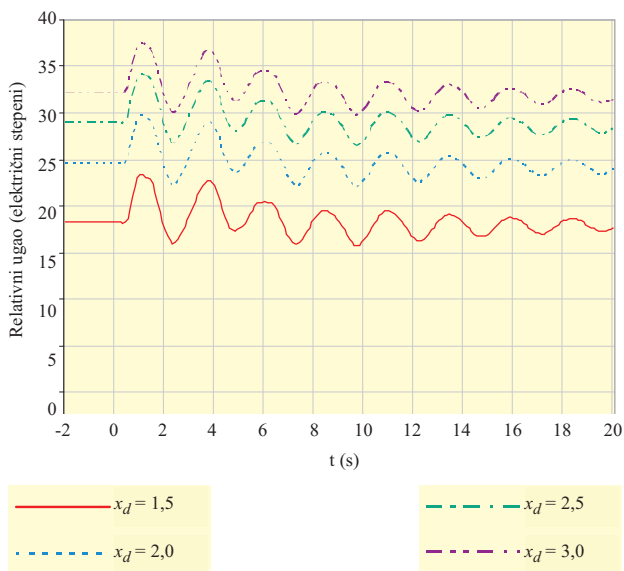


Slika 4. Dinamički odziv generatora u TE Nikola Tesla B3, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – maksimalno stanje 2015. godine

statičke poluprovodničke (tiristorse) samopobudne sisteme, sa jednostavnim elektronskim regulatorom pobude, čija se regulaciona greška u osnovi formira na bazi otklona napona na krajevima generatora („proporcionalna” regulacija). Ako bi sudili po karakteru dobijenih rezultata, oni bi omogućili izbor savremenih statičkih poluprovodničkih (tiristorških) samopobudnih sistema, i opravdavali izbor pomenu-tog jednostavnog elektronskog regulatora pobude. Međutim, kada je reč o izboru poželjnih karakteristika sistema regulacije pobude, uključujući i izbor



Slika 5. Dinamički odziv generatora u TE Nikola Tesla B3, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – maksimalno stanje 2020. godine

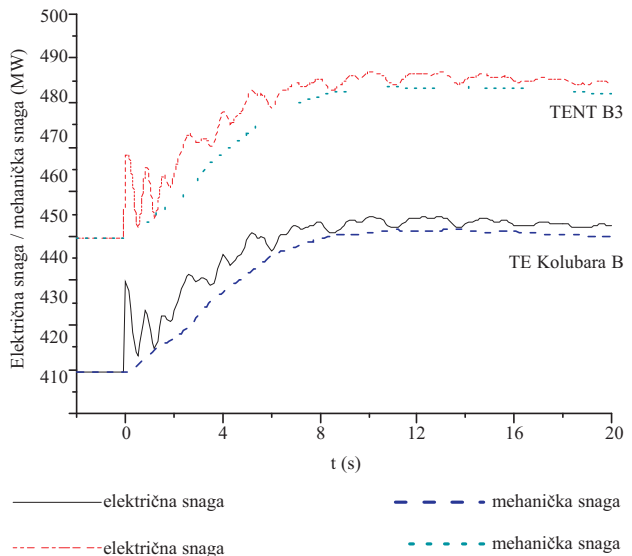


Slika 6. Dinamički odziv generatora u TE Nikola Tesla B3, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – maksimalno stanje 2020. godine; U NE Kozlodui (BG) „blokiran” turbinski regulator

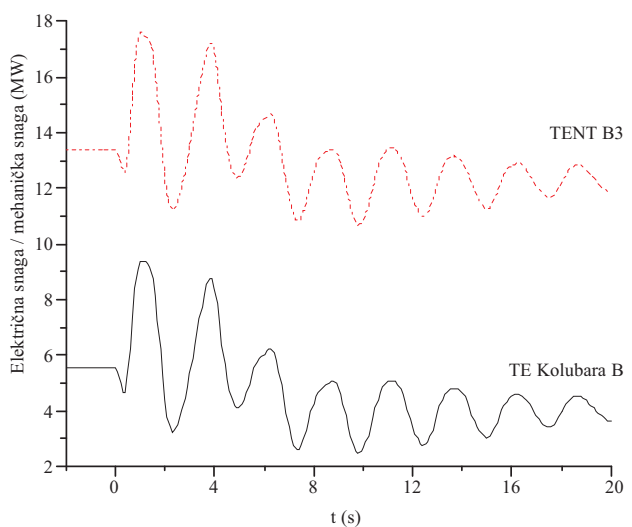
vrednosti za stepen forsiranja, odnosno „plafonsku” vrednost napona pobude razmatranih novih turbogeneratora, prava iskušenja su nastala u kontekstu analiza tranzijentne stabilnosti, o čemu je detaljno bilo reči u [1, 3].

Takođe, kako je to već bilo rečeno, prikazani rezultati odgovaraju slučaju kada generatori u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 imaju savremene elektrohidrauličke turbinske regulatore, sa statizmom od 7 % i „mrtvom” zonom od ± 10 mHz. Prikazani rezul-

tati su ukazali da ovakvi turbinski regulatori obezbeđuju povoljne dinamičke osobine novih blokova, za njihov siguran rad u EES Srbije i UCTE. Međutim, da bi se proširila argumentacija za prethodno iznetu konstataciju, obavljene su i dopunske analize statičke stabilnosti karakterističnih maksimalnih stanja EES-a Srbije, u okviru kojih bi dolazilo do intezivnijeg „odziva” agregata u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3. Od niza dobijenih rezultata, navode se oni koji se odnose na maksimalno stanje 2020. godine, a grafički su interpretirani na slikama 7 i 8.



Slika 7. Dinamika promene električnih i mehaničkih snaga agregata u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, nakon simultanog povećanja ukupnog konzuma u razmatranj interkonekciji za 10 %



Slika 8. Električni uglovi agregata u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, nakon simultanog povećanja ukupnog konzuma u razmatranj interkonekciji za 10 %

Dakle, i ovi rezultati analiza evidentno ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) razmatranih novih turbogenerators, kao i ostalih generatora u EES Srbije, za razmatrani „regularni poremećaj”. Ujedno, potvrđuju da savremeni elektrohidraulični turbinski regulatori, sa statizmom od 7 % i „mrtvom” zonom od ± 10 mHz obezbeđuju povoljne dinamičke performanse. Inače, o parametrima i karakteristikama turbinske regulacije agregata u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 detaljno je bilo reči u [1].

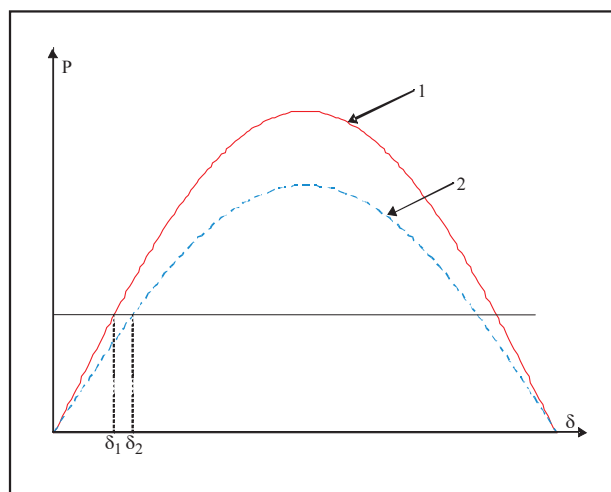
4. 2. 2. Rezultati analiza minimalnih stanja

U cilju dobijanja šire osnove za izbor odnosa kratkog spoja generatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, analize statičke stabilnosti EES-a Srbije, u njegovom širokom okruženju, obuhvatile su i minimalna stanja, koja se očekuju 2015, 2020. i 2025. godine. To je urađeno, između ostalog, i zbog činjenice da je u cilju uspostavljanja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika u minimalnim stanjima bilo neophodno da pojedini generatori, uključujući i razmatrane nove turbogeneratore, budu u potpobuđenim režimima rada. Stoga se nametnulo sledeće pitanje: kako i koliko su takva potpobuđena stanja od uticaja na dinamičke performanse EES-a Srbije?

To se u prvom redu odnosi na statičku i tranzijentnu (ugaonu) stabilnost. A zašto? Odgovor proizilazi iz činjenice da u uslovima minimalnih stanja dolazi do rasterećenja angažovanja generatora u pogledu odate reaktivne snage, pa sve do prelaska u kapacitivni kvadrant, odnosno do prelaska u potpobuđene režime rada. A kakve bi bile posledice toga? Pitanje ima smisla, jer se u tim novim uslovima pogona, operiše sa manjim vrednostima struja pobude angažovanih generatora, odnosno elektromotornih sila, koje su njima srazmerne. Preliminarni odgovor na postavljeno pitanje bi mogla da da naredna slika 9, na kojoj se daju statičke ugaone karakteristike generatora (P-d), za dve različite vrednosti pobudne struje (kriva 1 odgovara odavanju veće reaktivne snage generatora, a kriva 2 bi bila rezultat, između ostalog, i povoljnih efekata uvedene kompenzacije reaktivne snage, koji su redukovali vrednost njegove pobudne struje). Dakle, za nepromenjenu vrednost angažovane aktivne snage generatora (P), saglasno njegovoj statičkoj ugaonoj karakteristici (P- δ), datoj na slici 9, došlo bi do povećanja električnog ugla ($\delta_2 > \delta_1$) njegove q-ose rotora u odnosu na referentnu osu, u slučaju manjih vrednosti pobudne struje, odnosno prelaska u potpobuđeni režim rada.

Potrebno je napomenuti da je ova ugaona karakteristika na slici 9 data za turbogenerator, u okviru tzv. jednomašinskog tretmana (da podsetimo, to

je hipotetičan, ali često korišćen slučaj u teoriji stabilnosti EES-a, kada je generator priključen na sabirnice tzv. beskonačne snage). Ako bi se sve ovo observiralo i analiziralo u okviru tzv. jednomašinskog tretmana, evidentno bi dolazilo do smanjivanja rezerve statičke (ugaone) stabilnosti. Analognim posmatranjem odgovarajućih dinamičkih ugaonih karakteristika generatora, takođe u okviru tzv. jednomašinskog prilaza, došlo bi se i do zaključka o smanjivanju rezerve tranzijentne stabilnosti. Konsekvntno tome, na prvi pogled, to bi moglo da dovede do pogoršanja dinamičkih performansi EES-a Srbije.

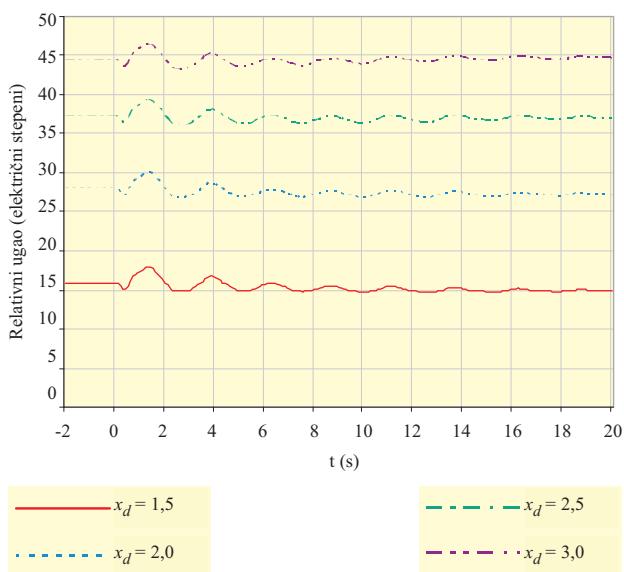


Slika 9. Statičke ugaone karakteristike turbogenerators, za dve različite vrednosti njegove pobudne struje

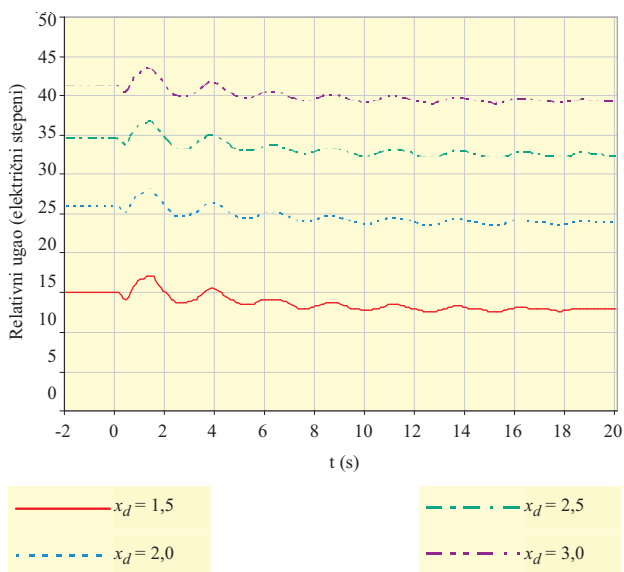
Međutim, da li je baš sve to tako, kako bi to dalo preliminarno sagledavanje u okviru tzv. jednomašinskog tretmana? Odgovor na ovo pitanje mogao je jedino da bude nađen u okviru tzv. višemašinskog prilaza analizi stabilnosti (statičke i tranzijentne) realnog EES-a, kako je to urađeno u okviru Studije [1].

Od niza dobijenih rezultata koji se odnose na minimalna stanja, u kontekstu utvrđivanja povoljnih vrednosti odnosa kratkog spoja generatora u razmatranim novim termoelektranama TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, daju se naredne slike 10 i 11. Na njima se daju dinamički odzivi (u vremenskom domenu do 20 s) generatora u TE Kolubara B (slika 10) i TE Nikola Tesla B3 (slika 11), za razmatrani „regularni poremećaj”. To se, kao u slučaju analiziranih maksimalnih stanja, daje za niz vrednosti sinhronne reaktanse u podužnoj osi x_d (1,5, 2,0, 2,5 i 3,0 r.j.). Izloženi rezultati takođe su dobijeni za slučaj kada je NE Kozlodui (BG), priključena na naponski nivo 400 kV, uzeta kao referentna elektrana i za slučaj da generatori u TE Kolubara B i TE Niko-

la Tesla B3 imaju statičke poluprovodničke (tiristor-ske) samopobudne sisteme, sa elektronskim proporcionalnim regulatorom pobude.



Slika 10. Dinamički odziv generatora u TE Kolubara B, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – minimalno stanje 2020. godine



Slika 11. Dinamički odziv generatora u TE Nikola Tesla B3, za niz vrednosti sinhronne reaktanse x_d – minimalno stanje 2020. godine

Dobijeni rezultati analiza koji se odnose na minimalna stanja, takode evidentno ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) turbogeneratora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, kao i ostalih generatora u EES Srbije, za razmatrani „regularni poremećaj”. Objasnjenje za izrazito stabilno ponašanje EES-a Srbije i u minimalnim stanjima, iz-

među ostalog, leži u činjenici da relaksacija u pogledu odate reaktivne snage, teoretski gledano, obuhvata praktično sve angažovane generatore. Zbog toga ugaoni pomeraji između njih, a koji su relevantni za ugaonu stabilnost (statičku i tranzijentnu), praktično ne trpe značajnije promene.

Naravno, sve ovo je moglo da se uoči samo u okviru tzv. višemašinskog prilaza analizi statičke i tranzijentne stabilnosti, kako je to i urađeno u Studiji [1]. To nikako ne znači da bi trebalo da se diskvalifikuje u potpunosti „dobri stari jednomašinski prilaz”, sa kojim se dobija dobra, pre svega fizikalna početna osnova u savladavanju jedne veoma kompleksne problematike, kao što je to stabilnost EES-a. Bitno je da se na tom prilazu ne zaustavi dalji istraživački rad na njenom razumevanju i savladavanju.

5. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati analiza statičke stabilnosti maksimalnih i minimalnih stanja EES-a Srbije, u njegovom širokom okruženju, ukazuju na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom smislu) razmatranih novih turbogeneratora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, kao i ostalih generatora u EES Srbije, za razmatrani „regularni poremećaj” (simultano povećanje ukupnog konzuma u razmatranoj interkonjeksi za 10 %).

Na taj način, rezultati analiza statičke stabilnosti, koji uključuju i rezultate analiza osetljivosti na varijacije odnosa kratkog spoja, odnosno vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi po podužnoj osi, ukazuju da je i u uslovima šireg opsega vrednosti ovih parametara (0,67-0,33, odnosno 1,5-3,0 r.j), koji može da se sretne u praksi, obezbeđena potrebna rezerva statičke stabilnosti. To praktično znači da je kod razmatranih turbogeneratora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 omogućen izbor njihovih prirodni, odnosno tipičnih konstrukcionih vrednosti.

6. LITERATURA

- [1] STUDIJA STABILNOSTI RADA I IZBOR OPSEGA NAJPOVOLJNIJIH VREDNOSTI PARAMETARA I KARAKTERISTIKA TURBOAGREGATA I BLOK-TRANSFORMATORA U TE KOLUBARA B I TE NIKOLA TESLA B3, studija Instituta „Nikola Tesla”, Beograd, 2008.
- [2] Popović D. P., Stojković M., Stanisavljević I., IZBOR NOMINALNOG FAKTORA SNAGE GENERATORA I KARAKTERISTIKA BLOK-TRANSFORMATORA U TE KOLUBARA B I TE NIKOLA TESLA B3, 29. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 31. maj-6. jun, 2009, referat R C1-06

- [3] Popović D. P., Stanisavljević I., Stojković M., IZBOR VREMENSKE KONSTANTE INERCIJE, TRANZIJENTNIH REAKTANSI I POBUDNOG SISTEMA AGREGATA U U TE KOLUBARA B I TE NIKOLA TESLA B 3, 29. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 31. maj-6. jun, 2009, referat R C1-05
- [4] PRAVILA O RADU PRENOSNOG SISTEMA, Elektromreža Srbije, Verzija 1.0, april 2008.
- [5] IEEE Committee Report, COMPUTER REPRESENTATION OF EXCITATION SYSTEMS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, June 1968. pp. 1460-1464.
- [6] IEEE Committee Report, EXCITATION SYSTEM MODELS FOR POWER SYSTEM STABILITY STUDIES, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, pp. 494-509.
- [7] IEEE STANDARD DEFINITION FOR EXCITATION SYSTEMS FOR SYNCHRONOUS MACHINES, An American National Standard, The Institute of EEE, NY, USA, 1986.
- [8] Popović D. P, AN APPROACH TO THE EVALUATION OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENT PROCESS IN POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 7, No. 2, 1984, pp. 141-151.
- [9] Popović D. P., A SIMPLE AND RELIABLE PROCEDURE FOR THE EVALUATION OF SHORT-TERM DYNAMIC PROCESS IN POWER SYSTEMS, Int. Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 8, No.4, October 1986, pp. 195-204.
- [10] Popović D. P, DINAMIČKA SIGURNOST ELEKTROENERGETSKIH INTERKONEKCIJA, monografija, Institut „Nikola Tesla”, Beograd, ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008. godine, str. 255.
- [11] STUDIJA DUGOROČNOG RAZVOJA PRENOSNE MREŽE 400 kV, 220 kV I 110 kV NA PODRUČJU REPUBLIKE SRBIJE, ZA PERIOD DO 2025. GODINE, studija Instituta „Nikola Tesla”, Beograd, 2006.
- [12] REGULACIJA NAPONA ODNOSNO POBUDNE STRUJE SINHRONIH GENERATORA U ELEKTRANAMA ELEKTROPRIVREDE SRBIJE SA GLEDIŠTA ZAHTEVA SISTEMA, studija Instituta „Nikola Tesla”, Beograd, 2005.

Rad je primljen u uredništvo 05. 09. 2008. godine

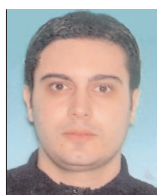


Dragan P. Popović rođen je 1943. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirao je 1965. godine na Energetskom odseku, magistrirao 1981. godine na smeru Elektroenergetski sistemi, a doktorsku tezu odbranio maja 1984. godine, sve na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Po diplomiranju, zaposlio se u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”, gde se i sada nalazi na radnom mestu višeg savetnika u Centru za elektroenergetske sisteme. Godine 1997. godine izabran je u najviše naučno-istraživačko zvanje naučni savetnik. Decembra meseca 2008. godine izabran je za redovnog člana Jugoslovenske inženjerske akademije u Odeljenju za elektrotehniku.

Predaje na doktorskim studijama Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i na master i doktorskim studijama Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Član je Komisije za sticanje naučnih zvanja Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Do sada je bio autor preko 80 studija iz problematike planiranja, pogona i upravljanja elektroenergetskih sistema. Takođe, do sada je objavio dve monografije, jedan udžbenik i preko 200 naučnih i stručnih radova. Razvio je veći broj računarskih programa za analizu relevantnih statičkih i dinamičkih stanja elektroenergetskih interkonekcija.



Ivan Stanisavljević je rođen 22. 08. 1973. godine u Zaječaru. Diplomirao je 2000. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Od 2003. godine je stalno zaposlen na Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Centru za elektroenergetske sisteme (samostalni saradnik). Godine 2004. položio je stručni ispit, a magistrirao 2007. godine. Koautor i autor je više studija planiranja distributivnih mreža, projekata racionalizacije potrošnje električne energije i projekata vezanih za dinamiku sistema.



Miloš Stojković je rođen 1978. godine u Vranju. Diplomirao je 2004. godine na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, smer za Elektroenergetske sisteme. Radi kao samostalni saradnik u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Centru za elektroenergetske sisteme. Koautor je više studija planiranja prenosnih i distributivnih mreža i studija vezanih za dinamiku sistema.

Saša Milić, Dragan Kovačević
Nebojša Karanović, Zoran Kršenković i Miša Kožicić

Sistem za temperaturni monitoring namotaja rotora hidrogenatora

Stručni rad
UDK: 621.31

Rezime:

U radu je prikazan razvoj složenog sistema za monitoring temperature namotaja rotora generatora na hidro elektrani Đerdap II. Pored prikaza hardverske koncepcije sistema, dat je i prikaz računarskog programa za vizualizaciju mernog procesa. Osnovni uzrok pregrijanosti namotaja su problemi u sistemu vodenog hlađenja polova. Koncepcija ovog mernog sistema se bazira na optičkom beskontaktnom merenju apsolutne temperature bočne površine namotaja rotora u radu pomoću, optičkog infracrvenog (IC) uređaja. Sam merni uređaj je razvijen za merenje temperature objekata u pokretu u teškim industrijskim uslovima. Rezultate merenja optički IC sklop prosleđuje u procesnu jedinicu za obradu podataka, koja zatim izračunata vrednosti temperatura sa pripadajućim indeksom pola šalje na panel PC na kome su instalirani virtualni instrument i baza podataka. Sistem radi automatski u on-line, intermitentnom režimu. Predviđena je mogućnost poluautomatskog režima rada gde operater može da izvrši merenje u svakom trenutku. Na ekranu panel PC-a na komandnoj tabli se prikazuju vrednosti temperatura namotaja rotora. Sistem sadrži svu potrebnu funkcionalnost i mogućnost generisanja pisanih izveštaja o merenjima, kao i vezu sa nadzornim SCADA sistemom. Rezultati merenja su dati u vidu praktične verifikacije u realnom radu. Ovi merni sistemi su instalirani na svih deset agregata čime je značajno podignuta pouzdanost proizvodnog procesa električne energije u hidroelektrani Đerdap II.

Ključne reči: *monitoring temperature, namotaji rotora, infracrveno merenje, virtualni instrumenti*

Abstract:

SYSTEM FOR TEMPERATURE MONITORING OF ROTOR WINDINGS OF HYDRO GENERATORS

This paper presents the developed complex system for temperature monitoring of rotor windings of generators at hydro power plant Đerdap II. The description of the hardware concept and the computer program for measuring processes visualization are given. The main reason for overheating of the poles are various problems of their water cooling system. The temperature measurements are based on on-line measuring of infrared (IR) radiation emission from lateral rotor windings surfaces. The entire system operates in harsh industrial conditions. The DSP unit acquires and processes temperature data and then sends them to the panel-PC. The virtual instrument and database operate from the panel-PC. The entire system works on-line in intermittent mode. Manual mode is also provided. Graphical user interface is used for visualisation purposes. The realized software provides the generation of printed reports and files for subsequent analysis. The link with SCADA is also provided. The results are obtained in real exploitation. These systems are installed on all ten generators in hydro power plant.

Keywords: *temperature monitoring, rotor windings, infrared measuring, virtual instruments*

Saša Milić, Dragan Kovačević – Institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija,
Nebojša Karanović, Zoran Kršenković, Miša Kožicić – Hidroelektrana Đerdap II, Negotin, Srbija

1. UVOD

U današnje vreme, razvoj sistema za merenje različitih parametara u industriji zahteva sintezu znanja iz više naučnih oblasti. Sve se češće sreću složeni merni sistemi koji objedinjuju oblasti optike, mehanike, komunikacija, merne i procesne tehnike i dr. Upotreba računara i uvođenje automatizacije se više i ne pominje kao moderno već kao podrazumevano. U ovom poglavlju je dat prikaz mernog sistema koji je razvijen za potrebe hidroelektrana. Sistem služi za merenje temperatura namotaja rotora, odnosno vodom hlađenih polova rotora hidrogeneratora u radu. Konstrukcija rotora je takva da se vodom hlađe i bakarni provodnici i paketi limova.

Osnovni uzrok pregrejanosti namotaja polova rotora je začepljenje samih namotaja i dovodnih cevi u sistemu vodenog hlađenja rotora generatora. Prisustvo vazduha u rashladnoj vodi dovodi do oksidacije bakra u namotajima polova, a samim tim i taloženje bakar-oksida Cu_2O u istim. Taloženje produkata oksidacije je prostorno neravnomerno i vremenski teško predvidivo.

Temperature namotaja rotora predstavljaju važan parametar na osnovu koga se procenjuje stanje rashladnog sistema na samom rotoru. Ovde je primenjena beskontaktna metoda merenja temperature na bazi infracrvenog zračenja sa bočne (vidljive prednje strane) površine namotaja rotora. Merenje se obavlja u radu agregata i to za namotaje svaka dva susedna pola ponaosob. Mere se namotaji dva susedna pola iz razloga što polovi poseduju zajedničku cevnu vezu rashladnog sistema (redna veza dva susedna pola u rashladnom sistemu). Posebna prednost ove beskontaktne metode i daljinskog nadzora temperature je u tome da se ceo merni ciklus odvija u realnom vremenu i bez prekidanja procesa proizvodnje odnosno rada generatora.

Sistem je predviđen da registruje svaku promenu mirnog temperaturnog stanja na kontrolnom displeju (monitoru). Signal o prekoračenju opomenske i havarijske vrednosti se kao zbirni signal prosleđuje na komandnu tablu agregata (relejni izlaz), ka štampaču i u „istoriju” događaja. Mirno stanje je stanje bez opomenskih i havarijskih vrednosti. Uređaj treba da registruje i upamti, kako očekivanu promenu temperature namotaja rotora usled promene snage agregata, tako i neočekivane poraste temperatura na polovima. Istorija događaja se pamti u bazi podataka. Definisana su po dva praga alarma za vrednosti izmerenih temperatura: alarm upozorenja i havarijski alarm koji se može realizovati zajedno sa upravljačkim signalom havarijskog zaustavljanja generatora.

Sistem je otvoren za nadogradnju, odnosno, praktično je već izvršeno povezivanje sa sistemima

za merenje temperatura sa stacionarnih davača i povezivanje na SCADA sistem.

2. TEHNIČKI ASPEKT RASHLADNOG SISTEMA I POTREBA ZA TEMPERATURNIM MONITORINGOM NAMOTAJA ROTORA

Potreba za razvojem ovakvog mernog sistema je višestruka. Sa ekonomskog aspekta, na ovaj način se omogućava praćenje stanja zaprljanosti celog rashladnog sistema polova, kao i čišćenje samo grana rashladnog sistema koje povezuju polove sa povišenom temperaturom. U užem smislu, sa aspekta sigurnosti, ovaj sistem značajno podiže pouzdanost proizvodnje i olakšava održavanje davanjem tačne pozicije pregrejanih polova. U širem smislu posmatrano, sistem smanjuje verovatnoću havarije na generatoru koja je prouzrokovana pregrejanostu namotaja rotora. Ovaj problem je prisutan na hidroelektrani Đerdap II gde se na generatorima polovi (i namotaji i paketi limova) rotora hlađe vodom u toku rada.

U hidroelektrani Đerdap II, odnosno u srpskom delu elektrane, se nalazi 10 horizontalnih cevni agregata ukupne instalisane snage 270 MW. Turbine su Kaplanovog tipa. Hidrogeneratori su aktivne snage 27 MW, faktora snage 0,98 i nalaze se u kapsulama. Osnovni delovi hidrogeneratora su: stator, rotor, radijalni ležajevi, aksijalni i kontraaksijalni ležajevi, regulacioni generator (tahogenerator), sistem za hlađenje i sistem za gašenje požara. Sistem termokontrole spada u prateću (pomoćnu) opremu agregata i sastoji se od dva funkcionalno i tehnički povezana sistema: sistem daljinskog monitoringa temperature namotaja rotora i sistem za merenje temperatura sa stacionarnih davača.

Električne karakteristike hidrogeneratora:

- aktivna snaga 27 000 kW
- prividna snaga 27 550 kVA
- faktor snage (cosj) 0,98
- linijski napon 6 300 V
- nominalna struja 2 527 A
- učestanost 50 Hz
- nominalna brzina obrtanja 62,5 obr/min
- pobudna struja pri praznom hodu 1 305 A
- napon pobudnog namotaja pri praznom hodu 115 V
- napon pobudnog namotaja pri nominalnom opterećenju 185 V

Proračun mernog intervala za merenje temperature namotaja dva susedna pola prema podacima o rotoru:

- prečnik rotora: $D = 7\,764$ mm
- broj parova polova: $p = 48$

- broj obrtaja rotora:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = 62,5 \frac{\text{obr}}{\text{min}} = 1,0417 \frac{\text{obr}}{\text{s}}$$

- periferna brzina rotora:

$$v = \omega \cdot r = \omega \cdot \frac{D}{2} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{D}{2} = 25,4084 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- obim rotora:

$$O = 2 \cdot \pi \cdot r = \pi \cdot D = 24,3913 \text{ m}$$

- merni interval za dva susedna pola:

$$t = \frac{S_{2\text{pola}}}{v} = \frac{O}{v} = 0,0199993 \text{ s} \approx 20 \text{ ms}$$

3. KONCEPCIJA MERNOG ALGORITMA I NJEGOVA PRAKTIČNA REALIZACIJA

Pokretni objekti u industriji mogu biti pokretni delovi nekih mašina ili sami proizvodi (npr. na pokretnoj traci), u saobraćaju su to delovi vozila ili sama vozila itd. Generalno, u industrijskoj primeni,

postoje dve koncepcije merenja temperature pokretnih objekata. Prva koncepcija predstavlja kontaktno merenje temperature na bazi ugradnje najrazličitijih tipova, najčešće integrisanih, temperaturnih senzora sa radio predajnicima na ili u same pokretne objekte. Druga koncepcija se bazira na beskontaktnom merenju temperature na bazi infracrvenog (IC) zračenja sa pokretnog objekta gde se merni uređaj (IC detektor sa objektivom ili IC kamera) postavlja pored objekta čija se temperatura meri. U narednoj tabeli 1. je data komparativna analiza osnovnih prednosti i mana kontaktnih senzora koji se ugrađuju u pokretne objekte i mernih uređaja i senzora na bazi infracrvenog zračenja.

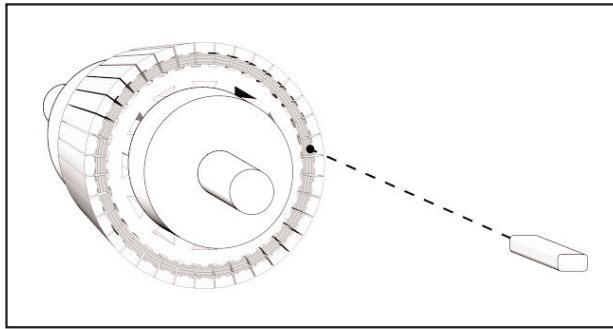
Ovde se ne razmatra merenje na bazi kontaktnog merenja temperature u pokretnim objektima jer je neopravdano skupo, kompikovano za ugradnju i nerentabilno za održavanje. Korisno je pomenuti da fiber-optički senzori za merenje temperature takođe nisu upotrebljivi u pokretnim objektima iz istih razloga (problemi montaže, prenosa signala i sl.).

Merni sistem za praćenje temperatura namotaja rotora vodom hlađenih polova (vodom se hlade i ba-

Tabela 1.

Komparativna analiza kontaktne i beskontaktno metode merenja temperature objekta u pokretu

Kategorije za poređenje	Kontaktna metoda		Beskontaktna metoda	
	temperaturnih senzori sa radio predajnicima u ili na pokretne objekte		IC uređaji i kamere sa optičkim objektivima pored pokretnih objekta	
	<i>prednosti</i>	<i>mane</i>	<i>prednosti</i>	<i>mane</i>
Postavljanje, održavanje i zamena senzora	–	neophodno zaustavljenje tehnološkog procesa	nepotrebno zaustavljenje tehnološkog procesa	–
	merenje ne zavisi od usmerenosti	–	–	merenje zavisi od položaja (vidno polje objektivna)
	–	merenje zavisi od kvaliteta prijanjanja senzora na površinu	merenje ne zavisi od kvaliteta kontakta sa površinom	–
	nije potrebno čišćenje objektivna	–	–	potrebno je čišćenje objektivna
	–	postavljanje i zamena zahtevaju rasklapanje objekta	nije potrebno rasklapanje objekta	–
	–	postavljanje i zamena zahtevaju ponovno sklapanje objekta	nije potrebno ponovno sklapanje objekta	–
Uslovi merenja	<i>prednosti</i>	<i>mane</i>	<i>prednosti</i>	<i>mane</i>
	–	napajanje	napajanje	–
	na merenje ne utiču prašina, vlaga i atmosferski uslovi	–	–	na merenje utiču prašina, vlaga i atmosferski uslovi
	–	hemijske osobine objekta utiču na izbor senzora	hemijske osobine objekta ne utiču na izbor senzora	–
–	predajnici podložni elektromagnetnim smetnjama	nisu uslovljeni na bežični prenos	–	
Ekonomski aspekt	Neopravdano skupi i komplikovani sistemi sa aspekta ugradnje		Cene ovih sistema potpuno opravdavaju njihovu ugradnju	



Slika 2. Princip merenja temperature polova

karni provodnici i paketi limova) hidrogenatora na hidroelektrani Đerdap II služi za blagovremeno otkrivanje i alarmiranje pregrejanosti namotaja u toku rada agregata. Temperature polova predstavljaju važan parametar na osnovu koga se procenjuje stanje rashladnog sistema. Ovde je primenjena beskontaktna metoda merenja temperature na bazi infracrvenog (IC) zračenja razvijena u institutu Nikola Tesla za merenje u teškim industrijskim uslovima. Razvijen je IC optički merni modul [1], [2] modularnog tipa pogodan za ugradnju u složene daljinske merne nadzorne sisteme [3], [4]. Merenje temperature se zasniva na merenju IC zračenja sa površine namotaja rotora (slika 2) i obavlja se neprekidno u toku rada agregata i to za svaka dva susjedna pola ponosob. Mere se dva susjedna pola iz razloga što poseduju zajedničku cevnu vezu rashladnog sistema (redna veza rashladanog sistema dva susjedna namotaja). Posebna prednost ove beskontaktna metode i daljinskog nadzora temperature je i u tome da se sve odvija u realnom vremenu i bez prekidanja procesa proizvodnje odnosno rada generatora.

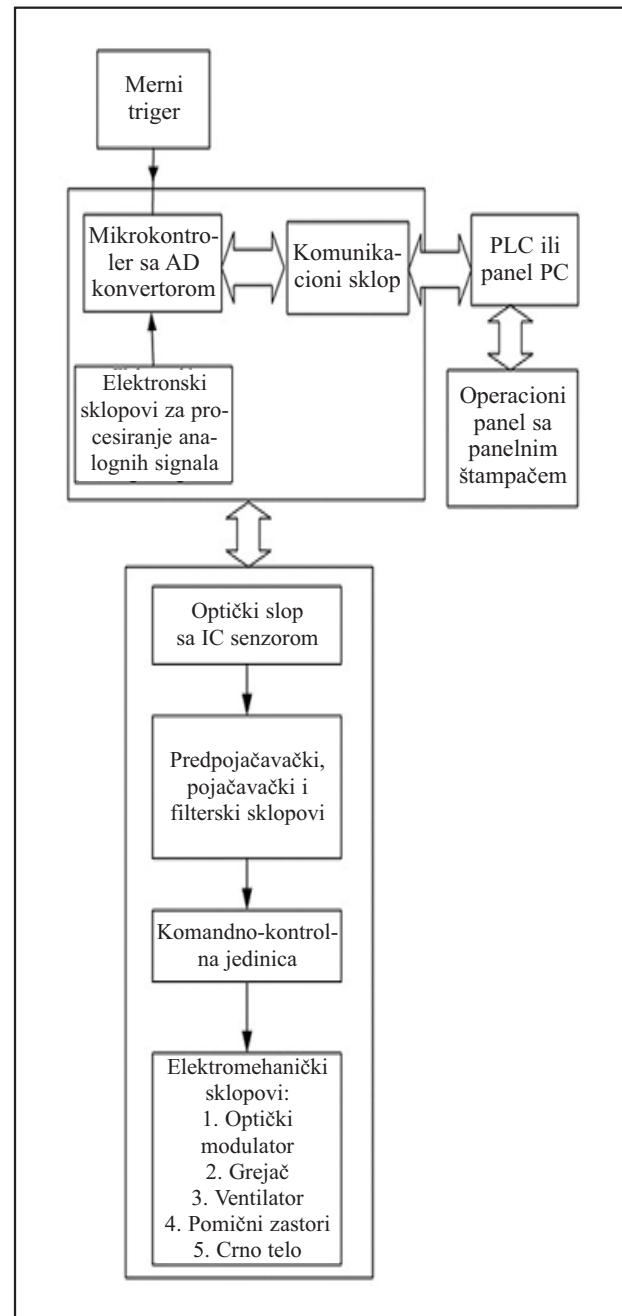
Osnovni uzrok pregrejanosti polova je posledica problema njihovog hlađenja. Hlađenje polova je vodeno i realizovano je složenim sistemom cevi i kanala. Usled nekog defekta ili kvara na pomenutom rashladnom vodenom sistemu dolazi do pregrevanja polova rotora. Merni sistem je razvijen na principu automatizovanog daljinskog nadzora, merenja i kontrole, a u cilju podizanja pouzdanosti proizvodnje. Uvođenjem ovog sistema u proizvodni ciklus, promenjena je i koncepcija održavanja. Sa održavanja po periodici (ovde se misli pre svega na merenje temperatura polova rotora hidrogenatora) prešlo se na održavanje po stanju, što i jeste trenutni svetski trend [5].

4. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE MERNOG SISTEMA

Praktično realizovana koncepcija kompletnog mernog sistema je data na blok dijagramu (slika 3) i

u osnovi se bazira na optičkom beskontaktnom merenju apsolutne temperature površine namotaja rotora pomoću optičkog infracrvenog (IC) uređaja [1],[2] i [6].

Rezultate merenja optički IC sklop prosleđuje u procesnu jedinicu za obradu podataka (srce procesne jedinice čini DSP). Izračunate vrednosti temperatura sa pripadajućim brojem pola se šalju (RS-485) na panel PC na kome su instalirani virtualni instrument i baza podataka. Sistem radi automatski u *on-line*, intermitentnom režimu. Usvojena je kon-



Slika 3. Blok dijagram mernog sistema za merenje temperature polova rotora u pokretu

cepcija: za jedan agregat jedan meri sistem i jedan industrijski računar iz razloga pouzdanosti i prihvatanja osnovnih načela *stand-alone* arhitekture [7], [8].

Merni sistem se postavlja u kapsuli hidrogeneratora (slika 4). Analogni signal sa IC uređaja se digitalizuje u A/D konvertorskom modulu merno-upravljačke jedinice, da bi se dobili podaci o merenju. Ti podaci se obrađuju u cilju nalaženja temperatura polova i prosleđuju ka centralnoj nadzornoj jedinici (CNJ) prikazanoj na slici broj 5. Komunikacija je ostvarena po specijalno dizajniranom protokolu putem RS-485 serijske veze [9].

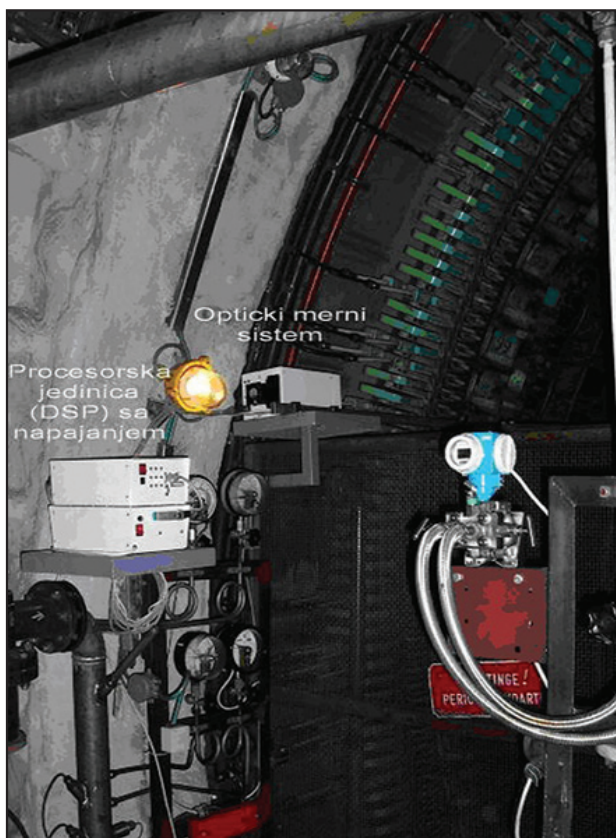
U razvijanoj koncepciji je korišćen DSP (digital signal processor) za obradu merenih rezultata [10]. Prednosti DSP-a, u odnosu na koncepciju sa standardnim mikrokontrolerom su višestruke: paralelno procesiranje signala, veća brzina, mogućnost primene modernih algoritama kao što su FIR (Finite-length Impulse Response) i FFT (Fast Fourier Transformation) [11].

Glavne funkcije upotrebljenog DSP-a su: obrada analognog mernog signala i A/D konverzija. Analogni signal je stalno semplovan sa 2 KS/s. U nominalnom režimu, koji podrazumeva stalnu brzinu merenog objekta (ali ne mora), meri se po 40 vrednosti

temperatura za svaki ciklus merenja od 20 ms. Ukoliko je moguće obezbediti ciklično merenje istog objekta (što je moguće u merenju namotaja rotora na hidrogeneratoru), onda je uzeto (radi manje greške) da se dovoljan broj merenih uzoraka po svakom paru susednih polova postiže merenjem 8 punih rotacija rotora.

4.1. Centralna nadzorna jedinica

Centralna nadzorna jedinica – CNJ (slika 5) je jedinstvena za sistem termokontrole i objedinjuje dva sistema: sistem daljinskog monitoringa temperature polova rotora i sistem za merenje temperatura sa stacionarnih davača. CNJ se sastoji iz tri dela [9]: panel PC, POS (*point of sale*) štampač, upravljačko komunikacioni modul, alarmni modul i konvertor. Podaci od merno-upravljačkih jedinica stižu preko RS-485 veze, jer je dužina komunikacionog kabla oko 50 m [12]. Konvertor vrši konverziju RS-485 signala u RS-232 signale koje panel PC prihvata preko serijskih portova. Na Panel PC-u se nalaze računarski program Rototemp [9] i baza podataka. Panel PC je modifikovana verzija PC računara, posebno dizajniran za ugradnju u industriji [9].



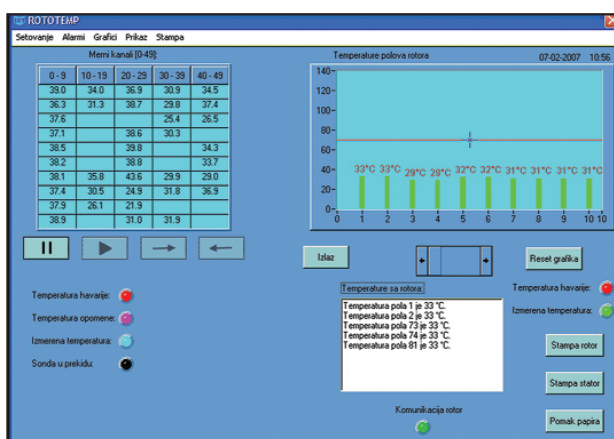
Slika 4. Merni sistem u kapsuli hidrogeneratora



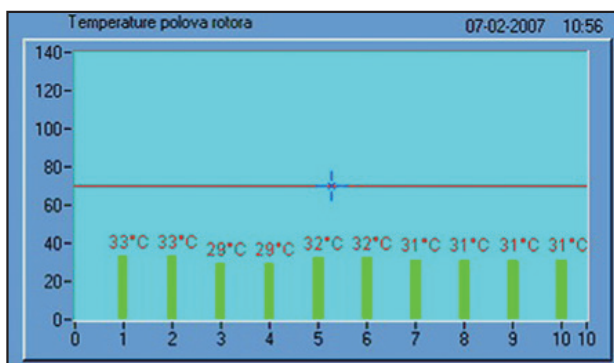
Slika 5. Centralna nadzorna jedinica

4.2. Računarski program

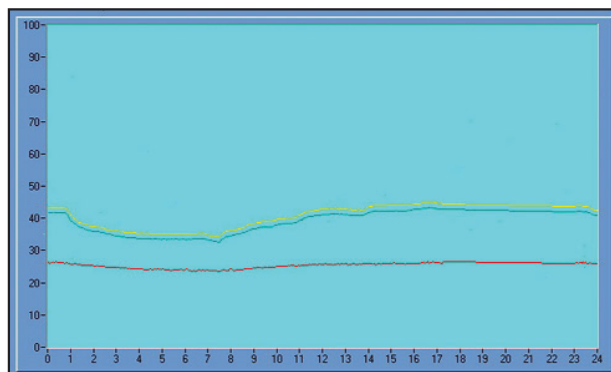
Centralizacijom merenja se na jednom mestu, na panel-PC-u u CNJ prikazuju sve relevantne temperature agregata. Glavna radna maska korisničkog interfejsa (slika 6) je realizovana na bazi virtualnih instrumenata tako da korisniku omogućava jednostavnu upotrebu programa. Vrednosti izmerenih temperatura se prikazuju *on-line* u vidu bar dijagrama (slika 7) i grafički (slika 8) kada je potrebno analizirati duži vremenski period merenja u vidu grafika. Moguć je jednostavan pregled arhiviranih merenja. Postoji više načina prikazivanja: po mernim grupama, samo jedan merni kanal, maksimalne temperature mernih grupa, karakteristične temperature i pet maksimalnih temperatura polova rotora. Generisanje izveštaja je takođe moguće za navedene kriterijume. Postoji korisnička forma za konfigurisanje parametara za merenje, kao i postavljanje opomenskih i havarijskih granica za sve merne kanale. Kada se ovi podaci tačno podese postaju stalni za određeni agregat. Poželjno je sačuvati navedene podatke. U slučaju pojave nekog defekta moguće je restaurirati prethodno ispravno stanje. Korisna je i mogućnost eksportovanja



Slika 6. Glavna radna maska korisničkog interfejsa



Slika 7. Vrednosti temperatura po polu (brojevi polova se skaliraju od 1 do 96)



Slika 8. Grafički prikaz vrednosti temperature

izmerenih podataka. Dobijeni fajlovi se mogu učitati u MS Excel, Matlab ili neki drugi program, gde se mogu crtati grafici, tabele, izvršiti matematičke analize i na osnovu njih kreirati izveštaji i donositi zaključci o održavanju i radu agregata.

Merno-upravljačka jedinica za merenje temperatura polova rotora (tačnije temperature sa površine bočnog dela namotaja rotora) šalje izmerene vrednosti temperature na osnovu zahteva za slanje koji je poslao program Rototemp. Nakon prijema svih podataka odgovara se sa porukom o uspešnom prijemu.

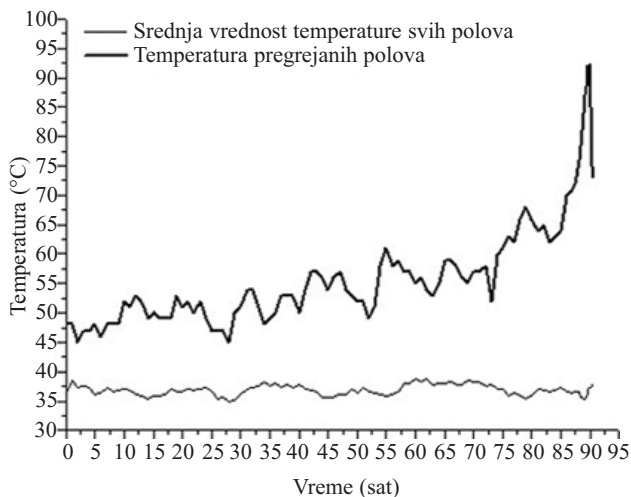
Za izradu programa je korišćen programski paket LabWindows/CVI [13], [14]. Zbog kompleksnosti sistema, velikog broja podataka koje je potrebno arhivirati, kao i potrebe za pretraživanjem tih podataka, bilo je neophodno kreiranje baze podataka koja je realizovana pomoću MySQL [15].

Komunikacija sa SCADA-om se odvija preko serijskog RS-485 interfejsa, prema *modbus* protokolu. Za serijsku komunikaciju postoje dve vrste prenosa podataka, RTU (*remote terminal unit*) i ASCII. U ovoj implementaciji je korišćena RTU varijanta *modbus* protokola, koja zahteva manje bajtova za identičnu poruku. SCADA je *master*, a program Rototemp je *slave* sa adresom 2. Postoji 296 analognih signala koji su smešteni u holding registre, kojima se pri prvom startovanju programa dodeljuju adrese za *modbus* komunikaciju. *Slave* adresa se učitava iz konfiguracionog fajla i moguće ju je menjati. Rezolucija očitavanja podataka je 500 ms.

5. REZULTATI

Rezultati rada mernog sistema su dobijeni iz njegove realne eksploatacije. Naredna slika (slika 9) prikazuje jedno predhavarijsko stanje prouzokovano pregrevanjem dva pola u toku rada agregata.

Na slici broj 9 je dat prikaz porasta temperature dva namotaja susednih polova (polovi broj 5 i 6) u vremenu od 90,5 sati. Srednja vrednost temperature



Slika 9. Prikaz predhavarijskog stanja zabeležen sistemom za temperaturni monitoring namotaja rotora

(donja kriva sa slike broj 9) ostalih polova se nije značajno promenila, odnosno, ostali polovi (broj polova je 96) su imali radnu temperaturu (oko 38 °C). Opomenski alarm (i zvučni signal i svetlosni signal) je podešen na 75 °C i uključio se u 88-om satu. Pre isteka 90-og sata je smanjena struja pobude agregata (sa nominalne struje od oko 2 200 A na 1 500 A), čime se postiglo i smanjenje temperature polova. Za poslednjih 30 minuta mernog ciklusa je temperatura pregrejanih polova spala ispod alarmne vrednosti na 73 °C kada je i zaustavljen agregat. Pregledom cevnog sistema koji služi za hlađenje polova je ustanovljeno začepljenje polova broj 5 i 6. Cevi su pročišćene i agregat je ponovo pušten u rad.

Kao sekundarni etalon, a za proveru rada mernog sistema, korišćena je termovizijska kamera

(Fluke Thermal Imager – Ti45), kojom je vršeno merenje i snimanje neposredno pre zaustavljanja generatora (slika 10). Emisivnost kamere je podešena na $\epsilon=0,9$.

Zaključak o rezultatima merenja je da je sistem odradio dobro jer je najtoplija temperatura pregrejanih polova, izmerena kamerom, bila 94 °C, a merni sistem je u radu izmerio najtopliju temperaturu od 92 °C.

6. ZAKLJUČAK

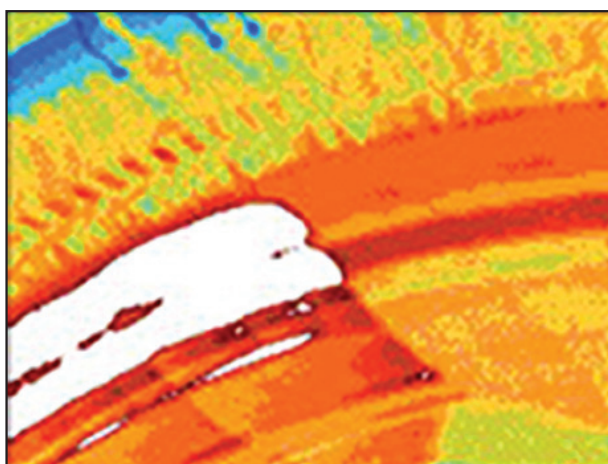
Osnovni cilj ovog rada je prikaz kompleksnog mernog sistema za daljinski monitoring temperature. Dat je prikaz novih softverskih i tehničkih rešenja upotrebom novorazvijenih programskih paketa za prikaz i akviziciju mernih procesa, konekcija sa SCADA sistemima, kao i rezultati rada sistema iz realne eksploatacije. Prikazan sistem za monitoring temperature namotaja polova rotora hidrogeneratora je rezultat domaćeg razvoja koji je uspešno realizovan u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Beogradu.

Realizovani sistem, baziran na tehnikama i tehnologijama kontinualnog praćenja, predstavlja jasan iskorak ka primeni savremenog koncepta održavanja po stanju, umesto starijih konceptata korektivnog i/ili preventivnog održavanja koji su dominantni u našoj tehničkoj praksi.

Prikazani sistem je realizovan na modularnom principu i otvoren je za dalju nadogradnju i povezivanje sa drugim sistemima. Ovo je ostvareno povezivanjem na nadređeni sistem upravljanja, SCADA-u. Time je omogućeno da ovaj sistem postane integralni deo upravljačko-informacionog sistema cele elektrane.



a)



b)

Slika 10. Rotor u radu sa nailazećim parom pregrejanih polova: (a) slika polova koji se vrte; (b) termalna slika nailazećih pregrejanih polova koji se vrte

Praktična dobit za HE Đerdap 2 se sastoji u tome da je stajanje agregata zbog intervencije „samo nekoliko sati”, a ranije je bilo 3 dana, kada se začepljenje pola utvrđivalo tek kad izgori izolacija namotaja pregrejanog pola i oseti miris paljevine. Sledila je zamena i vađenje pola na licu mesta (500 kg). Sa ovim novim sistemom nema potrebe za zamenom polova jer sistem za daljinski nadzor ne dozvoljava njihovo pregrevanje do uništenja, tako da je potrebno samo prođuvavanje i odčepljenje cevi koje su deo rashladnog sistema rotora.

6. LITERATURA

- [1] S. Milić: OPTICAL DEVICE OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT AND HOT BOX DETECTING, International Symposium on Optics East 2006, Boston, Massachusetts, USA, 1-4 October 2006.
- [2] S. Milić, M. Srećković: A STATIONARY SYSTEM OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT AND HOT BOX DETECTING, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 57, Issue 5, Sept. 2008, Pages: 2684-2694.
- [3] S. Milić, D. Kovačević, S. Đorđević, M. Srećković: SISTEM ZA PRAĆENJE TEMPERATURA OSOVINSKIH LEŽAJEVA TERETNIH KOLA U POKRETU, časopis Zajednice jugoslovenske elektroprivrede, ELEKTROPRIVREDA broj 1, januar-mart 2005, Srbija i Crna Gora.
- [4] S. Milić, D. Kovačević, A. Žigić, D. Misović: BEŽIČNI MERNI SISTEM ZA DALJINSKO MEREÑJE TEMPERATURA OSOVINSKIH LEŽAJEVA TERETNIH KOLA, 28. Savetovanje JUKO-CIGRE, Vrnjačka Banja, Srbija, 30. septembar-5. oktobar 2007, grupa B4, rad R B4-08.
- [5] Dušan Stamenković, MONITORING SISTEMI U ODRŽAVANJU ŽELEZNIČKIH VOZILA, XI naučno-stručna konferencija o železnici Želkon '04, Niš, 21-22. oktobar, 2004.
- [6] Varduca, Dan F., MONITORING SYSTEM FOR OVER TEMPERATURE DETECTION OF WATER COOLED ROTOR POLES OF HYDRO ELECTRICAL GENERATORS INSTALLED AT THE DANUBE RIVER IRON GATES POWER PLANT, in Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, vol. 2, 1996, Pages 1459-1464.
- [7] Miodrag V. Popović, DIGITALNA OBRADA SIGNALA, drugo izdanje, Nauka, Beograd, 1997.
- [8] John Park, Steve Mackay, Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems, Newnes an imprint of Elsevier, UK, 2003.
- [9] Nikola Miladinović, Saša Milić, Đorđe Stojić, Aleksandar Žigić, Mileša Srećković, RAČUNARSKI PROGRAM ZA AKVIZICIJU I MONITORING TEMPERATURA AGREGATA, konferencija ETRAN – Palić, 08-12. juna 2008.
- [10] Edmund Lai, Practical Digital Signal Processing for Engineers and Technicians, Newnes an imprint of Elsevier, UK, 2003.
- [11] Lars Wanhammar, DSP Integrated Circuits, London, Academic Press, UK, 1999.
- [12] A.C. Fischer-Cripps, NEWNES INTERFACING COMPANION, Elsevier Science, UK, 2002.
- [13] National Instruments Corporation, LABWINDOWS CVI USER MANUAL, USA, 1996.
- [14] National Instruments Corporation, LABWINDOWS CVI SQL REFERENCE MANUAL FOR WINDOWS 95/98/2000/XP, USA, 1998.
- [15] Luke Welling, Laura Thomson, PHP I MYSQL: RAZVOJ APLIKACIJA ZA WEB, 2005.

Rad je primljen u uredništvo 05. 09. 2008. godine



Saša D. Milić je rođen 1967. godine u Beogradu. Na smeru energetskih pretvarača sa energetskog odseka Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu diplomirao je 1993. godine i magistrirao 2000. godine. Doktorsku disertaciju je odbranio 2008. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Po diplomiranju se zaposlio u Elektrotehničkom institutu Nikola Tesla u Beogradu gde i danas radi. Bavi se merenjem niskofrekventnih i jednosmernih magnetskih polja, merenjem temperature i optoelektronikom. Do sada je objavio više naučnih radova u zemlji i inostranstvu. Rukovodilac je više razvojnih projekata u elektroprivredi i učestvuje na više naučnih projekata Ministarstva za nauku i tehnologiju.



Dragan S. Kovačević je rođen u Užicu 1957. godine. Elektrotehnički fakultet u Beogradu je završio je 1982. godine, gde je i magistrirao 1989. godine. Doktorirao je 1999. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu. Sa naučnim zvanjem viši naučni saradnik u Elektrotehničkom institutu Nikola Tesla je radio na poslovima direktora Centra Elektromerenja. Bavi se preciznim merenjima električnih, neelektričnih i magnetskih veličina. Od 2005. godine je generalni direktor Elektrotehničkog instituta Nikola Tesla i rukovodilac je više naučnih i razvojnih projekata.



Nebojša Karanović je rođen 1959. godine u Kačarevu. Osnovnu školu i gimnaziju završio u Negotinu, studije – Elektrotehnički fakultet – u Beogradu, odsek elektroenergetski sistemi, 1978-1983. godine. Zaposlen u „Hidroelektrane Đerdap“, od 1984. godine gde i sada radi. Učestvovao u izgradnji HE „Đerdap 2“, radio u službi održavanja, kasnije služba proizvodnje, napreduje od rukovodioca odeljenja, službe, zamenika direktora do direktora „HE Đerdap 2“.



Zoran Kršenković je rođen 1956. godine u Prištini, gde je završio Elektrotehnički fakultet smer energetski. U HE „Đerdap 2“ radi od 1985. godine, gde je učestvovao u puštanju u rad prvog agregata. Radio je na montaži generatora i ostale agregatne opreme, eksploataciji i održavanju iste. Bogato iskustvo u održavanju prenosio je na mlade kolege kao rukovodilac elektro izvršenja i kao pomoćnik direktora za održavanje.



Miša Kožićić je rođen 1974. godine u Kladovu. Osnovnu školu i gimnaziju je završio u Negotinu a studije – Elektronski fakultet u Nišu 1994-2001. godine kao diplomirani inženjer elektrotehnike – smer elektronika i telekomunikacije. Zaposlen je u HE „Đerdap 2“, od 2003. godine gde i sada radi na radnom mestu inženjera za elektroniku i telekomunikacije. Radi u službi održavanja. Posедуje licence odgovornog projektanta i izvođača radova 352, 353 i 453.

Tina Dašić i Branislav Đorđević

Modeliranje ekoloških procesa u akumulacijama hidroenergetskih sistema

Stručni rad

UDK: 519.87; 581.526.322; 627.81; 556.155

Rezime:

Sa stanovišta planiranja i eksploatacije hidroenergetskih sistema veoma je važno da se još u fazi projektovanja sagledaju i analiziraju dinamički procesi koji će se odvijati u akumulacijama, u vidu promena abiotičkih i biotičkih stanja tih akvatorija. Zbog toga se u novije vreme radi na sve složenijim matematičkim modelima tih dinamičkih procesa, kako bi se blagovremeno, još u fazi planiranja hidroenergetskih sistema sa akumulacijama, simuliralo njihovo ponašanje tokom vremena. Osnovni smisao tih simulacija je da se iznađu mere zaštite voda kojima se stanje kvaliteta akumulacije održava u nekim zahtevanim granicama kvaliteta. Time se ostvaruje ekološka stabilnost sistema, bitna za prihvatanje projektnih rešenja. U radu je obrađena problematika matematičkog modeliranja najbitnijih fizičkih, hemijskih i bioloških procesa koji utiču na kvalitet vode u budućoj akvatoriji. Prikazan je jedan spregnuti simulacioni matematički model WASP-GFBG za predviđanje dinamičkih promena kvaliteta vode. Mogućnost njegove primene je proverena na akumulaciji Barje na Veternici.

Ključne reči: akumulacije, kvalitet vode, matematički modeli, ekosistem

Abstract:

**MATHEMATICAL MODELLING OF ECOLOGICAL PROCESSES IN RESERVOIRS
OF HYDROENERGETIC SYSTEMS**

Prediction of dynamic changes of water quality in lakes and reservoirs is very important from the aspects of planning and exploitation of hydroenergetic systems. That is the main reason for increasing development of mathematical models of water quality. These models enable successful prediction of reservoir water quality even in system design phase. Main advantage of such simulations is ability to provide measures for reservoir water quality protection. The principles of mathematical modelling of main physical, chemical and biological processes that affect water quality are described. A complex mathematical model for water quality simulation – WASP-GFBG is presented in the paper. Model abilities are presented on the example of reservoir Barje on river Veternica.

Key words: water storage reservoirs, water quality, mathematical models, ecosystem

Doc. dr Tina Dašić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Prof. dr Branislav Đorđević, dipl. inž. građ., redovni član Akademije inženjerskih nauka Srbije.

1. UVOD

Pri planiranju hidroenergetskih sistema projekat tradicionalno dokazuje hidrološku, hidrauličku, geotehničku, konstrukcijsku, seizmičku, energetsku i ekonomsku stabilnost projektnog rešenja. Međutim, u novije vreme za prihvatanje projekta postaje izuzetno važno da se pored navedenih stabilnosti analiziraju, dokažu i javnosti prikažu i ekološka i socijalna stabilnost projekta [12]. Dva ključna pokazatelja pri dokazivanju ekološke stabilnosti projekata hidroelektrana sa akumulacijama raznih stepena regulisanja su: (a) garantovani ekološki protoci nizvodno od brana (problem razmatran u ovom časopisu, [13]), (b) analiza dinamike razvoja abiotičkih i biotičkih procesa u akumulaciji, kako bi se sagledala ekološka stanja u kojima će se jezero naći nakon određenog vremena [7], [22]. Sve više raste značaj istraživanja ekoloških zakonitosti, u cilju skladnog uklapanja hidrotehničkih sistema u ekološko okruženje već u početnim fazama njihovog planiranja [9]. Zbog toga je sada sastavni deo projekta hidroelektrana, istog značaja koji imaju hidraulički, konstrukcijski, energetski i ekonomski delovi projekta – ekološki elaborat, iz koga se ključni rezultati na odgovarajući način unose i u Prethodnu studiju opravdanosti (nakon Generalnog projekta), odnosno, u Studiju opravdanosti, na osnovu koje se donosi investiciona odluka.

Jedna od ključnih analiza u okviru ekoloških projektnih aktivnosti je razmatranje dinamizma promena u vodenim ekosistemima nakon uspostavljanja novih stanja. Cilj tog dela projekta je iznalaženje valjanih rešenja – dispozicionih i upravljačkih – kojima se ekološki procesi u sistemu koji se projektuje održavaju u nekim željenim stanjima. U slučaju akumulacija postavlja se sve odlučniji zahtev da se merama zaštite izbegnu pojave eutrofikacije [6] koja dovodi do degradiranja vodenih ekosistema, ne samo u zoni uspora, već i nizvodno od postrojenja. Da bi se takav nepovoljan razvoj procesa izbegao, neophodno je da se apriori, još tokom planiranja, modelira razvoj ekoloških procesa u akvatorijama sistema, kako bi se projektno definisale i mere kojima se vodeni sistemi održavaju u poželjnim oligotrofnim, ili prihvatljivim mezotrofnim stanjima [7], [14].

Primenom matematičkog modeliranja procesa u sistemima definitivno je odbačen raniji sve opasniji koncept upravljanja „eksperimentom na realnom sistemu”, koji je bio najprisutniji upravo u ekološkoj sferi planiranja. Sada se polazi sa pozicije da se sva planiranja na vodama, posebno u slučaju značajnih promena vodnih režima, moraju blagovremeno proveriti matematičkom simulacijom. Time je fundirana nova oblast hidrotehnike koja se može definisati

kao Ekologija hidrotehničkih sistema. To postaje posebna grana Ekološke kibernetike, koja koristi kibernetičke metode (posebno metode operacionih istraživanja) za matematičku formalizaciju, modeliranje i estimaciju svih bitnih procesa u ekosistemima.

Iako veoma značajan, aspekt kvaliteta vode i njegovog modeliranja se tek poslednjih decenija intenzivnije razvija i primenjuje. Osnovni razlog za to je složenost dinamike fizičkih, hemijskih i bioloških procesa u jezerskim ekosistemima, koji se tek na ovom stepenu razvoja nauke i računarske tehnologije mogu adekvatno sagledati i matematički modelirati. Drugi razlog je sučeljavanje tri procesa: intenzivno zagađivanje voda, ograničene mogućnosti njenog samoprečišćavanja, sve stroži zahtevi u pogledu kvaliteta vode u hidrotehničkim sistemima.

Modeliranje procesa u vodenim ekosistemima započelo je još 1925. godine kada su Striter i Felps definisali prve jednačine ravnoteže rastvorenog kiseonika u vodi, što se smatra početkom modeliranja kvaliteta vode. U početku su razvijani jednodimenzionalni matematički modeli (MM), a tokom vremena je rastao nivo složenosti modela, kako po broju razmatranih parametara, tako i po prostornom obuhvatu. Razvijane su tri klase MM: abiotički, biotički i spregnuti modeli. Na početku ovih istraživanja najbrže se razvijala klasa abiotičkih modela, iz dva razloga. Prvi je pragmatičan razlog – želja da se odrede samo stanja kvaliteta vode, zavisno od kvaliteta vode na ulazima, kako bi se odabrala odgovarajuća tehnološka linija u postrojenjima za prečišćavanje vode. Drugi je povezan sa klasom složenosti: abiotički procesi analitički su znatno određeniji, jer se zasnivaju na analizi transportnih i difuzionih procesa, te se kao takvi mogu svrstati u klasu dobro strukturiranih zadataka. Biotički MM se svrstavaju u klasu teško strukturiranih zadataka [6], za koja su potrebna daleko složenija istraživanja „in situ”, posebno u domenu sagledavanja koakcija pojedinih bioloških vrsta. Spregnuti MM, koji se razvijaju u novije vreme, zahvaljujući tehnološkim mogućnostima novih računara, istovremeno modeliraju sve akcije, reakcije i koakcije u ekosistemu.

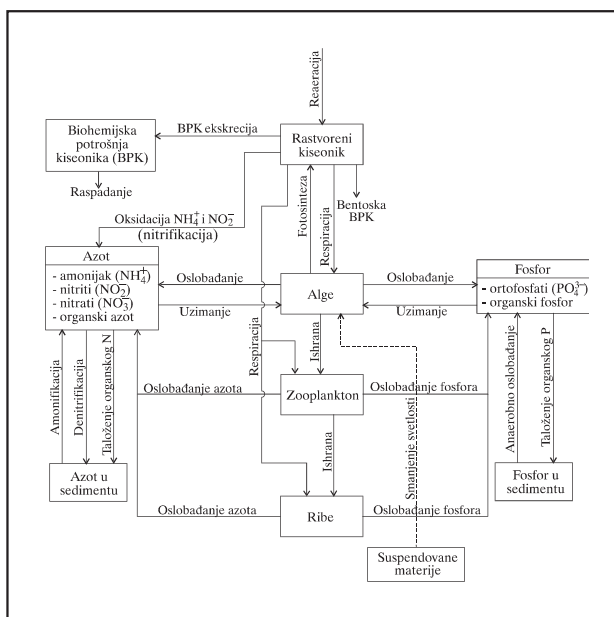
2. PROCESI U JEZERIMA I NJIHOVO MODELIRANJE

Dinamičke promene u akvatoriji započinju već samim činom punjenja akumulacije. Novi ekosistem, nastao formiranjem akumulacije, započinje složeni proces sukcesija, koji prevashodno zavisi od unosa hranljivih materija – nutrijenata. Ti procesi, abiotičkog i biotičkog karaktera, međusobno su čvrsto povezani, jer se u akvatoriji neprekidno odigravaju procesi akcija (uticaj biotopa na biocenozu), re-

akcija (obratni proces, kojim biocenoze utiču na biotop) i koakcija (interakcije između vrsti i populacija biocenoza). Taj proces sukcesija odvija se uz delovanje čitavog niza pozitivnih i negativnih povratnih sprega [7], kojima se vodeni ekosistem najzad stabilizuje na nekom kvazistabilnom homeostatskom platou (klimaksno stanje), sve dok se prirodnim ili antropogenim delovanjem ne izmene uslovi u ekosistemu.

Veliku složenost procesa u vodenom ekosistemu dobro odslikava čak i uprošćena šema procesa i interakcija (slika 1). Zapaža se da su svi abiotički i biotički procesi međusobno povezani u zatvorenim petljama: biotop ⇒ biocenoze ⇒ biotop, tako da nije svrsishodno modeliranje samo nekih izdvojenih parametara kvaliteta. Savremena modelska tehnika i računarska tehnologija omogućavaju da se realizuju spregnuti matematički modeli, kojima se simultano modeliraju svi dinamički procesi u vodenom ekosistemu koji su relevantni za sagledavanje abiotičkih i biotičkih komponenti u procesu sukcesija, zaključno sa dostizanjem klimaksnog stanja. Ti modeli su postali u toj meri operativni da omogućavaju brze simulacije ponašanja ekosistema za različite ulaze nutrijenata, što omogućava da se sagleda uticaj planiranih mera zaštite, čiji je cilj da se akvatorije održavaju u nekom unapred definisanom stanju trofije.

Jedan od spregnutih modela je model WASP-GFBG [21], koji je upotpunjen na Građevinskom fakultetu u Beogradu, zbog čega je i dodata oznaka GFBG. Model omogućava da se modeliraju abiotički i biotički procesi u akumulacijama, i da se aprior-



Slika 1. Šematski prikaz procesa i interakcija u vodenom ekosistemu

no, tokom projektovanja sistema, sagleda dinamizam svih procesa, kao i stanje u kome će se vodeni sistem naći nakon određenih faza svog razvoja. To je veoma bitno za projektovanje svih objekata sa akumulacijama, jer omogućava da se odrede dispozicione mere, kao i mere zaštite i upravljanja koje treba primeniti da bi se akvatorije održavale u poželjnim ekološkim stanjima. Upravo iz tih razloga se taj analitički aparat i prikazuje u ovom časopisu, kako bi se ostvarivanjem i tog aspekta ekološke stabilnosti projekata stvorili povoljniji uslovi za realizaciju hidroelektrana. Ovaj model je korišćen za predviđanje kvaliteta vode u akumulacijama: Barje na reci Veternici, Svračkovo na Rzavu i dr.

2.1. Abiotičke komponente procesa

Abiotički procesi u vodenim ekosistemima modeliraju se zakonom održanja kvaliteta / hidrauličkog transporta, koji, sveden na jedinicu zapremine fluida, ima sledeći najopštiji oblik:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial (K \cdot u_j)}{\partial x_j} = R \quad (1)$$

Prvi član označava lokalnu vremensku, a drugi konvekcijsku promenu nekog kvalitativnog pokazatelja (K), dok je R uzročnik tih promena, u koji su uključeni svi izvori i ponori tog elementa kvaliteta usled procesa transformacije, x_j – prostorna koordinata ($j=1,2,3$), u_j – komponente brzine u tački. Iz te opšte relacije izvode se sistemi jednačina kojima se opisuje dinamizam promene pojedinih komponenti kvaliteta, pre svega koncentracije pojedinih agenasa u vodi.

Hidrodinamički režim. Proces advektivnog i disperzivnog transporta kojima se komponente kvaliteta pronose kroz vodu kao biotop mogu se definisati u trodimenzionalnom obliku [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (U_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (U_z C) - \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (E_z \frac{\partial C}{\partial z}) = \Sigma S \quad (2)$$

gde je: C – koncentracija neke od abiotičkih komponenti kvaliteta (g/m^3), U_x, U_y, U_z – podužna, poprečna i vertikalna brzina advektivnog transporta (m/s), E_x, E_y, E_z – podužni, poprečni i vertikalni difuzioni koeficijenti (m^2/s), ΣS – suma tačkastih i rasutih izvora / ponora, graničnih opterećenja na uzvodnoj, nizvodnoj, bentoskoj i granici sa atmosferom, i hemijskih i/bi biohemijskih transformacija komponenti kvaliteta vode ($g/m^3 \cdot dan$).

Uzročnici advektivnog transporta u jezeru su, pre svega, ulazni i izlazni tok vode, dejstvo vetra na vodenu površinu i talasa koje on izaziva. Uticaj ulaznog i izlaznog toka može biti vrlo značajan u akumulacijama sa manjim stepenom regulisanja, što je čest slučaj kod kaskadnih hidroelektrana.

Disperzivni transport ima veliki uticaj na transport komponenti kvaliteta i na transfer toplote (energije). Vertikalni disperzivni transport opisuje procese vertikalnog mešanja i definiše se preko koeficijenta difuzionog strujanja E_v . U prirodnim uslovima te vrednosti se kreću u granicama 10^{-4} do 10^{-2} cm^2/m [16]. Veličina koeficijenta vertikalnog disperzivnog transporta se menja sa promenom dubine: minimalne su u zoni termoklina i blizu dna, a maksimalne u sloju epilimniona, što je rezultat dejstva vetra na vodenu površinu. Horizontalni disperzivni transport je, generalno, veći od vertikalnog za nekoliko redova veličina i kreće se u granicama od 10^4 do 10^6 cm^2/s [27]. Empirijske relacije za te koeficijente ovde se ne daju [2].

Temperaturni uticaj. Fenomen temperaturnih promena u jezerima je dobro proučen i ovde se neće detaljnije tretirati. Formiranje termičke stratifikacije ima veliki uticaj na procese u jezeru. Jezera na našem klimatskom području spadaju u grupu dimiktičnih jezera [15], jer imaju dva perioda mešanja vode (prolećni i jesenji) i dva perioda stagnacije (leto i zima). Potpuna stratifikacija je u drugoj polovini leta, kada se jasno razgraničavaju epilimnion (temperatura oko 20-25 °C), metalimnion, sa velikim gradijentima i hipolimnion, sa temperaturom od 4-10 °C, zavisno od dubine jezera. Podložnost jezera termičkoj stratifikaciji može se odrediti preko Frudovog broja termalne stratifikacije, čijom se modifikacijom dolazi do pokazatelja stratifikacije PS [6]

$$PS = 320 \cdot \frac{QL}{VH} \quad (3)$$

gde su: Q – srednji godišnji protok (m^3/s), L – dužina akumulacije (m), V – zapremina akumulacije (m^3), H – srednja dubina akumulacije. Vrednost $PS < 0,1$ ukazuje da će akumulacija sigurno biti izrazito stratifikovana (duboke akumulacije sa malim izmenama vode), $PS > 1$ pokazuje da neće doći do stratifikacije (slučaj plitkih akumulacija, sa velikim izmenama vode), dok se u slučaju $0,1 < PS < 1$ može očekivati slabije izražena stratifikacija.

Parametri hemijskih i bioloških procesa (rastvoreni kiseonik, biohemijska potrošnja kiseonika, dinamika fito i zooplanktona, itd.) zavise od temperature, zbog čega je veoma bitno da se modelom što realnije opiše dinamizam temperature u jezeru. Temperaturne promene u vodenom ekosistemu nastaju

razmenom sunčeve energije na slobodnoj vodenoj površini. Od više mogućih pristupa, najrealniji je pristup za određivanje toplotnog fluksa na osnovu meteoroloških podataka, po kome se opšta jednačina toplotnog fluksa na granici voda – vazduh definiše u obliku [27]

$$\Phi_N = \Phi_{SN} + \Phi_{AT} - \Phi_{WS} - \Phi_E \pm \Phi_H \quad (4)$$

gde su: Φ_{SN} – fluks čistog solarnog zračenja, Φ_{AT} – fluks čistog atmosferskog zračenja, Φ_{WS} – fluks zračenja sa vodene površine, Φ_E – toplotni fluks isparavanja sa vodene površine, Φ_H – promenljiv toplotni fluks. Sve komponente iz (4) definišu se empirijskim relacijama dobijenim na bazi merenja [27], te se ovde neće navoditi.

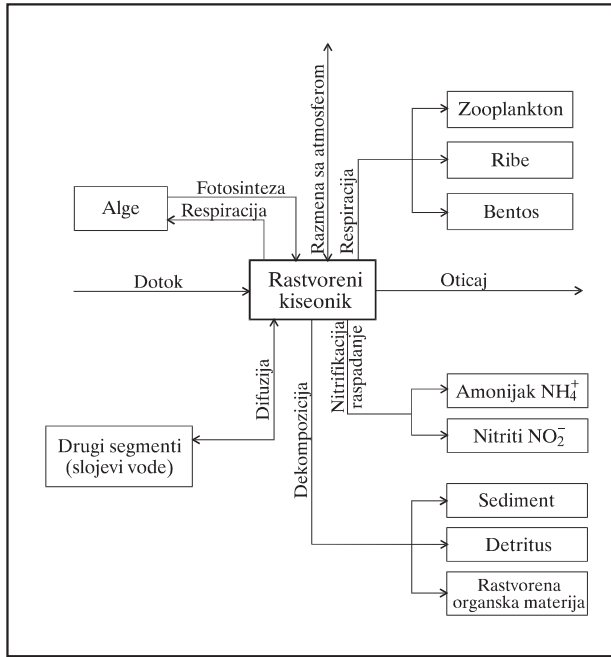
Rastvoreni kiseonik. Ključni pokazatelj kvaliteta vode u jezeru i indikator njegovog „zdravlja” je koncentracija rastvorenog kiseonika i dinamika njegove promene. Od kiseonika zavise hemijski i biološki procesi u jezeru: učestvuje u hemijskim i biohemijskim reakcijama oksidacije organskih i neorganskih materija, dok ga živi svet uzima iz vode u procesu respiracije. Osnovni izvor rastvorenog kiseonika je kiseonik iz atmosfere, koji se rastvara u vodi procesom aeracije i fotosinteze koju obavljaju alge. Zato je koncentracija rastvorenog kiseonika najveća na površini i opada sa dubinom. Ako ima dovoljno rastvorenog kiseonika – odvijaju se aerobni procesi (respiracija, nitrifikacija, itd.). Ako u najdubljim slojevima nema kiseonika, ta voda se nalazi u septičkom stanju i u njoj se odigravaju anaerobne razgradnje, pri čemu se oslobađaju razni gasovi (metan CH_4 , hidrogen sulfid H_2S , amonijak NH_3 , i dr.). Pored promene ukusa vode, ovi gasovi mogu biti i toksični (H_2S), tako da se narušava kvalitet celog vodenog ekosistema.

Postoji funkcionalna veza rastvorenog kiseonika pri saturaciji (C_s) i temperature vode. Od više empirijskih relacija najčešće se koristi sledeća (Rič, 1973) [16]

$$C_s = 14,652 - 0,410 22 T + 0,007 991 T^2 - 7,777 74 10^{-5} T^3 \text{ (mg/L)} \quad (5)$$

gde je T – temperatura vode (°C). Koncentracija rastvorenog kiseonika može se odrediti kao razlika između proizvedenog kiseonika i kiseonika utrošenog za obavljanje raznih procesa, što je prikazano na slici 2.

Proces razmene kiseonika između atmosfere i vode (reaeracija) kroz kontaktnu površinu vazduh – voda, i potrošnja rastvorenog kiseonika pri biohe-



Slika 2. Izvori i ponori rastvorenog kiseonika u vodi

mijskoj razgradnji modelira se jednačinom bilansa kiseonika Striter-Felps (videti: [23], dok se promena koncentracije rastvorenog kiseonika, usled fotosinteze i respiracije, definiše relacijom [2]

$$dC/dt = (\alpha_1 \mu - \alpha_2 \rho) A \quad (6)$$

gde su: C – koncentracija rastvorenog kiseonika ($\text{mg O}_2/\text{L}$), μ – koeficijent specifičnog rasta algi (1/dan), ρ – koeficijent respiracije algi (1/dan), A – biomasa algi ($\text{mg algi}/\text{L}$), α_1 – proizvodnja kiseonika po jedinici mase algi ($\text{mg O}_2/\text{mg algi}$), α_2 – potrošnja kiseonika po jedinici mase algi ($\text{mg O}_2/\text{mg algi}$).

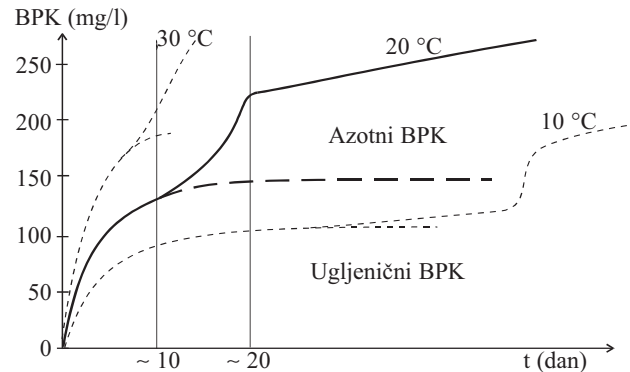
Biohemijska potrošnja kiseonika. Biohemijska potrošnja kiseonika (BPK), kao količinski pokazatelj rastvorenog kiseonika koji se potroši u procesu razgradnje organske materije, pri oksidaciji redukovanih azotnih jedinjenja i oksidaciji jona metala, ima dve komponente, ili dve faze potrošnje: ugljenienu i azotnu. Ugljenienu komponenta / faza koja traje desetak dana na 20 °C razgrađuje samo materije koje ne sadrže azot, uglavnom ugljene hidrate, pa se često naziva fazom dekarbonizacije. Karakteriše je progresivno opadanje prirasta BPK tokom vremena i asimptotsko približavanje graničnoj vrednosti (slika 3, [23]). Brzina dekarbonizacije je proporcionalna koncentraciji organske materije koja se oksidiše, pa se najčešće simulira jednačinom [2]

$$-dL_c/dt = k_D \cdot L_c \quad (7)$$

gde su: L_c – koncentracija rastvorljive organske materije izražena preko koncentracije kiseonika potrebnog za njenu oksidaciju (mgO_2/L), k_D – koeficijent brzine reakcije (1/dan), čija se vrednost dobija isključivo merenjem in situ. Koeficijent k_D zavisi od temperature, pri čemu postoji funkcionalna veza

$$k_D = k_D(20^\circ\text{C}) \theta^{(T-20)} \quad (8)$$

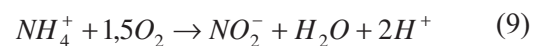
gde je: θ – temperaturni koeficijent, koji ima vrednost 1,047 za T između 20 do 30 °C.



Slika 3. Promena BPK tokom vremena, po komponentatama

Azotna komponenta BPK najčešće se (za temperature oko 20 °C) javlja nakon desetak dana, i traje 40-50 dana. Karakteriše je nagli porast BPK, koji traje oko 10 dana, nakon čega se stabilizuje (slika 3). U toj fazi dolazi do oksidacije azotnih jedinjenja, uz znatnu potrošnju rastvorenog kiseonika. Taj proces nitrifikacije se odvija u dve faze:

– U prvoj fazi vrši se oksidacija amonijaka u nitrite, uz pomoć bakterije *Nitrosomonas*



– U drugoj fazi vrši se oksidacija nitrita u nitrate, uz pomoć bakterije *Nitrobacter*



Proces nitrifikacije može se definisati i kao kompletan proces

$$dL_N/dt = k_N L_N \quad (11)$$

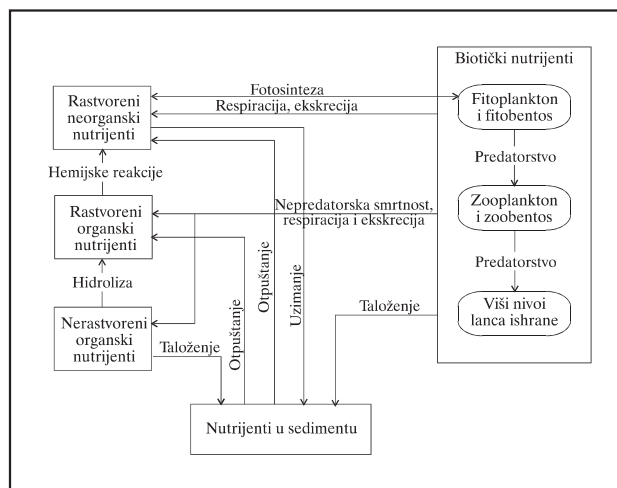
gde su: L_N – azotna komponenta biohemijske potrošnje kiseonika, izražena preko koncentracije rastvorenog kiseonika potrebnog za oksidaciju ukupnog azota (organskog, u nitritima i nitratima), k_N – koeficijent smanjenja azotne BPK (koeficijent nitrifikacije) (1/dan). Koeficijent k_N zavisi od temperature po relaciji iste strukture kao (8).

Zahtevi za kiseonikom u sedimentu rezultat su respiracije faune dna i biološke razgradnje organskog mulja istaloženog na dnu. Zavisе od stepena difuzije kiseonika u sediment, gde se zatim troši i od stepena vraćanja redukovane organske materije u vodeni stub, gde se zatim oksidiše. Zahtevi sedimenta za kiseonikom mogu se definisati u obliku [11]

$$dC/dt = -SOD/H \quad (12)$$

gde su: C – koncentracija rastvorenog kiseonika u vodi iznad sedimenta (mgO_2/L), H – dubina vode, SOD – zahtev za kiseonikom u sedimentu ($\text{mgO}_2/\text{m}^2\text{dan}$), za koje postoje empirijske relacije za određivanje [2], u funkciji temperature, koncentracije rastvorenog kiseonika na granici faza voda – sediment, karakteristika sedimenta i dr.

Nutrijenti. Nutrijenti – hemijski elementi koji se unose u vodenu sredinu, na kojima, kao hranljivim materijama, počiva razvoj živog sveta u vodi, shodno poznatim ekološkim zakonitostima kruže u ekosistemu usled delovanja hemijskih, biohemijskih i bioloških procesa. Taj generalni proces kruženja nutrijenata prikazan je na slici 4. Zapaža se da se oni u vodi javljaju u nekoliko formi: rastvoreni neorganski, rastvoreni organski, nerastvoreni organski nutrijenti, nutrijenti u sedimentu i biotički nutrijenti. Zapaža se da u procesu kruženja materije u ekosistemu nutrijenti tokom vremena prelaze iz jedne forme u drugu.



Slika 4. Kruženje nutrijenata u vodenom ekosistemu

Razvoj fitoplanktona neposredno zavisi od količine nutrijenata u vodi, a pošto su oni početna karika u lancu ishrane, od raspoloživih nutrijenata zavisi i dinamika razvoja svih biocenoza u jezeru.

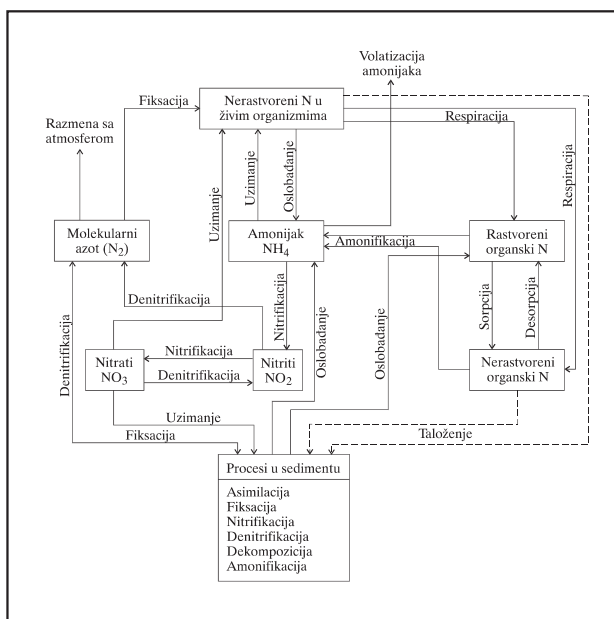
Od velikog broja nutrijenata najvažniji su ugljenik, azot, fosfor, kalijum i silicijum (ovaj poslednji za alge dijatome). Pored tih makronutrijenata, u procesu kruženja materije postoji i niz mikronutrijenata (gvožđe, mangan, bakar, cink, molibden, itd.), koji su potrebni u malim količinama, ali koji, shodno Liebigovom zakonu minimuma (detaljnije: [6]), mogu da predstavljaju limitirajuće faktore razvoja biocenoza. U matematičke modele ne unosi se ugljenik, jer on ne predstavlja ograničavajući faktor rasta, a to nisu ni mikronutrijenti, jer i njih, po pravilu, ima dovoljno u vodenim sredinama, te bi njihovo razmatranje samo opterećivalo MM.

Rast algi u jezeru limitiran je količinom neorganskih azotnih i fosfornih jedinjenja, pa se u MM kvaliteta obično razmatra samo dinamika ta dva nutrijenta. Rastvoreni organski i neorganski nutrijenti se u akumulacije unose iz spoljne sredine (površinskim oticajem i erozivnim odnošenjem nutrijenata iz zemljišta, otpadnim vodama, produktima razgradnje organskih materija u slivu, itd.), kao i procesima u samom vodenom sistemu (razlaganje organske materije u detritusu i sedimentu, hidroliza rastvorenih organskih materija, itd.). Rastvorene organske nutrijente bakterije apsorbuju, pa ih posredstvom endoenzima razlažu. Neke vrste bakterija mogu da žive samo pod uslovom da u vodi ima dovoljno rastvorenog kiseonika. To su aerobne bakterije, koje vrše biohemijsku oksidaciju organske materije trošeći rastvoren kiseonik. Kao produkt razlaganja nastaje rastvorena neorganska materija. Te rastvorene neorganske nutrijente iz vode uzimaju alge u procesu fotosinteze – primarne produkcije, ugrađuju ih u biomasu, koja na taj način postaje izvor biotičkih nutrijenata za ostale organizme u lancu ishrane.

Izumiranjem i putem ekskrecije živih organizama organski nutrijenti dospevaju u sediment gde ih razlažu bakterije. Ako u zoni dna vladaju anaerobni uslovi, razlaganje vrše anaerobne bakterije i krajnji produkti su gasovi (metan, nitriti, sulfidi i dr.) koji odlaze u atmosferu i humus, koji služi kao hrana biljkama. Ako na dnu vladaju aerobni uslovi, kao krajnji produkt razlaganja nastaju nitrati, amonijak, ugljendioksid, sulfati – a to su rastvoreni neorganski nutrijenti koji su neophodni algama.

Opisano kruženje nutrijenata u vodenim ekosistemima veoma je složen proces, koji zavisi od niza fizičkih, hemijskih i bioloških faktora. Opisuje se jednačinama održanja mase, koje se izvode iz poznatih dinamičkih jednačina promene stanja sistema, i koje se matematički formalizuju za svaku od formi javljanja nutrijenta [2], te se ovde ne navode. Ovde se sažeto prikazuju procesi kruženja azota i fosfora, jer su to najbitnije komponente abiotičkih procesa.

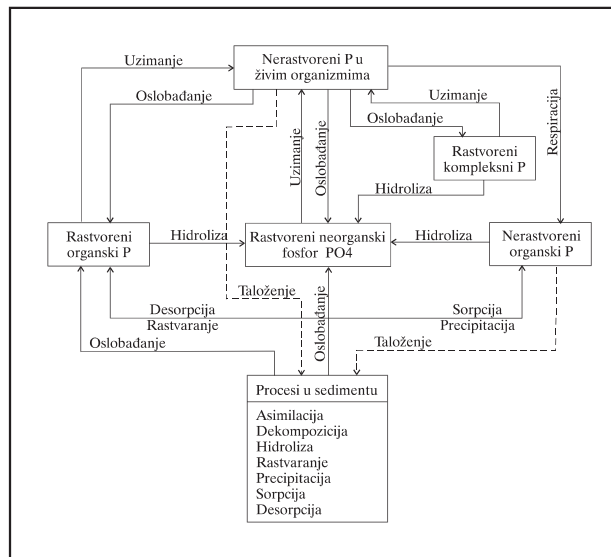
Azot, koji je neophodan za proces biosinteze u okviru primarne produkcije, alge mogu da uzmu u obliku amonijačnih soli i nitrata, ili fiksacijom molekularnog azota (N_2) koju vrše modro – zelene alge. Zbog tog drugog načina nadoknađivanja, azot uglavnom ne predstavlja ograničavajući faktor bioprodukcije u vodenim sistemima. Azot se u vodu vraća putem ekskrecije i umiranjem živih organizama. Jedan deo detritusa se mineralizuje, a ostatak taloženjem dospeva u sediment, u kome se odvijaju procesi nitrifikacije, razlaganja, fiksacije i dr. Iz sedimenta azot odlazi u obliku amonijaka, koji se dalje može nitrifikovati do nitrata, koji alge koriste u procesu bioprodukcije (slika 5). Nitrifikacija zavisi od količine kiseonika, ali na nju utiče i pH vrednost vode, koja pri vrednostima $7 > \text{pH} > 9$ sprečava rast bakterija *Nitrosomonas* i *Nitrobacter*. Denitrifikacija je proces redukcije nitrata i nitrita do azota (N_2) i ostalih gasova (N_2O , NO). Taj proces ostvaruju anabrobne bakterije, denitrifikatori, kao i razne heterotrofne aerobne bakterije.



Slika 5. Kruženje azota u vodenom ekosistemu

Fosfor alge usvajaju u obliku ortofosfata. Kontrola fosfora je najefikasniji način za kontrolu primarne produkcije i usporavanje procesa eutrofikacije, zbog čega je on predmet posebne brige pri modeliranju i traženju adekvatnih mera zaštite akumulacije. Zato bi jedan od ključnih slogana zaštite akumulacija mogao da bude: **Kontroliši i smanji unos fosfora!** Fosfor se u vodu vraća ekskrecijom i umiranjem živih organizama. Jedan deo organskog fosfora se hidrolizom vraća u rastvoreni neorganski oblik (ortofosfate), a ostatak taloženjem dospeva u sedi-

ment, gde se odigravaju procesi asimilacije, razgradnje, hidrolize, rastvaranja, desorpcije, tako da se rastvoreni organski i neorganski fosfor vraća u vodu masu i ponovo služi kao hrana algama, čime se zatvara ciklus kruženja fosfora (slika 6).



Slika 6. Kruženje fosfora u vodenom ekosistemu

2.2. Biotičke komponente procesa

Biocenoze (živi svet) akvatorije su u najtešnjoj interakciji sa biotopom, od čijih kvalitativnih parametara neposredno zavise. Vrednosti abiotičkih parametara vodenog ekosistema neposredno se odražavaju na primarnu produkciju fitoplanktona / algi, te se preko njih, kao početne karike u trofičkom lancu, prenose na čitavu životnu zajednicu akvatorije. Možda je to bio razlog što je dosta dugo u MM kvaliteta vode od biotičkih komponenti modeliran uglavnom samo fitoplankton, dok se od ostalih karika trofičkog lanca odustajalo, zbog složenih veza u trofičkom lancu. U okviru MM WASP-GFBBG učinjen je napor da se modelom obuhvati i zooplankton, a da se ujedno daju matematički elementi za modeliranje i ihtiofaune, u uslovima antropogeno usmeravanih sukcesija.

Postojanje određenih biljnih i životinjskih vrsta, kao i sastav i struktura njihovih zajednica ukazuje na stepen trofije, odnosno na fazu razvoja vodenog ekosistema [24]. Naime, utvrđeno je da se pojedini hidrobioniti pojavljuju u vodama određenog kvaliteta, tako da je već sama njihova pojava odličan indikator kvaliteta vode. Takve biljne i životinjske vrste označene su kao *bioindikator*. Tako su alge *Achnanthes minutissima*, *Diatoma hyemalis*, *Diatoma mesodon*, *Cymbella affinis* indikatori čistih, oligotrofnih voda, dok se za vodu u kojoj se pojavljuju al-

ge *Closterium ehrenbergii*, *Nitzschia acicularis*, *Fragillaria ulna* može reći da je višeg stepena zagađenja [28]. Slično, pojava određenih vrsta zooplanktona, makrofita i riba iz porodice *Salmonidae* ukazuje na vodu najvišeg kvaliteta, bogatu kiseonikom. Zbog toga modeliranje biotičkih procesa zavisi od abiotičkih komponenti, kao što su temperatura, pH, koncentracija rastvorenog kiseonika, sadržaj nutrijenata, kao i od biotičkih parametara, kao što su homeotipske i heterotipske koakcije. Modelom WASP-GFGB obuhvaćena je kompletna dinamika fito- i zooplanktona, dok je ihtiofauna razmatrana generalno i uslovljeno, za slučaj da se u akvatorijama iniciraju antropogeno usmeravane sukcesije – poribljavanjem u skladu sa prognoziranim kvalitetom jezera kao biotopa.

Fitoplankton – alge. Fitoplankton / alge svojim dinamizmom razvoja najneposrednije odražavaju stanje kvaliteta neke akvatorije. Dobro modeliranje dinamizma razvoja algi važno je iz više razloga:

- Primarna produkcija algi predstavlja najveću komponentu ukupne primarne produkcije u jezeru. Kao prva karika u lancu ishrane ona odlučujuće utiče na razvoj svih akvatičnih biocenoza.
- Sezonske varijacije brojnosti algi, kao i dinamizam procesa fotosinteze danju i respiracije noću, jedan su od bitnih uzročnika promena sadržaja kiseonika u jezeru. One dovode do saturacije (ili čak supersaturacije) kiseonika u površinskim slojevima vode, dok su taloženje i razgradnja uginulih algi glavni uzrok povećanja BPK i smanjenja rastvorenog kiseonika u hipolimnionu.
- Alge tokom rasta troše i uklanjaju rastvorene neorganske materije iz vode, dok je razlaganje uginulih algi glavna komponenta u kruženju nutrijenata.
- Alge su jedan od glavnih uzročnika smanjenja providnosti vode, što odlučujuće utiče na niz drugih vrsta biocenoza. Velika koncentracija algi može da ugrozi razvoj niza drugih vrsti.
- Alge pogoršavaju miris i ukus vode, a sa povećanjem njihove brojnosti postaju složeniji i skuplji sistemi za prečišćavanje vode za piće, ukoliko se voda za te svrhe zahvata iz akumulacija.
- Povećanje brojnosti algi pogoršava uslove za korišćenje jezera u rekreacione svrhe.

U MM alge se modeliraju ili preko ukupne biomase, ili, što je slučaj u razmatranom MM, preko koncentracije suve biomase, odnosno preko nekog od ključnih konstituenata žive ćelije kao što su hlorofil a, ugljenik, azot ili fosfor. Prirast algi opisuje se jednačinom

$$dA/dt = (\mu_a - r_e - e_x - s - m)A - G \quad (13)$$

gde su: A – ukupna biomasa algi, izražena preko nekog pokazatelja (hlorofil a, ugljenik, suva biomasa algi) (mg/L), μ_a – brzina rasta populacija algi (svi članovi u zagradi: 1/dan), r_e – koeficijent respiracije, e_x – koeficijent ekskrecije, s – brzina taloženja, m – nepredatorska smrtnost, G – gubici biomase algi usled predatorske smrtnosti (mg/L·dan). Brzina rasta algi je funkcija temperature, intenziteta svetlosti i koncentracije raspoloživih nutrijenata, a najčešće se definiše u obliku [2]

$$\mu_a = \mu_{max}(T_{ref}) \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(C, N, P, S_i) \quad (14)$$

gde su: $\mu_{max}(T_{ref})$ – maksimalna brzina rasta populacije algi pri nekoj referentnoj temperaturi, koja je obično 20 °C (1/dan), f(T) – limitirajući faktor brzine rasta usled temperature, koji uzima vrednost $0 < f(T) < 1$, f(I) – limitirajući faktor brzine rasta usled intenziteta svetlosti, koji uzima vrednost $0 < f(I) < 1$, f(C, N, P, S_i) – limitirajući faktor rasta usled koncentracije raspoloživih nutrijenata (označenih u zagradi). Faktori f(T) i f(I) opisuju se na način kako se opisuju ekološki faktori (imaju donju i gornju granicu i zonu optimuma, konkretni oblici u: [2]). Faktori rasta usled koncentracije nutrijenata opisuju se Mondovim jednačinama

$$f(NUT) = C_{NUT} / (K_s + C_{NUT}) \quad (15)$$

u kojima C_{NUT} predstavlja koncentraciju nutrijenta NUT, i to one njegove forme koje koriste alge pri svom razvoju, K_s – polusaturaciona konstanta, odnosno koncentracija forme nutrijenta (C_{NUT}) pri kojoj alge dostižu polovinu maksimalnog rasta.

Iz strukture jednačine (14) uočava se da jedan nutrijent može da predstavlja ograničavajući faktor rasta algi, ukoliko se spusti ispod granice minimuma, u skladu sa Liebigovim zakonom minimuma. To su obično azot i fosfor. Analizama [1] je utvrđeno da je polusaturaciona konstanta azota (zbir amonijačnog i nitratnog azota) petnaestak puta veća od odgovarajuće konstante za fosfor (ortofosfat: P- PO_4^{3-}). Ukoliko je

$$(N - NO_4^+ + NO_3^-) / (P - PO_4^{3-}) > 15 \quad (16)$$

limitirajući faktor rasta algi je raspoloživi neorganski fosfor. Ta činjenica pruža povoljne mogućnosti da se striktnim limitiranjem unosa fosfora u vodenu sredinu zaustave i kontrolišu procesi pogoršavanja kvaliteta vode u jezerima. Upravo iz tih razloga se u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda često predviđa dodatno uklanjanje fosfora, kao mera zaštite nizvodnih akumulacija.

Zooplankton je druga karika u lancu ishrane u jednom vodenom ekosistemu, jer se hrani fitoplanktonom. Zbog toga njihova dinamika razvoja na određen način prati razvoj fitoplanktona, kasneći u pojavama maksimuma, na sličan način kako se to odigrava na dijagramima vremenske promene brojnosti populacija na relaciji plen – predator. U razmatranom MM dinamika zooplanktona je simulirana preko Jorgensen-ovog modela [27], prema kome promena biomase zooplanktona odlučujuće zavisi od tri veličine: biomase fitoplanktona, brojnosti predatora (biomase riba) i temperature vode, kao i od koeficijentata rasta, respiracije, nepredatorske smrtnosti, i dr. Sistemi jednačina kojima se definiše dinamizam razvoja zooplanktona ovde se ne navode (detaljnije, [21]). Pošto je temperatura ključan abiotički faktor za razvoj zooplanktona, modelom su obuhvaćene i dve modifikacije, sa tačnijim definisanjem uticaja temperature – u odnosu na neku referentnu – na rast zooplanktona. Obuhvaćene su obe grupe zooplanktona: zooplankton koji se hrani ispašom i zooplankton koji se hrani filtriranjem vode.

Ihtiofauna. RIBE predstavljaju najvišu kariku u lancu ishrane u jednoj akvatoriji. Posredno ili neposredno one utiču na sve niže trofičke nivoe, ali i na razvoj abiotičkih faktora u vodi kao biotopu.

I pored tako značajnog uticaja, ribe su dosad retko uključivane u MM kvaliteta vode, pre svega zbog složenosti dinamike njihovog razvoja u uslovima vrlo brojnih koakcija između raznih ribljih populacija.

Moguće pojednostavljenje, koje omogućava rešenje tog problema, leži u činjenici da se u slučaju veštačkih jezera sukcesije ihtiofaune po pravilu ne odigravaju spontano, već se antropogeno usmeravaju, putem veštačkog poribljavanja, kao i kasnijim korigovanjem tih aktivnosti planskim unošenjem novih ribljih vrsta, kako bi se postigle stabilne biocenoze u jezeru visokih klasa kvaliteta. Znači, ukoliko se pođe od činjenice da će unošenje ihtiofaune biti usmeravano, postoji mogućnost da se i ta komponenta biocenoze obuhvati modelom.

Izbor ribljih vrsta za početno poribljavanje jezera zavisi od rezultata razmatranih pokazatelja dobijenih modeliranjem kvaliteta. Na osnovu vrednosti simuliranih abiotičkih faktora i dinamizma razvoja fito- i zooplanktona eksperti za ribarstvo mogu da procene sa kojim bi kombinacijama ribljih vrsta bilo najcelishodnije započeti proces usmeravanih sukcesija u novoj akumulaciji. Jasno je da su stepen trofije, kiseonični i temperaturni režim najdominantniji parametri.

U slučaju usmeravanih sukcesija, koje karakteriše manji broj ribljih vrsta, koje se biraju po kriteri-

jumu stabilizacije stanja na najvišem nivou kvaliteta vode, za modeliranje se mogu uspešno koristiti Lotka – Volterove jednačine:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} N_i}{K_1} \right) = r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - \alpha_{11} N_1 - \sum_{i=2}^m \alpha_{1i} N_i}{K_1} \right) \\ &\dots \dots \\ \frac{dN_j}{dt} &= r_j N_j \left(\frac{K_j - \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} N_i}{K_j} \right) = r_j N_j \left(\frac{K_j - \sum_{i=1}^{j-1} \alpha_{ji} N_i - \alpha_{jj} N_j - \sum_{i=j+1}^m \alpha_{ji} N_i}{K_j} \right) \\ &\dots \dots \\ \frac{dN_m}{dt} &= r_m N_m \left(\frac{K_m - \sum_{i=1}^m \alpha_{mi} N_i}{K_m} \right) = r_m N_m \left(\frac{K_m - \sum_{i=1}^{m-1} \alpha_{mi} N_i - \alpha_{mm} N_m}{K_m} \right) \end{aligned}$$

gde su: N – brojnost određene populacije, r – specifična brzina rasta, K – granica rasta, m – broj vrsti koje razmatra MM, α_{ij} – koeficijent koakcije između vrsti, koji može biti pozitivan i negativan, zavise da li se radi o kooperativnom ili kompetitivnom odnosu jedne vrste na drugu. Sastoje se od tri grupe članova. Prva grupa ($r_j N_j$) definiše slobodan rast (povećanje brojnosti) populacije. Drugom grupom ($r_j N_j \alpha_{ji} N_j / K_j$) koja ima negativni predznak, modeliraju se homeotipske koakcije, odnosno smanjenje brzine rasta usled efekta samoograničavanja rasta. Trećom grupom ($r_j N_j \sum \alpha_{ji} N_i / K_j$) opisuju se heterotipske koakcije, odnosno uticaji između jedinki različitih vrsta, koji mogu pozitivno (ubrzavajuće) i negativno (usporavajuće) uticati na rast određene populacije. Efekti homeotipskih i heterotipskih koakcija obično se predstavljaju matricom koeficijentata uticaja A, koji se određuju empirijskim istraživanjima.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \Lambda & \alpha_{1j} & \Lambda & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & 1 & \alpha_{23} & \Lambda & \alpha_{2m} & \Lambda & \alpha_{2m} \\ M & M & M & O & M & O & M \\ \alpha_{j1} & \alpha_{j2} & \alpha_{j3} & K & 1 & \Lambda & \alpha_{jm} \\ M & M & M & O & M & O & M \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \alpha_{m3} & \Lambda & \alpha_{mj} & \Lambda & 1 \end{bmatrix}$$

Prema svojim specifičnim fiziološkim svojstvima razne vrste riba zahtevaju, da bi opstale, razne tipove ishrane i mogu se uspešno koristiti kao biološki regulatori uspostavljanja i održavanja najpovoljnijih biocenoza, a time i potrebnog kvaliteta vode [7]. Vrste i količina riba kojima se poribljava jezero zavise od tipa akumulacije, odnosno od mogućnosti

i intenziteta razvoja životnih zajednica ili pojedinih njenih članova. Osnovno pravilo pri tome je da ribu treba nastanjivati radi održavanja kvaliteta vode, a ne radi ribarstva.

Akumulacije Slano i Krupac (iz kojih se zahvata voda za HE Perućica, Elektroprivrede Crne Gore) primer su dobrog gazdovanja i uspešnog poribljavanja jezera [35]. Iako su formirane na koti od oko 600 metara nad morem, koja spada u zonu lipljana i mre- ne, kao rezultat kontrolisanog poribljavanja u ovim akumulacijama su zastupljene uglavnom salmonid- ne vrste riba. U akumulaciji Krupac prisutne su samo dve riblje vrste: kalifornijska pastrmka (*Parasalmo gairdneri*) i potočna pastrmka (*Salmo trutta m. fario*), a u akumulaciji Slano četiri: kalifornijska pastrmka (*Parasalmo gairdneri*), potočna pastrmka (*Salmo trutta m. fario*), jezerska zlatovčica (*Salvelinus alpinus*) i gaovica (*Phoxinus phoxinus*). U ovim akumulacijama dominantnu ulogu, brojno i težinski, ima kalifornijska pastrmka, koja je u obe akumulacije zastupljena sa preko 80 %.

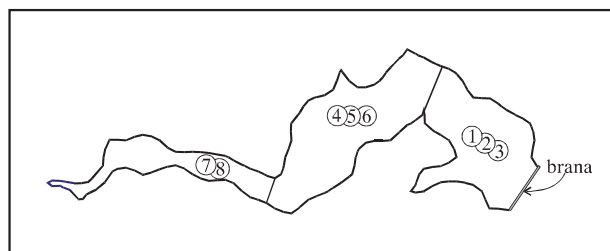
Akumulaciono jezero Vlasina (čija se voda koristi u Vlasinskim HE, JP EPS) primer je degradacije kvaliteta vode i poremećaja formiranog stabilnog sistema, koji je izazvan nekontrolisanim poribljavanjem [36]. U ovom jezeru godinama se stabilno stanje održavalo sa tri riblje vrste: potočna pastrmka (*Salmo trutta m. fario*), ohridska pastrmka (*Salmo letnica*) i gaovica (*Phoxinus phoxinus*). Ubacivanjem grgeča (*Perca fluviatilis fluviatilis*) ravnoteža je poremećena, na štetu salmonidnih vrsta, i jezero je degradirano u ribarskom i u pogledu kvaliteta vode. Još jedan negativan primer je akumulacija Bo- van [37]. Nakon izgradnje brane u ovoj akumulaciji nastanile su se nekvalitetne riblje vrste: klen (*Leuciscus cephalus*), ukljeva (*Alburnus alburnus*), crna (potočna) mrena (*Barbus meridionalis petenyi*) i klenić (*Leuciscus leuciscus*). Pošto je akumulacija namenjena za vodosnabdevanje, a u njoj su bili prisutni mnogobrojni oblici fitoplanktona, zooplanktona i sitnijih vrsta ribe, predviđeno je poribljavanje sledećim ribljim vrstama: šaran, beli i sivi tolstolobik, beli amur i smud. Međutim, do predviđenog poribljavanja nije došlo jer je korisnik vode neplanski poribio akumulaciju svim mogućim ribljim vrstama: patuljasti somić (cvergl), grgeč (*Perca fluviatilis fluviatilis*), som (*Silurus glanis*), srebrni karaš (babuška) (*Carassius auratus gibelio*), i dr. Ovim nestručnim poribljavanjem, s obzirom na nemogućnost potpunog pražnjenja akumulacije i izlova svog ribljeg naselja prisutnog u njoj, ne postoji mogućnost nekog kontrolisanog gazdovanja ribljom populacijom u ovoj akumulaciji.

Pomenuti negativni primeri pokazuju da se poribljavanje novih akvatorija sme obavljati samo na

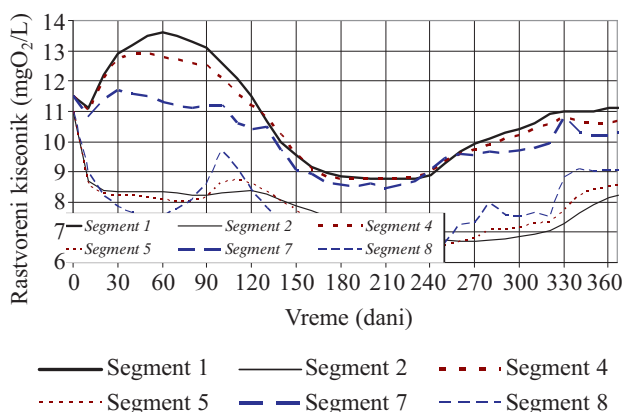
bazi odgovarajućih projekata, koji će sagledati čitav proces sukcesija, sve do ostvarivanja najpoželjnijeg klimaksnog stanja tog vodenog ekosistema.

3. MOGUĆNOSTI PRIMENE MODELA

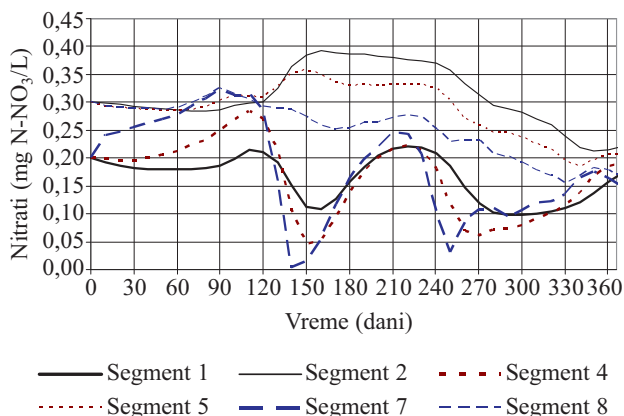
Mogućnosti primene modela WASP-GFBG ispitivane su na primeru akumulacije „Barje” na V- ternici, uz izvesna merenja koja su dala indikacije o nekim parametrima ponašanja akumulacije. Za potrebe modeliranja jezero je diskretizovano na 7 seg- menata (slika 7, segmenti sa nižim brojevima uvek se nalaze iznad segmenata sa višim brojeva). Mada



Slika 7. Diskretizacije jezera „Barje” za potrebe modeliranja

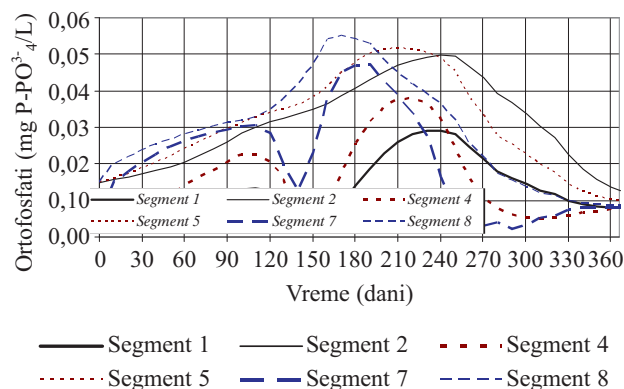


Slika 8. Promena koncentracije rastvorenog kiseonika

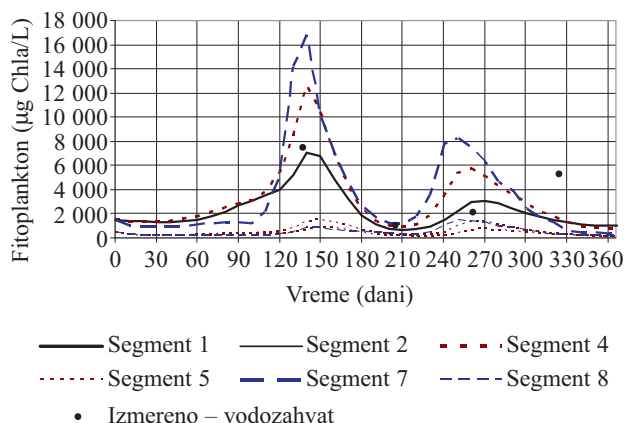


Slika 9. Promena koncentracije nitrata

osmatranja ulaznih parametara kvaliteta vode nisu bila potpuna, i mada akumulacija ni u pogledu ulaznih protoka nije bila neprekidno osmatrana, rekonstruisani su ulazi i potrebni parametri sa kojima se ulazi u MM. Na slikama 8, 9, 10. i 11. prikazani su neki rezultati modeliranja na akumulaciji Barje.



Slika 10. Promena koncentracije ortofosfata



Slika 11. Promena biomase fitoplanktona

Prema rezultatima simulacije koncentracije rastvorenog kiseonika (slika 8) akumulacija Barje se uz kontrolu kvaliteta vode na ulazu može održavati u I i II klasi prema uredbi o klasifikaciji voda. U slojevima hipolimniona koncentracija ne spada ispod 6 mgO₂/L, što znači da se u akumulaciji ne javljaju anaerobni uslovi. Ovakav kiseonični režim rezultat je, između ostalog, i dobre pripreme (čišćenja) terena pre prvog punjenja akumulacije. (U nekim akumulacijama punjenje nedovoljno očišćenog prostora akumulacije jedan je od uzročnika problema sa kvalitetom vode u njima).

Koncentracije nitratnog azota dobijene simulacijom (0 do 0,38 mg N-NO₃ /L) kreću se u opsegu koji se uklapa u logične sezonske oscilacije, jer se koncentracije smanjuju u slojevima u kojima se intenzivno razvijaju alge koje troše azot u svom razvo-

ju. Niske su i koncentracije amonijačnog azota, što je u saglasnosti sa ispitivanjima *in situ* [4].

Prema simuliranoj (i merenjima proveravanoj) biomasi fitoplanktona (slika 10) u segmentima epilimniona, akumulacija se nalazi između oligotrofnog i mezotrofnog stanja (prema klasifikaciji OECD, 1982), sa srednjom godišnjom vrednošću hlorofila a ≈ 2,9 mg/L. Segment uz branu nalazi se stalno u najpoželjnijem – oligotrofnom stanju. Problem je u najzvodnijem delu akumulacije, koji tokom toplijeg, vegetacionog dela godine prelazi u mezotrofno stanje zbog još uvek znatnog unošenja nutrijenata.

Modeliranje populacije zooplanktona pokazuje da dinamika promena njihove brojnosti sa određenim kašnjenjem prati sezonsku dinamiku povećanja i smanjenja brojnosti fitoplanktona. Biološka istraživanja *in situ* treba usmeriti u pravcu utvrđivanja parametara koji su potrebni za tačniju kalibraciju tog segmenta modela.

Provera kvaliteta vode u akumulaciji Barje na osnovu merenja bioloških parametara kvaliteta vode [18] pokazuju slične zaključke. Prema brojnosti populacija fitoplanktona, kao i hlorofila a akumulacija se održava na osnovu srednjih godišnjih vrednosti u stanju mezotrofije, dok se na osnovu srednje vrednosti biomase održava u oligotrofnom stanju.

Mogućnosti primene modela su vrlo široke, kako u fazi planiranja hidrotehničkih sistema sa akumulacijama, tako i tokom njihovog korišćenja. Pošto je model veoma operativan, on omogućava da se proveri veliki broj različitih simulacionih situacija, sa raznim ulazima kvaliteta, raznim pretpostavkama o merama zaštite kvaliteta vode u slivu, sa raznim efektivnostima PPOV (postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda) na delu sliva uzvodno od akumulacije, itd. U fazi planiranja sistema korišćenje simulacionog modela omogućava rešenje sledećih vrlo važnih planskih zadataka:

- Kvantifikovano sagledavanje uticaja akumulacije na okolinu, tokom izrade Studije o proceni uticaja na životnu sredinu, kao i u Studiji opravdanosti. To je veoma bitno radi dokazivanja ekološke stabilnosti projekta.
- Sagledavanje dinamizma abiotičkih i biotičkih procesa u jezeru, sa stanjima trofije tokom vremena, na osnovu kojih se mogu proveravati dispozicije i parametri sistema i planirati mere zaštite akumulacije, kao nezaobilaznog dela čitavog projekta. Simulacijom u fazi planiranja se može pokazati da je neka varijanta, sa kotom uspora koja stvara prostrane plitke zone akumulacije, teško branjiva sa gledišta procesa eutrofikacije. Znači, rezultati upravo ovog modela mogu biti presudni za projektnu odluku kojom se povećava ili sniža-

va kota uspora, kako bi se obezbedili dispozicioni uslovi koji su manje osetljivi na procese eutrofikacije jezera.

- Određivanje stanja kvaliteta vode u jezeru u pojedinim fazama njegovog razvoja, što je bitno za realizaciju i drugih ciljeva kod višenamenskih projekata (pogodnost akumulacija za snabdevanje naselja vodom, ribarstvo, turističku valorizaciju, itd.).
- Kvantifikacija uticaja pojedinih koncentrisanih zagađivača u slivu na razvoj kvaliteta vode u nizvodnoj akumulaciji. Na osnovu toga se mogu pozdati donositi odluke o neophodnosti pojedinih zaštitnih mera u slivu (npr. potpuno kanalsanje naselja uzvodno od akumulacije i izgradnja odgovarajućih PPOV, izbor stepena prečišćavanja, itd).

U fazi korišćenja vodoprivrednog sistema spektar problema koji se rešavaju ovakvim modelima je takođe dosta širok:

- Praćenje razvoja i estimacija / prognoza kvaliteta vode u akumulaciji, radi sagledavanja dopunskih mera njene zaštite.
- Analiza mera za usmeravanje razvoja ihtiofaune u pravcu koji je najpoželjniji sa gledišta održavanja visokog kvaliteta vode u akumulaciji (dodatna poribljavanja, izlov ribe, itd).
- Proveravanje optimalnih režima rada akumulacije sa stanovišta ciljeva održavanja visokog kvaliteta vode.

Treba istaći i jednu ohrabrujuću činjenicu: procesi u jezeru su dvosmerni, reverzibilni. Naime, ukoliko je stanje kvaliteta vode u nekom jezeru zbog neadekvatnih mera zaštite postalo loše, postoje mogućnosti da se realizacijom dopunske zaštite u slivu, pre svega na planu smanjivanja unosa nutrijenata, procesi u jezeru usmere u suprotnom pravcu, ka postepenom poboljšanju stanja. Ima više primera ozdravljenja jezera, sprovođenjem striktno kontrole unosa nutrijenata, pre svega azota i fosfora. Tako je jezero Vašington kraj Sijetla, koje se nalazilo na granici distrofije, nakon tri faze kanalsanja naselja, kojim su sve otpadne vode prihvaćene, prečišćene i odvedene van sliva jezera, doživelo pravi ekološki preporod, vrativši se postepeno u stanje mezotrofije, sa tendencijom daljeg poboljšanja [?]. Najnovije informacije kazuju da se to jezero uspešno vratilo u oligotrofno stanje. Akumulacija Wahnbach u Nemačkoj, koja je bila u eutrofnom stanju na granici distrofije vraćena je merama zaštite u oligotrofno stanje. Analize pokazuju da, ukoliko se prosečna koncentracija fosfora striktno održava ispod 10 µg/L (to je granica preko koje se naglo intenziviraju fotosintetske aktivnosti), jezero će se održavati u stanju oligotrofije.

4. ZAKLJUČAK

Savremeno projektovanje i korišćenje akumulacionih basena nije moguće bez odgovarajućih matematičkih modela za simulaciju abiotičkih i biotičkih procesa u jezeru. Simuliranje tih procesa tokom projektovanja omogućava: (a) da se donesu valjane projektne odluke o dispoziciji i parametrima akumulacija i hidroelektrana, kako bi se izbegle dispozicije koje su posebno ranjive sa gledišta eutrofikacije, (b) da se nađu rešenja za zaštitu akumulacije, (c) u slučaju višenamenskih sistema – da se izaberu tehnološke linije postrojenja za prečišćavanje vode koje odgovaraju stanju kvaliteta vode u jezeru u budućnosti, (d) da se jasno kvantificira i javnosti predloži uticaj akumulacije na životnu sredinu. U fazi korišćenja akumulacije simulacioni model omogućava: (a) da se proveravaju prognoze razvoja kvaliteta vode u jezeru i efekti dodatnih mera zaštite, (b) da se usmeravanjem sukcesijama ekosistema (posebno merama poribljavanja) jezero održava u najpoželjnijim stanjima kvaliteta, (c) da se tokom operativnog upravljanja određuju najpogodniji načini korišćenja akumulacije sa gledišta razvoja kvaliteta vode. Prikazan model WASP-GFBG, koji predstavlja dopunjen i unapređen model WASP5, omogućava da se vrlo operativno rešavaju svi navedeni zadaci. Da bi se on mogao uspešno primeniti, neophodno je usmeriti istražne radove, posebno u domenu kvaliteta i količine ulaznog dotoka. Ohrabrujuća je činjenica da su procesi u jezerima dvosmerni, tako da se uz odgovarajuće mere zaštite, pre svega na planu kontrole unosa nutrijenata, jezera mogu vratiti u kvalitativno bolja stanja. Ipak, osnovna mudrost nalaže da ne treba dozvoliti da jezero uopšte i dođe u neprihvatljivo eutrofno stanje, jer su tada sve mere spasavanja znatno skuplje no da su iste realizovane na početku, pre aktiviranja detonatora procesa eutrofikacije.

5. LITERATURA

- [1] Ambrose R., T. Wool and J. Martin: THE WATER QUALITY ANALYSIS SIMULATION PROGRAM WASP5, Part I – Model Documentation, EPA, Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia, 1993.
- [2] Bowie L.G. et al.: RATES, CONSTANTS AND KINETICS FORMULATION IN SURFACE WATER QUALITY MODELING, EPA, Georgia, 1985.
- [3] Carlson, E.R.: TROPHIC STATE INDEX FOR LAKES, LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY, march, 1977.
- [4] Cibulić, V., V. Martinović-Vitanović i V. Kalifić: REZULTATI JEDNOGODIŠNJEG PRAĆENJA

- KVALITETA VODE AKUMULACIJE BARJE – HEMIJSKI ASPEKT, *Zaštita voda* 97, Sombor, 1997.
- [5] Dajoz, R.: PRÉCIS D'ÉCOLOGIE, Paris, 1972.
- [6] Đorđević, B.: VODOPRIVREDNI SISTEMI, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [7] Djordjevic, B.: CYBERNETICS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT, WRP, Fort Collins, 1993, s.650+XXII, ISBN 0-9183-82-9, U. S. Library of Congress CCN: 93-060184
- [8] Đorđević, B. i dr.: IZBOR MERA ZAŠTITE AKUMULACIJA OD EUTROFIKACIJE, Zbornik radova „Akumulacije kao izvorišta za snabdevanje vodom”, Leskovac, 1995.
- [9] Đorđević, B.: KLJUČNE EKOLOŠKE ZAKONITOSTI – BITNE ZA PLANIRANJE VODOPRIVREDNIH SISTEMA, *Časopis Vodoprivreda*, Beograd, 175-176 (5-6), s.335-346, 1998.
- [10] Đorđević, B.: HIDROENERGETSKI POTENCIALI JUGOSLAVIJE, *Časopis Vodoprivreda*, Beograd, 189-194,1-6, s. 93-100, 2001.
- [11] Đorđević, B.: O STRATEŠKIM REŠENJIMA DEFINISANIM VODOPRIVREDNOM OSNOVOM REPUBLIKE SRBIJE, *Časopis Vodoprivreda*, Beograd, 195-200, s. 13-33. 2002.
- [12] Đorđević, B.: SOCIJALNI PREDUSLOVI POTREBNI ZA REALIZACIJU PROJEKATA HIDROELEKRANA, *Časopis Elektroprivreda*, 1, 2006, s. 36-53.
- [13] Đorđević, B. i T.Dašić: GARANTOVANI PROTOCI NIZVODNO OD HIDROELEKTRANA, *Časopis Elektroprivreda*, broj 1, str. 3-12, 2007.
- [14] EUTROPHICATION OF WATER, Monitoring, Assessment and Control, OECD, 1982.
- [15] Hutchinson,G.E.: TREATISE ON LIMNOLOGY, John Wiley & Sons, New York, 1957.
- [16] Henderson-Sellers B.: ENGINEERING LIMNOLOGY, Pitman Publ. Inc., 1984
- [17] Janković, M.M.: FITOEKOLOGIJA, Fitoekologija, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- [18] Kalafatić, V., V. Martinović–Vitanović i V. Cibulić: REZULTATI JEDNOGODIŠNJEG PRAĆENJA KVALITETA VODE AKUMULACIJE BARJE – BIOLOŠKI ASPEKT, *Zaštita voda* 97, Sombor, 1997.
- [19] Kalafatić, V. i V. Martinović – Vitanović: BIOLOŠKI ASPEKTI ZAŠTITE VODNIH RESURSA, KVALITETA VODE I AKVATIČNIH EKOSISTEMA, U KONTEKSTU SNABDEVANJA VODOM ZA PIĆE, *Voda za 21. vek*, Beograd, 1999.
- [20] McDonald, A.T. & D. Kay: WATER RESOURCES: ISSUES AND STRATEGIES, John Wiley, 1988
- [21] Milovanović (Dašić), T.: INFORMATIČKA I MODELSKA PODRŠKA UPRAVLJANJU SISTEMOM BRANA – AKUMULACIJA, Magistarska teza, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [22] Milanović (Dašić), T. i B. Đorđević: DINAMIČKI PROCESI U AKUMULACIJAMA I NJIHOVO MODELIRANJE ZA POTREBE PLANIRANJA I EKSPLOATACIJE VODOPRIVREDNIH SISTEMA, *Časopis Vodoprivreda*, 177-182, 1-6, 1999
- [23] Milojević, M.: SNABDEVANJE VODOM I KANALISANJE NASELJA, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [24] Martinović-Vitanović V. i V. Kalafatić: OSNOVNE HIDROBIOLOŠKE KARAKTERISTIKE KOPENENIH VODA JUGOSLAVIJE. U: Biodiverzitet Jugoslavije sa pregledom vrsta od međunarodnog značaja, Biološki fakultet, Beograd, 1995.
- [25] Martinović-Vitanović V.: EKOLOŠKA STUDIJA OBEDSKE BARE, Srbijašume, Beograd. 1996.
- [26] Odum, E.P.: FUNDAMENTALS OF ECOLOGY, Saunders, 1977.
- [27] Orlob, T. G.: MATHEMATICAL MODELLING OF WATER QUALITY: STEAMS, Lakes and Reservoirs, A Waley – Interscience publication, 1983.
- [28] Obušković Lj.: ALGOLOŠKE I SAPROBIOLOŠKE KARAKTERISTIKE NEKIH VODA DURMITORA U LETNJEM ASPEKTU 1989. GODINE, Zbornik radova *Zaštita voda '94*, Igalo, 1994.
- [29] Papović, R. i J. Šapkarov: ANIMALNA EKOLOGIJA, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [30] Soldatović B. i D. Zimonjić: BIOLOGIJA I GAJENJE RIBA, Naučna knjiga, Beogrda, 1988.
- [31] Stanković, S.: EKOLOGIJA ŽIVOTINJA, ZIUS, Beograd, 1962.
- [32] Vandermeer, J.: ELEMENTARY MATHEMATICAL ECOLOGY, John Waley, 1981.
- [33] Welcomme R. L.: RIVER FISHERIES, FAO, Rome, 1985.
- [34] Wetzel, R. G.: LIMNOLOGY, W.B.Saunders Com., Philadelphia, London, 1975.
- [35] Kažić D., M. Purić, G. Karaman, D. Nedić, D. Marić, S. Petković: BIOLOŠKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE NIKŠČKIH AKUMULACIJA I MOGUĆNOSTI RAZVOJA RIBARSTVA U NJIMA, Zbornika radova „Savetovanje o ribarstvu na hidro-akumulacijama”, Mostar, 1989.
- [36] Ostojčić A. i V. Simić: SASTAV I STRUKTURA ZOOPLANKTONA VLASINSKOG JEZERA U PERIODU OKTOBAR 1991. – OKTOBAR 1992. GODINE, Zbornik radova „Zaštita '94”, Igalo, 1994.

[37] Hristić Đ. i M. Stanković: PROBLEMATIKA PO-
ČETNOG PORIBLJAVANJA I RIBARSKOG IS-
KORIŠĆAVANJA NEKIH AKUMULACIJA U

SLIVU MORAVE I VODAMA JUŽNOG SREMA,
Zbornik radova „Savetovanje o ribarstvu na hidro-
akumulacijama”, Mostar, 1989.

Rad je primljen u uredništvo 05. 09. 2008. godine



Tina P. Dašić je rođena 1970. godine. Hidrotehnički odsek Građevinskog fakulteta u Beogradu završila je 1994. Magistrirala je 1998. na istom fakultetu iz oblasti modeliranja abi-
otičkih i biotičkih procesa u jezerima i akumulacijama. Doktorirala je na Građevinskom fa-
kultetu u Beogradu 2003. godine (oblast pouzdanosti velikih vodoprivrednih sistema). Docent
je na predmetima Vodoprivredni sistemi i Korišćenje vodnih snaga, koje predaje i na Građe-
vinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore. Objavila je knjigu Kvalitet vode u akumulacijama
(modeliranje, ocenjivanje, praćenje), a u štampi je knjiga Hidroenergetika – kroz rešavanje
konkretnih problema. Autor je ili koautor preko 40 radova koji su objavljeni u domaćim i međunarodnim
časopisima i prikazani na naučnim skupovima.



Branislav V. Đorđević je rođen 1938. godine. Redovan je profesor Građevinskog fakul-
teta u Beogradu. Redovan je član Akademije inženjerskih nauka Srbije, član Naučnog dru-
štva Srbije, professor honoris causae. Kao utemeljivač Teorije vodoprivrednih sistema, kao
nove grane Tehničke kibernetike, predavao je na više univerziteta. Bio je šef Katedre za hi-
drotehniku. Njegova specijalnost su složeni hidrotehnički sistemi sa hidroelektranama, više-
namensko korišćenje, uređenje i zaštita voda, kao i ekološki aspekti složenih sistema. Za knji-
ge Korišćenje vodnih snaga I i II nagrađen 1984. Oktobarskom nagradom Beograda. Njogo-
vo kapitalno delo iz oblasti teorije vodoprivrednih sistema, objavljeno u SAD (1993) – *Cybernetics in Water
Resources Management* – bazna je monografija u svetu iz te oblasti i citira se u tom svojstvu. Druge češće
citirane knjige: *Vodoprivredni sistemi*, *Objekti hidroelektrana*, *Hidroenergetsko korišćenje voda*. Radio je
na planiranju svih većih hidroelektrana i vodoprivrednih sistema u SFRJ, kao i na izradi najvažnijih stra-
teških planskih dokumenata u oblasti voda na prostoru bivše SFRJ.

Miodrag Mesarović i Milan Čalović

Kogeneracija u Srbiji – zašto se okleva?

Pregledni rad
UDK: 621.4; 621.11; 621.1.018

Rezime:

U članku se prvo razmatraju opšti problemi korišćenja kogeneracije, u svrhu ekonomske proizvodnje električne i toplotne energije za grejanje i/ili potrebe tehnoloških procesa u nizu industrija (celuloza, papir, metalurgija, industrija šećera, itd.) u simultanom spregnutom procesu, a zatim problemi primene kogeneracije u Srbiji. Uočavaju se četiri osnovna tipa kogeneracije (elektroprivredna, industrijska, vezana za sisteme daljinskog grejanja i kućna kogeneracija), čije se primene u Srbiji u ovom trenutku nalaze na različitim nivoima. Tako, elektroprivredna kogeneracija ima jasno zacrtane mogućnosti, dok kućne (ili mikro) kogeneracije uopšte nema, dok su mogućnosti kogeneracije u sistemu daljinskog grejanja neiskorišćene. Karakteristično je, da je kogeneracija u industriji, do početka 90-ih godina prošlog veka, u Srbiji bila dosta primenjena, a u periodu sankcija Ujedinjenih nacija i ratova, skoro napuštena. Njena obnova će pratiti obnovu industrija kojima je bila pridružena.

U članku se takođe razmatra potencijal razvoja kogeneracije u Srbiji, uz zaključak da bi ga trebalo što pre aktivirati, kakav je slučaj i sa zemljama Evropske Unije, gde je 1997. godine 9 % potreba u električnoj energiji zadovoljavano iz kogeneracije, uz plan, da se taj procenat u 2010. godini duplira, odnosno da poraste na 18 %. Naravno, pri tome, ekonomija kogeneracije i ušteda primarnog goriva, treba da budu osnovni razlog da se ide na njenu veću primenu.

Ključne reči: kogeneracija, spregnuta proizvodnja, toplotna energija, električna energija

Abstract:

COGENERATION IN SERBIA – WHY A HESITATION?

This paper initially considers general problems of cogeneration use, aimed for an economical production of the electrical and heating energy for district heating and/or use in technological processes in the series of industries (pulp, paper, metallurgy, sugar, etc.), within a simultaneously linked process. Then, it deals with problems of cogeneration application in Serbia. Four basic types of cogeneration are distinguished, originating in power utilities, industries, district heatings and households, each of them having a different level of development and application at the present moment. So, utility cogeneration has got clearly defined possibilities, while there is no household cogeneration at all. In addition, possibilities of cogeneration in district heating systems are idle. As far as the industrial cogeneration is concerned, it was well applied until last decade of the 20-th century, but almost completely given up in the period of UN sanctions and NATO bombardment of Serbia.

The paper also deals with the potential of cogeneration development in the country, with a clear conclusion that it should be activated as soon as possible, as it is the case with all countries within European

Miodrag Mesarović i Milan Čalović, Energoprojekt-ENDEL, 11 000 Beograd

Union, where in the year 1997 9% of power demand was covered by cogeneration, with the plan that this percentage in 2010 will be doubled, i.e., it should increase to 18%. Of course, the economy of cogeneration and saving of primary fuel should be the basic reason why to go to wider application of cogeneration.

Key words: cogeneration, simultaneous generation, heat energy, electrical energy

1. UVOD

Kogeneracija („Cogeneration”) je proces simultane i spregnute proizvodnje električne (ili mehaničke) i toplotne energije. Zavisno od toga koja je proizvodnja primarna, razlikuju se elektroprivredna (primarna je proizvodnja električne, a sekundarna proizvodnja toplotne energije) i industrijska kogeneracija, zajedno sa kogeneracijom u toplanama (primarna je proizvodnja toplotne, a sekundarna proizvodnja električne energije). Pored njih postoji i trigeneracija gde se, pored električne i toplotne energije, proizvodi i energija za centralizovano hlađenje posredstvom apsorpcionih hladnjaka. U svim slučajevima, krajnji cilj je da se ostvari veća efikasnost u iskorišćenju energije ulaznog energenta (fosilna i nuklearna goriva, solarna i geotermalna energija, itd.), a s tim da se poboljša ekonomija i profit proizvođača, koji ih isporučuje korisnicima. Sam proces kogeneracije poznat je i pod imenom „spregnuta proizvodnja toplotne i električne energije („Combined Heat and Power” – CHP). Spregnuta proizvodnja toplotne i električne energije ne predstavlja novu tehnologiju i, u većini slučajeva, isti elementi osnovne opreme, kao što su kotlovi, parne i gasne turbine, kao i gasni motori, bili su i do sada korišćeni i za odvojenu proizvodnju toplotne i električne energije. Spregnuta, u odnosu na odvojenu proizvodnju te dve osnovne vrste finalne energije, razlikuje se u organizaciji i posebno u postojanju velikog i stabilnog toplotnog konzuma, koji omogućava iskorišćenje celokupne moguće proizvodnje toplotne energije pojedinih kogeneracionih postrojenja.

Poznato je da se u konvencionalnim postrojenjima za proizvodnju električne energije, shodno Klausius-Rankinovom ciklusu, praktično može iskoristiti samo oko 40 % raspoložive latentne hemijske energije sadržane u korišćenom gorivu, dok se ostatak od oko 60 % gubi u procesu. U spregnutoj proizvodnji električne i toplotne energije (CHP), može se postići iskorišćenje primarne energije i do 90 %, sa njenom uštedom između 15 % i 40 % u odnosu na odvojenu proizvodnju istih količina električne i toplotne energije u konvencionalnim elektranama i toplanama, pa je ekonomija CHP, u sadašnjim uslovima velikih i čestih poskupljenja svih energetske sirovine, osnovni podsticaj za šire uvođenje kogeneracije u tekuću praksu spregnute proizvodnje toplotne i električne energije.

Kogeneracija se, znači, već dugo koristi u elektroprivredi, postrojenjima daljinskog grejanja i energetske intenzivnim industrijama. U prvom slučaju, najčešće korišćeni sistem za takve primene tradicionalno je bio ciklus proizvodnje električne energije u termoelektrani (TE) na fosilna goriva, gde se toplota proizvodila korišćenjem parnih turbina sa oduzimanjem pare, ili su se u svrhu proizvodnje toplote za grejanje i tehnološke potrebe koristile turbine sa protivpritiskom. U novije vreme toplota se proizvodi i posredstvom gasnih turbina, sa kotlovima – utilizatorima, koji koriste otpadnu toplotu vrelih gasova na izlazu iz sistema, za proizvodnju vodene pare ili vrelе vode. Danas postoji širok spektar sistema i opreme za kogeneraciju, koji mogu zadovoljiti sve specifične zahteve korisnika za toplotnom i električnom energijom [1].

Kada se radi o elektroprivrednoj kogeneraciji, električna energija se posredstvom elektroprivrednih sistema (prenosnog i distributivnih) isporučuje krajnjim korisnicima, a posredstvom toplodalekovoda, korisnicima toplotne energije (to su najčešće velike industrije i komunalni sistemi za rejonsko-daljinsko grejanje). U slučaju industrijske kogeneracije, toplotna i električna energija se prvenstveno koriste u tehnološkom procesu dotične industrije, dok se viškovi, mogu prodavati i drugim korisnicima. U ranijim uslovima vertikalno strukturirane monopolske organizacije elektroprivrede, bilo je teškoća u plasmanu viškova tako proizvedene električne energije, ali su Zakonom o energetici Republike Srbije iz 2004. godine uslovi tog plasmata olakšani, čime je dat novi podstrek korišćenju industrijske kogeneracije u Srbiji [2]. Nažalost, do sada (početak 2009. godine), nisu još izvršene najavljene promene i dopune toga Zakona, niti su donete prateće odluke i uredbe, koje bi konkretno podstakle korišćenje kogeneracije, a posebno industrijske kogeneracije, tako da je došlo do situacije da je udeo industrijskih elektrana u ukupnoj bilansnoj proizvodnji električne energije u Srbiji, od 2,5 % u 1989. godini, umesto da raste, sada opao na zanemarljivo malu vrednost, blisku 0 %.

2. RAZLOZI ZA PRIMENU KOGENERACIJE

2.1. Opšta razmatranja

Razlozi za primenu kogeneracije mogu se razlikovati od korisnika do korisnika, ali su većina njih zajednički i mogu se svesti na sledeće efekte:

- a. Povećana efikasnost konverzije primarnog energenta i globalnog iskorišćenja utrošene primarne energije, za istu proizvodnju toplotne i električne energije, čime se generalno smanjuju troškovi, a poboljšava ekonomija poslovanja proizvođača. Pri tome se efikasnost kogeneracionih postrojenja može definisati na različite načine, kao na primer, preko ekvivalentnog (bezdimenzionog) koeficijenta električne efikasnosti [3]:

$$EEE = \frac{W_e}{Q_g} + \frac{W_t}{0,9Q_g} \quad (1)$$

gde je W_e proizvedena električna energija, Q_g utrošena toplota goriva, a W_t iskorišćena toplota (pri čemu se sve energije, Q_g , W_e i W_t moraju izraziti u koherentnim jedinicama).

- b. Kao gorivo u kogeneracionom procesu mogu se koristiti i otpadne energetske sirovine i biomasa, čime se poboljšava efektivnost u smanjenju troškova i potreba za velikim deponijama.
- c. Uštede kod potrošača toplotne energije u industriji i domaćinstvima su znatne, jer im se nudi jeftinija isporuka iste.
- d. Povoljna je realizacija decentralizovane i distribuirane proizvodnje električne energije po pristupačnim proizvodnim cenama, kroz izgradnju generatorskih kapaciteta u blizini potrošača, uz izbegavanje velikih investicija i gubitaka u prenosnoj i distributivnoj mreži, kada su ti proizvođači udaljeni. Ovaj efekat poboljšava fleksibilnost sistema i naročito je izražen kada je primarni energent prirodni gas.
- e. Povećana lokalna i opšta sigurnost decentralizovane proizvodnje električne energije, smanjuje rizik da potrošači pri raspadima i poremećajima u prenosnom sistemu mogu da ostanu bez snabdevanja električnom energijom i toplotom, uz istovremeno izbegavanje dela gubitaka u prenosu.
- f. Smanjenje rizika od uvoza zavisnosti (ključni izazov za energetska budućnost zemalja sa nedovoljnim prirodnim energetske resursima), kada se koristi kogeneracija, je očigledno.
- g. Ukazuje se prilika da se diversifikuje i pojača konkurencija na tržištu električne energije sa nezavisnim i neelektroprivrednim proizvođačima („Independent Power Producers” – IPP i „Non-Utility Generators” – NUG).
- h. Posledica je i povećana zaposlenost – iskustvo pokazuje da je razvoj kogeneracije otvarao nova, specijalizovana radna mesta.

Sa gledišta zaštite okoline, kogeneracijom se generalno smanjuje emisija štetnih gasova (ugljen dioksida – CO₂, sumpor-dioksida – SO₂ i azotnih oksida – NO_x). Najveće uštede se ipak postižu kod sma-

njenja emisije CO₂, koji je glavni predstavnik gasova sa efektom staklene bašte, a takođe se značajno smanjuju i emisije SO₂ i NO_x. Korektno projektovan i dobro održavan kogeneracioni sistem u industriji uvek će obezbediti bolju energetska efikasnost nego što bi to dala konvencionalna postrojenja za odvojenu proizvodnju istih količina toplotne i električne energije, uz smanjenje potrošnje primarne energije i troškova. Jedno te isto gorivo koristi se za proizvodnju električne i toplotne energije, tako da uštede zavise od razlike u ceni između energije primarnog goriva i cene električne energije koju kogeneraciona šema zamenjuje. Međutim, kako je profitabilnost industrijske kogeneracije u opštem slučaju rezultat jeftine proizvodnje električne energije, ona zavisi od produktivnog korišćenja otpadne toplote, tako da je prvi kriterijum uspešnosti adekvatna potreba dotične industrije za toplotnom energijom. Kao grubo uputstvo u referenci [1] iz 2001. godine se smatra da kogeneracija ima izgleda da bude ekonomična, ukoliko postoji ravnomerna potreba za toplotom od najmanje 4 500 h u godini. Naravno da ovaj podatak treba uzeti uslovno, jer se menja sa promenom cena osnovnih energenata i električne energije i sigurno će se ovo vreme smanjivati sa porastom tih cena.

Raspored potreba za električnom energijom je takođe vrlo značajan, jer je, na primer, industrijska kogeneracija najprofitabilnija kada funkcioniše u periodima viših tarifa, tj. tokom dnevnih časova kada su prodajna i kupovna cena proizvedenog kWh više. Sa tekućom cenom goriva i važećim tarifama za kupovinu i prodaju električne energije, na većini kogeneracionih postrojenja može se ostvariti vreme povraćaja investicija od 3-5 godina, dok se računa sa životnim vekom kogeneracionih postrojenja od 20 godina [4].

2.2. Kategorije primene kogeneracije

Prema Direktivi EU [3], postoje sledeće četiri osnovne kategorije primene kogeneracije:

- a. Mala kogeneraciona postrojenja, koja se uz proizvodnju električne energije obično koriste za grejanje vode i zagrevanje prostora u zgradama. Ona se baziraju na stabilnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS) sa električnim paljenjem;
- b. Velika kogeneraciona postrojenja, obično pridružena proizvodnji pare u velikim zgradama, koja se baziraju na SUS motorima sa kompresionim paljenjem, parnim ili gasnim turbinama;
- c. Veliki kogeneracioni sistemi za daljinsko grejanje („District heating”) u okolini termoelektrana ili velikih postrojenja za spaljivanje otpada, sa rekuperatorima, koji snabdevaju toplotom lokalnu mrežu za grejanje;

d. Kogeneraciona postrojenja, koja se snabdevaju primarnom energijom iz obnovljivih izvora, malih ili velikih kapaciteta.

U opštem slučaju, postrojenja CHP snage do 1 MW smatraju se „malim”, između 1-10 MW „srednjim”, a preko 10 MW „velikim”. Adekvatnost primene kogeneracije prvenstveno se vidi za slučaj elektroprivredne kogeneracije, u velikim termoelekttranama na fosilna goriva (ugalj, derivati nafte, prirodni gas), lociranim u blizini velikih gradova, gde je posebno izražena potreba za grejanjem, koje se može organizovati daljinski, ili nekih industrija kojima je neophodna tehnološka para. To su industrije celuloze i papira, hemijska, tekstilna, metaloprerađivačka i prehrambena industrija, industrija građevinskih materijala itd., kao i veliki javni i komercijalni kompleksi, koji iskazuju značajne potrebe za toplotnom energijom (tržni, rekreativni, zdravstveni i sportski centri, kasarne i drugi vojni objekti, aerodromi, turističko-rekreativni kompleksi itd.). U Evropi je u pogonu više hiljada kogeneracionih postrojenja. Smatrajući nedovoljnim učešće kogeneracije u ukupnoj proizvodnji električne energije u zemljama Evropske Unije od 9 %, Evropska komisija je 1997. godine postavila kao cilj da to učešće u 2010. godini poraste na 18 % [5].

2.3. Teškoće u razvoju i podsticajne mere

Iako su preimućstva kogeneracije u odnosu na odvojenu proizvodnju toplotne i električne energije očigledna, u prošlosti je bilo više barijera različite prirode za brži razvoj njenog korišćenja. One sve su na neki način bile posledica povlašćenog položaja elektroprivrede, koja je i zakonski onemogućavala konkurenciju neelektroprivrednih proizvođača električne energije, što se manifestovalo kroz niz prepreka, kao što su na primer [6, 7]:

- a. Monopolistička organizacija tržišta električne energije, koja su isuviše niskim cenama za kupovinu viškova proizvodnje kogeneracionih proizvođača, ove odbijali od učešća u podmirivanju manjkova proizvodnje elektroprivrednih preduzeća. Istovremeno, elektroprivreda im je postavljala vrlo stroge tarife za sigurnosnu isporuku, kada su imali manjkove, kao i za obezbeđenje rezerve.
- b. Odsustvo prava za pristup na mrežu neelektroprivrednih proizvođača električne energije u većem broju zemalja, a tamo gde su ona formalno postojala, bila je za kogeneracione proizvođače, najčešće preskupa.
- c. Postojale su i tehničke barijere, jer se od kogeneracionih proizvođača tražilo da ispune niz slože-

nih tehničkih i sigurnosnih zahteva za priključak na javne elektroprivredne mreže.

- d. Ispunjavanje svih postavljenih uslova, ponekad je bilo preskupo, a po pravilu i dugotrajno za realizaciju.

U liberalizovanom okruženju te tradicionalne barijere su otklonjene (ili se otklanjaju), jer je kogeneraciji priznat slobodan pristup na mrežu i ravnopravno učešće na tržištu električne energije, pod jednakim uslovima, koji važe i za elektroprivredne proizvođače. Ako je tržište adekvatno strukturalno profilisano, kogeneraciji se pruža šansa da u fer utakmici obezbedi većinu cenovno efikasnih opcija za proizvodnju električne energije, pri kojima će do punog izražaja doći ušteda u korišćenju toplote, koju kogeneracioni procesi nude [2, 3].

Međutim, i posle strukturalne reorganizacije elektroprivrede i proklamovanja slobodnog tržišta, ostale su neke situacije koje su nepovoljne za šire korišćenje kogeneracije, kao što su:

- a. Neizvesnosti isplativosti investicija u kogeneraciju;
- b. Prvi efekti liberalizacije tržišta u mnogim slučajevima su bili da je cena električne energije smanjena, ponekad i ispod praga ekonomičnosti i profitabilnosti uloženi investicija u kogeneraciju, ili eksploataciju kogeneracionih postrojenja. To je ipak bio privremeni efekat, ali je negativno delovao na investitore;
- c. Blisko vezana za prethodnu konstataciju je i činjenica da su troškovi ekološke zaštite retko uključivani u cenu energije;
- d. Usvojena pravila za pristup na mrežu često su bila vrlo zahtevna, komplikovana i teška za razumevanje, pa su na neki način odvrćala investitore od inače skupih i nesigurnih ulaganja u kogeneraciju;
- e. Ekonomija kogeneracije je jako osetljiva na nivo cena električne energije i razliku između cene goriva koje se koristi i toplote uložene u proizvodnju električne energije. U tom pogledu potencijalne investitore u industriji treba pomoći definisanjem jasne i transparentne politike pri regulisanju tržišta električne energije, koja obezbeđuje stabilnost i predikciju cena. A to je posao državnih organa, koji moraju da adekvatno usklade interese svih učesnika na tržištu energije preko jasno definisanih pravila.

S druge strane, za prihvatanje i brži razvoj primene kogeneracije, veoma su važne podsticajne mere, koje mogu pružiti Vlada i državne institucije. U te mere spadaju svi podsticajni instrumenti koji ohrabruju primenu ekonomski opravdanih mera za smanjenje i/ili bolje iskorišćenje primarne energije energenata i poboljšanje energetske efikasnosti i ni-

voa zaštite životne sredine. One se prvenstveno odnose na moguće olakšice koje bi uživali vlasnici kogeneracionih postrojenja, kao što su [6]:

- Olakšice pri dobijanju dozvole za gradnju;
- Smanjenje državnih taksa i poreza;
- „Zeleni” sertifikati;
- Direktna subvencija cena proizvođaču. Recimo, u Španiji se energija proizvedena u obnovljivim izvorima i u kogeneraciji plaća prema formuli

$$C = (C_M + B) + C_b, \text{ (€/kWh)} \quad (2)$$

gde je C_M normalna tržišna cena koja se plaća proizvođaču, B bonus za proizvođače iz obnovljivih izvora i kogeneracije*, a C_b dodatni bonus za $\cos\varphi$ (max 4 %), [7];

- Povoljne tarife za prodaju, a isto tako i za kupovinu rezervne i dopunske električne energije i snage koje bi uživali vlasnici kogeneracionih postrojenja u industriji;
- Olakšice za pristup na javnu električnu mrežu, za sve tipove kogeneracije.

2.4. Elementi kogeneracionih postrojenja

Svako kogeneraciono postrojenje sastoji se od četiri grupe osnovnih elemenata. To su:

- Primarni motor, koji može počivati na različitim tehnologijama, kao što su [3]:
 - Kombinovana gasno-parna turbinska postrojenja,
 - Protivpritisna parna turbina,
 - Kondenzaciona parna turbina sa oduzimanjem pare,
 - Gasna turbina sa rekuperacijom toplote,
 - Motor sa unutrašnjim sagorevanjem (Otto ili Diesel),
 - Gasne mikroturbine,
 - Stirlingove mašine,
 - Gorivne ćelije,
 - Parni motori,
 - Organski Rankinovi ciklusi,
 - Bilo koji drugi tip, ili kombinacija raznih tehnologija;
- Električni generator (sinhroni, retko asinhroni);
- Sistem za rekuperaciju toplote (kotlovi – utilizatori);
- Sistem upravljanja.

2.5. Proračun proizvodnje električne energije iz kogeneracije

Shodno Direktivi o kogeneraciji [3], vrednovanje proizvodnje električne energije iz kogeneracije vrši se na osnovu stvarnog rada jedinice i troškova

* Ovaj bonus je 2004. godine u Španiji za sve obnovljive izvore i kogeneraciju bio 2,127 6 c€/kWh [7].

njene proizvodnje u normalnim uslovima. Svedena na period od godinu dana, kogeneraciona proizvodnja jednaka je ukupnoj proizvodnji izmerenoj na krajevima električnih generatora (bruto proizvodnja), ako je ukupna godišnja efikasnost kogeneracionog ciklusa veća od 80 % za slučaj kombinovanih gasno-parnih i kondenzacionih parnih turbinskih postrojenja sa oduzimanjem pare (iz tač. a i c pregleda u prethodnoj sekciji 2.3), odnosno 75 % za ostala postrojenja (tač. a, b, d, e, f, h istog pregleda).

Ako je godišnja efikasnost manja od maksimalno utvrđene, godišnja proizvodnja električne energije se računa po formuli

$$W_e = W_i C \quad (3)$$

gde je C odnos godišnje proizvodnje električne i korisne toplotne energije u kogeneraciji.

Proračun električne energije iz kogeneracije bazira se na stvarnom odnosu godišnje proizvodnje električne energije i toplote. Ako stvarni odnos nije poznat, onda se mogu koristiti podrazumevane vrednosti, ali pod uslovom da je izračunata električna energija manja ili najviše jednaka ukupnoj ostvarenoj proizvodnji električne energije iz jedinica za kogeneraciju. Te podrazumevane vrednosti za parametar C iz formule (3) date su u donjoj tabeli 1 [3].

Tabela 1.

Vrednosti parametra C različitih tipova jedinica za kogeneraciju

Tip jedinice za kogeneraciju	Podrazumevani odnos godišnje proizvodnje električne i toplotne energije C
Kombinovano gasno-parno postrojenje	0,95
Protivpritisna parna turbina	0,45
Kondenzaciona turbina sa oduzimanjem pare	0,45
Gasna turbina sa rekuperacijom toplote	0,55
Motor sa unutrašnjim sagorevanjem	0,75

Direktiva [3] dopušta da države-članice EU mogu odrediti godišnji odnos proizvodnje električne i korisne toplotne energije kao odnos između stvarne proizvodnje električne energije i korisne toplote kada je ostvarena kogeneracija sa nižim kapacitetom postrojenja, korišćenjem pogonskih podataka jedinice.

2.6. Određivanje efikasnosti kogeneracije

Prema Direktivi [3] definiše se pojam visoko-efikasne kogeneracije, koja ispunjava sledeće uslove:

- Obezbeđuje uštedu primarne energije od najmanje 10 % u odnosu na odvojenu proizvodnju toplote i električne energije;
- Sva kogeneracija iz male i mikro kogeneracije smatra se visoko efikasnom kogeneracijom ako se ostvare bilo kakve uštede primarne energije.

Za visoko efikasnu kogeneraciju definiše se pojam ušteda primarne energije, koja se izračunava na osnovu sledeće formule:

$$PES = \left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_H}{\eta_{HREF}} + \frac{\eta_E}{\eta_{EREF}}} \right] \cdot 100 \% \quad (4)$$

gde je:

PES – ušteda primarne energije izražena u %;

$\eta_H = \frac{W_t}{Q_g}$ – toplotna efikasnost kogeneracije, definisana kao godišnja proizvodnja korisne toplote W_t podeljena sa unetom energijom goriva za proizvodnju ukupne godišnje korisne toplote i električne energije Q_g ;

η_{HREF} – referentna efikasnost za odvojenu proizvodnju toplotne energije;

$\eta_E = \frac{W_e}{Q_g}$ – električna efikasnost kogeneracije, definisana kao godišnja proizvodnja električne energije W_e podeljena sa unetom energijom goriva za proizvodnju ukupne korisne toplote i električne energije Q_g . Ako jedinica za kogeneraciju proizvodi i mehaničku energiju, proizvodnja električne energije može se uvećati za dodatnu ekvivalentnu proizvodnju električne energije koja je jednaka proizvedenoj mehaničkoj energiji, ali ova dodatna proizvodnja ne daje pravo na izdavanje garancija o poreklu električne energije;

η_{EREF} – referentna efikasnost za odvojenu proizvodnju električne energije.

Proračun uštede primarne energije za mikro-kogeneraciju može se vršiti na bazi korišćenja sertifikovanih podataka u formuli (4). Principi poređenja kogeneracije i odvojene proizvodnje toplote i električne energije su sledeći [3]:

- Porede se postrojenja za istu kategoriju goriva;
- Svaka jedinica za kogeneraciju poredi se sa najboljom jedinicom za odvojenu proizvodnju toplote i električne energije raspoloživom na tržištu i ekonomski opravdanom u godini izrade jedinice za kogeneraciju;

- Referentne vrednosti efikasnosti za jedinice za kogeneraciju starije od 10 godina utvrđice se prema referentnim vrednostima jedinica starih 10 godina;
- Referentne vrednosti efikasnosti za odvojenu proizvodnju toplote i električne energije uzimaće u obzir klimatske razlike između država-članica Evropske Unije.

3. KOGENERACIJA I EKOLOGIJA

Jedan od najvažnijih faktora koji su doprineli porastu učešća kogeneracije u Evropi je globalni pokret za smanjenje emisija gasova koji izazivaju zagađivanje atmosfere (SO_2 , NO_x) ili globalno otopljanje (grupa gasova sa efektom staklene bašte, predstavljena sa CO_2). Kako je u Srbiji dominantan primarni izvor energije niskokalorični lignit, koji sadrži velike količine balasta u vidu vlage (oko 50 %) i pepela (oko 20 %), proizvodnja samo električne energije u termoelektranama zahteva velike količine goriva (1,4–1,9 kg za 1 kWh) i ispušta ogromne količine pepela i dimnih gasova sa oksidima azota, sumpora, ugljenika i drugih elemenata koji zagađuju atmosferu i izazivaju promenu klime, shodno tabeli 2 [17].

Tabela 2.
Emisije iz termoelektrana u Srbiji, (g/kWh) [17].

Termoelektrana	CO_2	NO_x	SO_2	Čestice
TE Nikola Tesla A	1 194	2,0	10,5	4,0
TE Nikola Tesla B	1 170	2,1	9,9	0,2
TE Kolubara A	1 510	3,3	18,0	13,3
TE Kosovo A	1 546	2,4	6,7	14,0
TE Morava	1 072	1,9	13,8	3,6
TE Kostolac A	1 274	1,3	30,2	9,1
TE Kostolac B	984	1,9	39,8	1,8

Kogeneracija je svojim značajnim povećanjem energetske efikasnosti postala jedna od glavnih tehnologija, čijim povećanim učešćem može da se smanjuje emitovanje zagađujućih materija u atmosferu i posebno CO_2 radi smanjenja globalnog otopljanja u skladu sa zahtevima Konvencije Ujedinjenih nacija (UN) o globalnoj stabilizaciji klime. Povećana energetska efikasnost primenom kogeneracije se pokazala kao relativno jeftin način za smanjenje emisije CO_2 i drugih gasova, čije povećane koncentracije u atmosferi izazivaju preteće povećavanje prirodnog efekta staklene bašte, pošto kombinovana proizvodnja električne energije i toplote za grejanje ili industrijske potrebe smanjenom potrošnjom i izborom

odgovarajućih goriva može da snizi emisiju ugljenika za više od 75 % u odnosu na njihovu odvojenu proizvodnju. Evropska Unija je prvenstveno sa tim ciljem planirala da bi, prethodno navedenim povećanjem učešća kogeneracione proizvodnje, njene godišnje emisije CO₂ bile smanjene za 180 miliona tona do 2010. godine [17].

Smanjenja emisije zagađivača moguća su daljim povišenjem stepena korisnosti termoelektrana ili zamenu goriva, ali su za to ograničene mogućnosti postojeće tehnologije, a promena goriva ograničena je strukturom resursa u kojoj dominira ugalj, te se za dalje povišenje stepena iskorišćenja energije goriva računa na spregnutu proizvodnju toplote i električne energije i na kombinovane gasne i parne cikluse. Tako, kogeneracija može doprineti zaštiti životne sredine posredno, postizanjem ušteda u emisijama zagađivača i gasova sa efektom staklene bašte. Izbegnuta emisija CO₂ ima i svoju tržišnu vrednost. Prema usvojenoj šemi trgovine emisijama u Evropskoj Uniji, tržišna vrednost emisija se kretala od 5 do 30 € po toni izbegnute emisije CO₂. Imajući u vidu moguće finansijske efekte ostvarene izbegavanjem emisija CO₂ moguće je utvrditi vrednost koja bi bila ostvarena povećanjem energetske efikasnosti primenom kogeneracije. Na primer, rekonstrukcijom blokova termoelektrane „Nikola Tesla A” u kogeneracione, iz kojih bi, uz Obrenovac, bila isporučivana bazna toplotna energija i za grejanje Beograda, dodatne ekonomske efekte bilo bi moguće iskazati preko ekvivalentnog povećanja stepena iskorišćenja lignita ili preko izbegnute potrošnje prirodnog gasa. U prvom slučaju bi specifična emisija CO₂ iz termoelektrane „Nikola Tesla A” prikazana u tabeli 4 bila efektivno smanjena sa 1 194 na 889 g/kWh, ali je ispravnije uštedu iskazati u stvarno izbegnutoj potrošnji gasa za proizvodnju ekvivalentne količine bazne toplotne energije u kotlovima na gas u Beogradu. Naime izbegnuta potrošnja gasa pri punom opterećenju kotlarnica za proizvodnju iste količine (2,24 TWh godišnje) toplotne energije je oko 241,9 miliona Nm³ godišnje, iz čega proizilazi da bi godišnje bila izbegnuta emisija 422 853 tone CO₂, 20,803 tona CH₄ i 0,656 tona N₂O. Iskazana u ekvivalentnoj emisiji CO₂, izračunatoj uvažavajući relativne potencijale globalnog otopljanja CH₄ (21) i N₂O (310), izbegnuta emisija iznosi 423 493 tone CO_{2ekv}, što znači da bi tržišna vrednost izbegnutih emisija ostvarena primenom kogeneracije u termoelektrani „Nikola Tesla A” u značajnoj meri ublažila ekonomski rizik ovog projekta zbog gubitka proizvodnje električne energije i relativno skupog sistema za transport toplote, koji (rizik) i inače postaje sve manji zbog tendencije porasta cene prirodnog gasa.

4. STANJE PRIMENE KOGENERACIJE U SRBIJI

4.1. Osnovne karakteristike pojedinih tipova kogeneracije

Danas su u Srbiji zastupljena dva tipa praktične realizacije kogeneracionih postrojenja. To su elektroprivredna i industrijska kogeneracija. Treći tip tih kogeneracionih postrojenja, koja su vezana za rejonske toplane daljinskog grejanja su u planu, a jedino postrojenje iz te klase, TO Beograd, izgrađeno još 1965. godine je zbog neekonomičnosti napušteno i nalazi se u fazi gašenja. Četvrti tip su mala kućna kogeneraciona postrojenja, čija je primena stvar budućnosti [8].

Osnovne karakteristike pojedinih od pomenutih tipova kogeneracije su sledeće:

- U elektroprivrednoj kogeneraciji, primarna je proizvodnja električne, a dopunska (ili sekundarna) proizvodnja toplotne energije u svrhu grejanja i/ili zadovoljenja potreba industrije.
- U industrijskoj kogeneraciji se ima obrnut slučaj: Primarna je proizvodnja toplotne energije, neophodna za industrijski proces, a dopunska proizvodnja električne energije, koja se troši u dotičnoj industriji, dok se viškovi mogu prodavati drugim korisnicima ili elektroprivredi.
- Slično kao u industrijskoj kogeneraciji, u kogeneraciji rejonskih toplana, primarna je proizvodnja toplotne energije za daljinsko grejanje, dok se proizvedena električna energija najčešće isporučuje teritorijalno nadležnoj distribuciji.
- Kućna kogeneracija počiva na primeni malih postrojenja (od nekoliko kW do nekoliko desetina kW) za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije za potrebe domaćinstava i drugih malih potrošača (trgovine, škole, zdravstvene ustanove, sportsko-rekreativni centri, itd.) na bazi prirodnog gasa, kao primarnog energenta. Električni generatori ovakvih postrojenja obično su paralelno vezani na distributivnu mrežu niskog napona, sa kojom mogu imati ugovore za kupovinu i prodaju električne energije.

4.2. Elektroprivredna kogeneracija

Izuzev u TE „Nikola Tesla” B, TE „Morava” i TE „Kostolac” B, kogeneracija je prisutna u svim ostalim termoelektranama u Srbiji (TE „Nikola Tesla” A, TE „Kostolac” A, TE „Kolubara” A, TE-TO „Novi Sad”, TE-TO „Zrenjanin” i TE-TO „Sremska Mitrovica”). Stanje kogeneracionih kapaciteta u tim objektima, krajem 2007. godine bilo je sledeće [9]:

- TE „Nikola Tesla” A, od ukupno šest agregata ima u kogeneraciji agregate A1 i A2, nazivne snage na pragu od 2x191 MW_e, čija je ukupna toplotna snaga 197,6 MW_t, a godišnja proizvodnja toplote (u

periodu 2006-2008. godine) oko 225-250 GWh_t, koja se uglavnom koristi za grejanje Obrenovca i okoline. Ukupna snaga toplotnog konzuma je oko 91 MW_t. Pored toga, blokovi A5 i A6, ukupne električne snage od 2x280 MW_e snabdevaju tehnološkom parom industrijski pogon „Uljarice” u Obrenovcu, od oko 10 000-13 000 t godišnje.

- TE „Kolubara” je rekonstrukcijom takođe dodatno osposobljena za proizvodnju toplotne energije za grejanje stambenog naselja u Velikim Crljenima od oko 7 500 MWh_t godišnje i isporuku tehnološke pare preduzeću „Univerzal” iz Velikih Crljena od oko 20 000 t godišnje. Toplota se oduzima sa turbina agregata A1, A2 i A4, čija je ukupna električna snaga na pragu 87 MW_e.
- TE „Kostolac” A, ukupne električne snage od 90+191=281 MW_e na pragu ima osposobljena oba bloka (A1 i A2) za proizvodnju toplote za grejanje Požarevca, Drmna, Starog Kostolca i Kostolca sa godišnjom isporukom toplote od oko 200 GWh_t.
- TE-TO „Panonske elektrane” u Novom Sadu, ukupne električne snage dva bloka od 108+100=208 MW_e, namenski je građena za kombinovanu proizvodnju električne energije, toplote za grejanje i tehnološke pare. Ukupna toplotna snaga joj je 332 MW_t, a proizvodi toplotnu energiju između 125 i 220 MWh_t godišnje.

- TE-TO „Zrenjanin”, u koju je ugrađen jedan agregat, snage od 100 MW_e na pragu, namenski je građena kao kogeneraciono postrojenje, sa termičkom snagom od 310 MW_t (uz pomoćni pogon od 200 MW_t) sa ukupnom godišnjom proizvodnjom toplote za grejanje od oko 100 GWh_t i tehnološke pare od oko 25 000 t.

- Energana „Sremska Mitrovica” ima ugrađena tri agregata, ukupne električne snage na pragu od 28 MW_e i projektovane termičke snage za grejanje od 40 MW_t i tehnološke pare 200 t/h, sa godišnjom proizvodnjom od 30-35 GWh_t termičke energije za grejanje i oko 110 000 t tehnološke pare.

U tabeli 3 dati su detaljno svi osnovni podaci o elektranama i agregatima u Srbiji, koji su učestvovali u elektroprivrednoj kogeneraciji krajem 2007. godine. Pored toga, u istoj tabeli dati su i osnovni podaci o proizvodnji toplote za grejanje i tehnološke pare u TO „Vreoci”, koji posluje kao deo Elektroprivrede Srbije, a ne proizvodi električnu, već samo toplotnu energiju.

4.3. Kogeneracija u rejonskim toplanama za centralizovano daljinsko grejanje

Ovo je potpuno zanemareno polje za primenu kogeneracije, jer trenutno (posle gašenja TE-TO Novi Beograd), ne postoji ni jedna toplana daljinskog

Tabela 3.

Osnovni podaci o elektranama i agregatima u Srbiji koji su učestvovali u elektroprivrednoj kogeneraciji 2007. godine [9]

Red. broj	Elektrana/Agregat u kogeneraciji	Nazivna električna snaga na pragu MW _e	Projektovana term. snaga		Ostvarena godišnja proizvodnja toplote				Ostvarena godišnja proizvodnja električne energije u periodu 2001-2007. u GWh _e						
			Grejanje MWh _t	Tehnološka para t	2006.		2007.		2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.	2007.
					Grejanje MWh _t	Tehnološka para t	Grejanje MWh _t	Tehnološka para t							
1.	TE Obrenovac A / A1	191	107									1 072,1	524,8	1 220,6	
2.	TE Obrenovac A / A2	191	90,6									549,6	1 120,0	1 245,6	
3.	TE Obrenovac A / A1+A2	382	197,6		224 676		247 450		1 791,5	1 845,1	1 670,9	2 040,9	1 621,7	1 644,8	2 446,2
4.	TE Obrenovac A / A5, A6	560				12 847		10 959							
5.	TE Obrenovac A / A1-A6	1502			224 676	12 847	247 450	10 959	7 591,3	7 511,9	6 849,1	7 193,8	8 544,8	8 839,8	8 752,2
6.	TE Kolubara A / A1, A2, A4	245			7275	23 275	7 689	19 127							
7.	TO Vreoci				230 972	294 338	196 869	29 7514							
8.	TE Kostolac A / A1	90							40,5	35,8	-6,1	-11,4	0	0	309,1
9.	TE Kostolac A / A2	191							342,7	527,3	920	727	955,4	856,2	1 019,0
10.	TE Kostolac A / A1+A2	281			176 118		200 123		383,2	563,1	913,9	715,6	955,4	856,2	1 328,1
11.	TE-TO Novi Sad / A1	108	128	320											
12.	TE-TO Novi Sad / A2	100	204												
13.	TE-TO Novi Sad / A1+A2	208	332	320	124 611	7 819	215 688	239	443,4	271,1	538,8	295,1	250,7	135,8	423,1
14.	TE-TO Zrenjanin / A1	100	140	310+200*	99 262	26 612	97 035	23 594	26,2	34,3	107,1	111,6	110,7	35,3	50,0
15.	Energana Sremska Mitrovica / A1-A3	28	40	200	33 236	115 540	31 595	104 185					19,6	8,5	9,9
16.	TO Novi Beograd / A1-A3	84							0,7	2,1	0,4				
17.		4 373	709,6		896 150	480 431	996 449	455 618	2 645,0	2 715,7	3 231,1	3 123,2	2 958,1	2 680,6	4 257,3
18.	Vršna snaga Srbije na generatoru u MW								6 812	6 406	6 564	6 448	6 867	6 940	7 305

grejanja u Srbiji, u kojoj se koristi mogućnost za spregnutu proizvodnju toplotne i električne energije, uprkos potencijalu koje one nesumnjivo poseduju. Naime, centralizovano snabdevanje toplotnom energijom ostvareno je u svim većim gradovima u Srbiji, ali bez kogeneracije, osim u nekim slučajevima kada se to snabdevanje vrši iz industrijskih kotlarnica. Naročito povoljne okolnosti da se ta praksa uvede su u slučaju toplana na prirodni gas [10, 11].

4.4. Industrijska kogeneracija

Osnovni pokazatelji kogeneracije u industriji Srbije su, shodno tabeli 4, sledeći [12]:

- Instalisano je 78 jedinica u 37 proizvodnih pogona (na različitim lokacijama) ukupne bruto električne snage od oko 465 MW_e;
- Prosečna snaga postrojenja iznosi oko 6 MW_e, a prosečna starost kapaciteta je oko 30 godina;
- Prosečna ukupna godišnja proizvodnja električne energije iznosila je u regularnim uslovima (do 1990. godine) oko 800 GWh;
- Udeo industrijske kogeneracije u ukupnoj godišnjoj proizvodnji električne energije u Srbiji 1989. godine iznosio je u regularnim uslovima oko 2,5 %;
- Prosečna godišnja isporuka električne energije u javnu električnu mrežu iznosila je u regularnim uslovima približno deseti deo ukupno proizvedene električne energije u industriji.

Tabela 4.

Osnovni podaci o energanama sa kogeneracijom u industriji Srbije [12]

Grana industrije	Broj jedinica	Instalisani kapacitet		Starost godina
		Električna snaga (MW)	Učešće (%)	
Metalska	15	105	14,77	29
Hemijska i petrohemijska	16	107	23,02	34
Papirna	6	77	16,56	20
Prehrambena (šećerane i ostale)	31	161	34,62	23
Ostale grane	10	15	3,23	36
Ukupno	78	465	100,00	29

Struktura postrojenja prema gorivu je sledeća:

- Približno 1/3 od ukupnog broja jedinica koja čini oko 1/2 električnog kapaciteta (28 jedinica ukupne snage 215 MW_e) koristi ugalj kao gorivo (samo 8 jedinica, ukupne električne snage 90 MW_e, sagoreva lignit);
- Približno 2/3 jedinica koje predstavljaju drugu polovinu ukupnog instalisanog električnog kapa-

citeta sagoreva tečna goriva (u manjem broju slučajeva) i prirodni gas (u većem broju slučajeva).

- Mali je udeo najmanjih jedinica snage manje od 1 MW_e (samo 8 jedinica);
- Mali je udeo najvećih jedinica u broju, ali veliki u električnoj snazi (14 jedinica snage ≥10 MW_e koje, međutim, predstavljaju 200 MW_e električne snage);
- Najveće jedinice, snage 25 MW, koriste ugalj kao gorivo.

Struktura kogeneracionih jedinica shodno primeni u pojedinim industrijama prema tabeli 4 je:

- Industrija šećera (31 jedinica, 161 MW_e, prosečne starosti 29 godina);
- Metalski kompleks (15 jedinica, 105 MW_e, prosečne starosti 34 godine);
- Hemijska i petrohemijska industrija (16 jedinica, 107 MW_e, prosečne starosti 20 godina);
- Industrija papira (6 jedinica, 77 MW_e, prosečne starosti 23 godine);
- Ostale grane (ukupno 10 jedinica, 15 MW_e, prosečne starosti 36 godina).

Osnovni razlozi za današnju slabu primenu kogeneracije u industriji su teška ekonomska situacija u većini industrijskih grana, investiciona i kreditna nesposobnost većine privrednih subjekata, obustava proizvodnje i/ili niska proizvodna aktivnost u nekim industrijama, nepovoljan odnos cena prirodnog gasa i električne energije, zastarele energetske tehnologije, loše stanje postrojenja i, posledično, njihova niska raspoloživost i pouzdanost, niska energetska efikasnost, kao i nepovoljne tarife za nabavku rezervne i dopunske energije iz elektroprivrednog sistema, u odnosu na plasman viškova električne energije u isti. Proizvodnja električne energije u postrojenjima za kogeneraciju praktično je prekinuta tokom 90-ih godina prošlog veka zbog izuzetno niske proizvodne aktivnosti preduzeća, izuzetno niske i neekonomske cene električne energije iz javne električne mreže i relativno visokih cena prirodnog gasa i tečnih goriva. Postrojenja po pravilu nisu bila konzervisana, te je njihova funkcionalnost i pouzdanost sada nepoznata, ali se može pretpostaviti da, sem kogeneracionih jedinica u industriji šećera i papira, ostale su toliko zapuštene, da je njihova rehabilitacija neisplativa.

4.4. Kućna kogeneracija

Ova praksa predstavlja koncept malih, individualnih postrojenja za spregnutu proizvodnju toplotne i električne energije (naziva se još „mikro-kogeneracija”), najčešće na bazi prirodnog gasa kao

osnovnog energenta. Ona povećava efikasnost iskorišćenja primarne energije, odnosno bolju efikasnost potrošnje prirodnog gasa, uz pozitivan ekonomski, energetski i ekološki efekat i predstavlja budućnost distribuirane kogeneracije, ne samo u Srbiji (gde je u ovom trenutku nema) [13].

5. PERSPEKTIVE RAZVOJA U BLISKOJ BUDUĆNOSTI

5.1. Opšti pregled

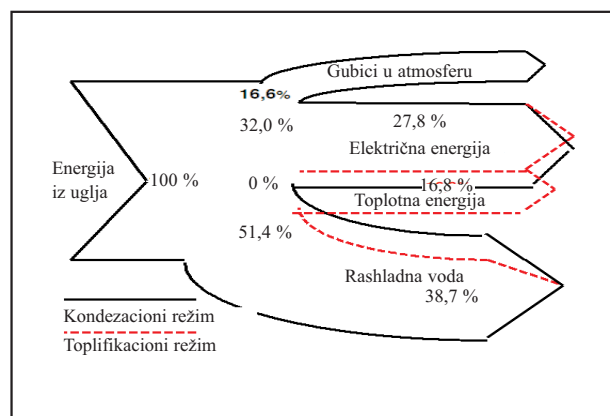
Najveći izgledi za brži razvoj kogeneracije, u bliskoj budućnosti, postoje u sektorima elektroprivrede i sistema centralizovanog daljinskog grejanja [13]. Razvoj u sektoru industrije je neizvestan, jer je nejasno kako i kojim tempom će se oporavljati srpska industrija, koja je doživela potpuni kolaps u periodu sankcija UN i bombardovanja NATO. Na stara kogeneraciona postrojenja, koja su u industriji Srbije postojala oko 1990. godine, verovatno se u većini slučajeva ne može računati, a dolazi u pitanje da li će uopšte biti oportuna i njihova obnova i rekonstrukcija. Nova postrojenja će se sigurno graditi i stara obnavljati u svim slučajevima gde respektivna industrija bude imala potrebe za obimnijim grejanjem i/ili tehnološkom parom dotične industrije (šećerane, hemijska industrija, metalurgija, itd.) i tu ih treba usmeravati da se maksimalno koriste pogodnosti kogeneracije i saradnja sa elektroprivredom.

Situacija sa kućnom kogeneracijom je još neizvesnija i njen razvoj će zavisi od cena opreme i raspoloživosti goriva, tako da je u ovom trenutku nemoguće da se prave bilo kakvi konkretni planovi razvoja. Međutim, kako je oko 78 % stanova u Srbiji bez instalacija centralnog grejanja (greju se individualnim uređajima na ugalj, drvo, gas ili električnu energiju), može se očekivati da će predstojeće širenje gasifikacije u Srbiji omogućiti značajno uvođenje individualne (mikro) kogeneracije, kada ona jednom otpočne da se koristi.

5.2. Elektroprivredna kogeneracija

Kada je u pitanju spregnuta proizvodnja toplotne i električne energije u termoelektranama na lignit Elektroprivrede Srbije, ona je, kako je napred izloženo, već primenjena u Obrenovcu i Kostolcu, a na tečna goriva i gas u Novom Sadu, Zrenjaninu i Sremskoj Mitrovici (shodno tabeli 3). Od posebnog interesa je završetak započetog projekta za snabdevanje baznom toplotnom energijom Beograda. Realizacija projekta toplifikacije Beograda iz termoelektrane „Nikola Tesla” A planirana je da bude sprovedena u 3 faze. U prvoj fazi bi, pošto bude komple-

tiran započeti toplovod od Termoelektrane „Nikola Tesla” A do Toplane „Novi Beograd”, toplota za grejanje bila proizvođena u prva dva i u šestom bloku (107 MW_t i 180 MW_t, respektivno), u drugoj bi za to bili rekonstruisani i četvrti i peti blok (380 MW_t), a u trećoj fazi i poslednji, treći blok (130 MW_t). Ukupna snaga instalisanih kapaciteta za grejanje bi sa sadašnjih 198 MW_t (91 MW_t za potrebe Obrenovca) narasla u prvoj fazi na 378 MW_t, u drugoj na 738 MW_t, a u trećoj fazi na 868 MW_t. Na ovaj način, blokovi Termoelektrane „Nikola Tesla” A bi imali maksimalno umanjene električne snage na pragu za 87 MW_e (0,230 MW_e/MW_t) u prvoj fazi, za 183 MW_e (0,248 MW_e/MW_t) u drugoj fazi i za 217 MW_e (0,250 MW_e/MW_t) u trećoj fazi. Ovo umanjeno bi se javljalo samo pri maksimalnom toplotnom opterećenju u toplifikacionom režimu, a u proseku bi tokom grejne sezone bilo znatno manje, dok ga van nje ne bi ni bilo. Pri tome bi ukupno iskorišćenje energije uglja, sa sadašnjih oko 31 % za blokove 1 i 2, odnosno 32 % za blok 3 i 32,5 % za blokove 4-6 u kondenzacionom režimu rada, bilo znatno povećano, na 42,7 % za blokove 1 i 2, odnosno 42,1 % za blok 3 i na 46,3 % za blokove 4-6 u toplifikacionom režimu. Na taj način bi prosečno iskorišćenje energije iz uglja u Termoelektrani „Nikola Tesla” A poraslo sa sadašnjih 32 % na 44,6 %. Na slici 1 je šematski prikazana struktura pretvaranja primarne energije iz uglja (100 %) u TENT A, u električnu energiju (32 % u kondenzacionom, odnosno 27,8 % pri toplifikacionom režimu), i u toplotnu energiju (16,8 % u toplifikacionom režimu) uz gubitke ispuštene u atmosferu (oko 17 %) i u rashladnu vodu (51,4 % u kondenzacionom i 38,7 % u toplifikacionom režimu rada).



Slika 1. Korisna energija i gubici energije za radne režime TENT A u trećoj fazi

Uprkos krajnjem pozitivnom efektu, na smanjenje ukupne potrošnje primarnog goriva, kada se koristi kogeneracija, pomenuti gubitak aktivne snage

generatora koji u njoj učestvuju, verovatno je jedan od glavnih razloga da se u elektroprivredi na kogeneraciju ne gleda blagonaklono. Materijalna kompenzacija tih gubitaka, svakako bi poboljšala atmosferu.

Pošto se u kombinovanoj (spregnutoj) proizvodnji smanjuje potrošnja goriva u odnosu na zbir pojedinačnih potrošnji pri odvojenoj proizvodnji toplotne i električne energije, smanjuje se i ukupna emisija dimnih gasova u atmosferu. Takođe, umesto velike količine otpadne toplote pri kondenzacionom radu termoelektrane TENT A (2 650 MW_t) i njome izazvanog toplotnog opterećenja Save, potreba za vodom za hlađenje u kombinovanom ciklusu je manja, jer je smanjena količina otpadne toplote (na ispod 2 000 MW_t) na račun toplifikacionih oduzimanja. Doduše, ovaj povoljni efekat ne može biti u potpunosti iskorišćen, jer se kao kritični sa stanovišta toplotnog opterećenja reke Save javljaju periodi maksimuma temperature njene vode i minimuma protoka, koji se pokazuju leti, van grejne sezone. U planu je, da se kogeneracija za potrebe grejanja Beograda uvede i u TE „Kolubara” B (2x350 MW_e), čija izgradnja je odavno započeta, ali je bila prekinuta tokom ratova i sankcija devedesetih godina i još nije nastavljena.

5.3. Potencijal kogeneracije u sistemima daljinskog grejanja

U 56 gradova Srbije postoje sistemi centralizovanog daljinskog grejanja, bazirani na sopstvenim toplanama, gde svaka od njih ima svoje grejno područje, u kojem napaja individualne i kolektivne potrošače stambenih (82 %) i poslovnih objekata (18 %). Instalirani kapacitet centralizovanog snabdevanja toplotom je oko 6 600 MW_t, dok je priključena snaga potrošača oko 6 000 MW_t. Opšta je tendencija da poslednjih godina ti grejni sistemi prelaze na korišćenje prirodnog gasa kao osnovnog energenta, što daje mogućnost uvođenja gasnih motora ili gasnih turbina u postojeća i buduća postrojenja za proizvodnju toplotne energije za grejanje i prakse simultane spregnute proizvodnje električne i toplotne energije u procesu distribuirane kogeneracije [13]. Ova mogućnost je posebno interesantna za velike gradove (Beograd, Niš, Kragujevac, Subotica, itd.), gde su pojedinačne snage izvora za grejanje veće, čime se mogu postići i veće snage izvora električne energije, a s tim i manja specifična investiciona cena po kW snage ugrađenih električnih agregata. Na to je stručnoj javnosti za slučaj Beograda skrenuta pažnja još 2003. godine u referatu [10]. Trenutno stanje (kraj 2008. godine) prikazano je u tabeli 5, odakle se vidi da na užem području grada postoji 11

rejonskih toplana na gas, sa ukupnom instalisanom toplotnom snagom od 2 285,5 MW_t (dok je ukupna instalirana snaga svih toplana na različita goriva, sa kojima rukuju „Beogradske elektrane” 3 396 MW_t). Njihov priključeni toplotni konzum je 2 760 MW_t (a ukupni priključeni konzum je 3 226 MW_t [14].

Tabela 5.

Toplane na prirodni gas u užem području Beograda, krajem 2008. godine [14]

Br.	Naziv toplane	Instalirani kapacitet izvora toplote MW _t	Instalirana snaga potrošača toplote MW _t	Napon priključka na električnu mrežu kV
1.	Novi Beograd	450+330*	1 060	110 i 35
2.	Dunav	360	536	35
3.	Konjarnik	238	343	35
4.	Cerak	250	231	35
5.	Miljakovac	116	84	10
6.	Voždovac	232	190	10
7.	Banovo Brdo	104	140	10
8.	Medaković	57	60	10
9.	Mirijevo	116	84	10
10.	Batajnica	23	26	10
11.	Banovci	9,5	6	10
12.	Ukupno, bez tri kotla utilizatora u TO Beograd	1 955,5		
13.	Sveukupno sa kotlovima utilizatorima u TO Beograd	2 285,5	2 760	

* Tri kotla, utilizatora, kapaciteta 110 MW_t, svaki.

Te toplane originalno nisu predviđene da se koriste za simultanu proizvodnju toplotne i električne energije u kogeneraciji. Takvo rešenje sa gledišta racionalnog gazdovanja energijom je neadekvatno, te postoji interes da se sve one, gde bi se tehničko-ekonomskom analizom dokazala opravdanost, pretvore od postrojenja za isključivu proizvodnju toplote, u kogeneraciona postrojenja za spregnutu proizvodnju toplotne i električne energije, putem naknadne ugradnje gasnoturbinskih električnih generatora i neophodne rekonstrukcije ili zamene kotlova za proizvodnju tople vode za grejanje i tehnološke pare, ako bi je ta promena uloge nametnula.

Preliminarni proračuni pokazuju da se u toplane koje koriste prirodni gas u Beogradu može ugraditi ukupno 350-580 MW_e gasno-turbinskih električnih generatora. Računajući sa samo 2 000 sati rada godišnje u toplifikacionom režimu, oni bi mogli obezbediti novih 0,7 do 1,16 TWh električne energije, odnosno najmanje 10 % godišnjih potreba grada. Ako se posmatraju samo zimski meseci (koji uče-

stvuju u ukupnoj potrošnji grada sa oko 65 %), taj procenat se penje na 15-21,5 % potreba zimi, kada bi predmetni kombinovani izvori uglavnom i bili korišćeni. Treba još napomenuti da bi se ta količina novoprodukovane električne energije imala u centru potrošnje, bez korišćenja prenosne mreže (a time i bez novih investicija u prenos i bez dodatnih prenosnih gubitaka). Jedino bi bilo neophodno pojačati spojne veze novih gasno-turbinskih generatora sa mrežom na relativno malim rastojanjima (1-5 km) do napojnih transformatorskih stanica 110/35 kV/kV (ili 110/10 kV/kV).

U tabeli 5 dat je pregled sadašnjih toplotnih kapaciteta toplana na prirodni gas u užem gradskom području Beograda, u kojem su takođe dati naponski nivoi vodova kojima su te toplane spregnute na električnu distributivnu mrežu [14]. Pregledom tabele 5 može se uočiti da su, pored TO Novi Beograd (450 MW_t + 330 MW_t u kotlovima ulizatorima izlaznih vrelih gasova iz gasnih turbina), najveće instalisane toplotne snage u TO Dunav (360 MW_t), TO Konjarnik (238 MW_t), TO Voždovac (232 MW_t) i TO Cerak (250 MW_t) koje su inače spregnute sa električnom mrežom preko dvostrukih 35 kV kablova ukupne prenosne moći oko 30 MVA svaki.

Prema preliminarnim proračunima, specifična potrošnja toplotne energije u ovim novim proizvodnim kapacitetima električne energije mogla bi biti samo 5 000-6 000 kJ/kWh, što bi, računajući sa donjom toplotnom moći prirodnog gasa od 33 338 kJ/m³, davalo specifičnu proizvodnju od 5,55-6,66 kWh/m³ (zavisno od lokacije), odnosno zahtevalo da se obezbede dodatne količine prirodnog gasa za proizvodnju 300 GWh/godišnje električne energije (u odnosu

na potrebe toplotnog konzuma) od najviše 105×10⁶-126×10⁶ m³ prirodnog gasa godišnje (koncentrisano u zimskim mesecima). Pri tome ne treba posebno naglašavati da ovako značajan proizvodni kapacitet treba da ima poseban tretman i sa stanovišta zamene kapaciteta postojećih termoelektrana u elektroenergetskom sistemu Srbije za vreme njihove skorašnje revitalizacije. Na taj način bi se samo u Beogradu mogla ostvariti značajna proizvodnja električne energije uz neznatno povećanje potrošnje gasa i time ostvariti velika ukupna ušteda u potrošnji električne energije iz sistema. Računajući da ovakva mogućnost postoji u još nekim gradovima u kojima se koristi gas (Subotica, Pančevo, i drugi), ukupni pozitivni efekti ugradnje gasnih turbina u postojeće toplane na gas radi uvođenja kogeneracije toplotne i električne energije bi uvećali navedene efekte procenjene za Beograd. Na primer, samo u Subotici bi mogle biti instalisane 2-3 gasne turbine ukupne snage oko 60 MW_e, koje bi proizvodile oko 180 GWh električne energije godišnje uz dodatni utrošak gasa od najviše 36 miliona m³.

5.4. Potencijal kogeneracije u industriji Srbije

Što se tiče potencijalnih kapaciteta kogeneracije u industriji uz uvođenje prirodnog gasa, pored obnove postojećih postrojenja energana reda 400 MW, moguće je računati i na novu kogeneraciju koja bi mogla da se ostvari dogradnjom gasnih motora ili gasnih turbina uz postojeće ili nove zamenske kotlove (s obzirom na godine starosti), čiji je broj oko 1 800, uz kapacitete prema tabeli 6 [12]. Posebno, mogućnosti kogeneracije postoje u Naftnoj industri-

Tabela 6.

Broj kotlova po starosti i kapacitetima u industriji Srbije [12]

Parni kotlovi (1)									
		Godine starosti							
		1-5		6-20		21-30		>30	
Snage MW	0-3	38	40,0 %	76	37,4 %	105	19,3 %	160	38,4 %
	3-6	32	33,3 %	76	37,4 %	140	25,8 %	96	23,2 %
	6-12	6	6,7 %	44	21,7 %	150	27,5 %	71	16,9 %
	>12	20	20,0 %	8	3,5 %	149	27,4 %	89	21,5 %
Ukupno 1 260		96		204		544		416	
Vrelovodni kotlovi (2)									
		Godine starosti							
		1-5		6-20		21-30		>30	
Snage MW	0-3	27	100 %	76	57,1 %	127	48,8 %	57	47,4 %
	3-6	-	-	44	33,4 %	82	31,7 %	50	42,1 %
	6-12	-	-	-	-	32	12,2 %	13	10,5 %
	>12	-	-	13	9,5 %	19	7,3 %	-	-
Ukupno 540		27		133		260		120	
(1)+(2): 1 800		123	6,8 %	337	18,7 %	804	44,7 %	536	29,8 %

ji Srbije, koje se mogu realizovati putem korišćenja malih gasnih ležišta, racionalnije sopstvene potrošnje i eliminisanja tehničkih gubitaka u proizvodnji (sagorevanje na baklji). Time bi se ne samo postigla proizvodnja električne energije neophodne za rad postrojenja (godišnje NIS iz sistema EPS-EMS-a preuzima oko 43 GWh za te potrebe i potrebe transporta fluida), već oslobodile i značajne količine prirodnog gasa za tržište, koje se sada troše za sopstvene potrebe NIS-a. Prema preliminarnim procenama, NIS bi mogao da izgradi kapacitete sa kogeneracijom snage oko 20 MW_e i ukupnom godišnjom proizvodnjom od oko 90 GWh električne i plasman od oko 60 GWh toplotne energije [13].

5.5. Potencijal kućne kogeneracije

Opcija povećanog udela prirodnog gasa u zadovoljenju energetske potrebe je strateško opredeljenje razvoja energetike Srbije [15]. Program priključivanja novih 500 000 domaćinstava na gasovodni

sistem omogućuje postojeća i planirana transportna i distributivna mreža, kojom će se gas dovesti u oko 70 % opština u Vojvodini i 44% opština na području centralne Srbije. Realizacija tog plana će imati veliki značaj i za razvoj elektroprivrede, jer će se uvođenjem gasa smanjiti potrošnja električne energije za toplotne potrebe u domaćinstvima, a s tim će se smanjiti i vršno opterećenje elektroenergetskog sistema za 600-750 MW_e [16]. Svetski trend je da se povećana potrošnja prirodnog gasa u domaćinstvima kombinuje sa mikro-kogeneracijom, preko individualnih kotlarnica, u kojima se u tu svrhu kao odgovarajuća postrojenja mogu koristiti gasni motori, mikroturbine, ili gorivne ćelije. Njihova primena i u Srbiji je stvar budućnosti.

5.6. Ukupni potencijal kogeneracije u Srbiji

Iz prethodnog pregleda evidentno je postojanje značajnog potencijala kogeneracije toplotne i električne energije u Srbiji, za koji postoje tehničke mo-

Tabela 7.

Potencijalni kapaciteti kogeneracije u Srbiji

Kategorija kapaciteta	Raspoloživa snaga, MW _e	Potencijalna snaga, MW _e	Ukupna snaga MW _e
Postojeći kapaciteti EPS-a			
– na tečna goriva i gas	355	900	1 255
– na lignit	520	300	820
– ukupno	875	1 200	2 075
Potencijalni novi kapaciteti EPS-a			
– na prirodni gas	0	1 000	1 000
– na lignit	0	300	300
– ukupno	0	1 300	1 300
Postojeći kapaciteti u SDG*			
– na tečna i gasovita goriva	105	0	105
– na čvrsta goriva	0	28	28
– ukupno	105	28	133
Potencijalni kapaciteti u SDG*			
– na tečna i gasovita goriva	0	500	500
– na čvrsta goriva	0	200	200
– na biomasu	0	70	70
– ukupno	0	770	770
Potencijalni kapaciteti industrije			
– postojeći kapaciteti	465	0	465
– novi kapaciteti	0	0	0
– ukupno	465	0	465
Potencijalni kapaciteti kogeneracije u sektoru široke potrošnje			
– Sektor domaćinstva	0	300	300
– Javni i komercijalni sektor	0	150	150
– Ukupno	0	450	450
Ukupno	1 455	3 748	5 193

* SDG – centralizovani sistem daljinskog grejanja

gućnosti da se u relativno velikoj meri iskoristi i time poveća današnje učešće kogeneracije (manje od 1 %) bar za red veličine. Sa stanovišta njenog statusa u okviru usvojenih strateških dokumenata Srbije, prvenstveno u okviru Strategije razvoja energetike Srbije do 2015. godine [15] i Programa njenog ostvarivanja do 2012. godine [16], očigledno je da su visoko ocenjeni, kako njena uloga u povećanju efikasnosti korišćenja primarne energije uz odgovarajući doprinos smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu, tako i potencijalne mogućnosti da se ona praktično primeni u oblastima elektroprivrede, daljinskog grejanja, industrije i široke potrošnje i time znatno poveća njeno procentualno učešće u ukupnoj proizvodnji električne energije u Srbiji. Pri tome, važnu ulogu ima i činjenica da je kogeneracija od posebnog značaja za sigurnost snabdevanja lokalnih potrošača energijom i usporenja rasta uvozne energetske zavisnosti.

Podrazumeva se da za sve instalisane kapacitete kogeneracije treba da bude obezbeđen adekvatni toplotni konzum, kako njihova ekonomska opravdanost ne bi bila dovedena u pitanje, nezavisno od sve povoljnijih uslova kako rastu cene goriva i električne energije. Adekvatnost primene kogeneracije prvenstveno se vidi u velikim termoelektranama na ugalj, ili prirodni gas, lociranim u blizini velikih gradova i u okviru industrija kojima je neophodna tehnološka para, kao i velikih javnih i komercijalnih kompleksa, koji iskazuju značajne potrebe za toplotnom energijom (tržni, školski, zdravstveni, turističko-rekreativni kompleksi i drugi javni objekti). Računajući sa mogućim trajanjem angažovanja pojedinih kategorija instalisanih kapaciteta kogeneracije iz tabele 7, saglasno pripadajućem toplotnom konzumu, proizilazi da bi proizvodnja električne energije iz kogeneracije mogla teorijski da dostigne oko 15 TWh/godišnje.

S obzirom da nije realno očekivati da sav taj potencijal kogeneracije bude aktiviran, bilo zbog toga što neće biti dovoljno finansijskih resursa da se svi mogući kapaciteti izgrade, bilo što neki kapaciteti neće biti ekonomski opravdani zbog nepostojanja adekvatnog toplotnog konzuma za visoko-efikasnu kogeneraciju, taj teorijski potencijal može biti prepolovljen. Pa ipak, i tada se može smatrati realnim cilj da udeo kogeneracije, koji će Evropska Unija da dostigne 2010. godine (18% od ukupne proizvodnje električne energije) u Srbiji bude dostignut sa uobičajenim zakašnjenjem od 15 do 20 godina. Na to navodi i moguća struktura potencijalnih kogeneracionih izvora električne i toplotne energije u Srbiji, utvrđene u tabeli 7.

6. ZAKLJUČAK

Polazeći od činjenica da je, s jedne strane, učešće kogeneracije u sadašnjoj ukupnoj proizvodnji električne energije u Srbiji praktično zanemarljivo (ispod 1 %), a da se, s druge strane, njome postiže velika ušteda primarne energije, Zakonom o energetici Srbije je ona posebno stimulisana svrstavanjem ovakvih izvora u kategoriju povlašćenih proizvođača električne energije (pod uslovom da postignu odgovarajuću energetska efikasnost). Računajući na ukupni instalisani kapacitet potrošača toplotne energije u Srbiji, mogući tehnički potencijal kogeneracije je veći od 10 % od ukupne proizvodnje električne energije u Srbiji, tj. za red veličine veći od sadašnjeg učešća. Ekonomska opravdanost kogeneracije u sadašnjem stanju dispariteta cena električne energije i gasa i nesprovođenja zakonske odredbe o povlašćenim proizvođačima električne energije ne pruža mogućnost da se sav taj potencijal iskoristi. Međutim, sa očekivanim rastom cena svih vrsta energije i potrebom smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte, kao i sa razvojem distribuirane proizvodnje energije i pojavom nezavisnih proizvođača električne energije, moguće je da se taj potencijal iskoristi do nivoa od 10 % učešća u ukupnoj proizvodnji električne energije do 2015. godine [15, 16].

Postojeća potreba za realnim utvrđivanjem njenog teorijskog, tehničkog (ostvarljivog) i ekonomski opravdanog potencijala je pokazala da se mogu očekivati uštede reda 15-20 % u zavisnosti od vrste, odnosno od trajanja toplotnog konzuma. Ovako značajna ušteda može biti dobra osnova za dugoročno planiranje razvoja kogeneracije u Srbiji, vodeći računa, kako o njenim pozitivnim ekonomskim i ekološkim efektima, tako i o smanjenju uvozne energetske zavisnosti. To se ne odnosi samo na sektor elektroprivrede i komunalne energetike, već i na sektor industrije, gde je opravdana gradnja industrijskih energana, kao i na sektore uslužnih delatnosti i široke potrošnje u vidu mikro-kogeneracije na gas u slučaju pojedinačnih domaćinstava. Mogući ekonomski opravdani efekti kogeneracije su bar 10 %, a sa očekivanim rastom cena goriva i još veći. Pri tome, treba računati na očekivanu obavezu primene Direktive EU o kogeneraciji, kao i na Zakonom o energetici Republike Srbije utvrđenog statusa povlašćenog proizvođača električne energije kogeneraciji pri kojoj se postiže ukupni stepen iskorišćenja goriva iznad propisane donje granice. Treba napomenuti da je kogeneracija jedan od najefikasnijih načina da se smanje emisije gasova sa efektom staklene bašte, imajući u vidu obaveze koje proističu iz ratifikacije Kjoto protokola i kasnijeg prelaska Srbije iz sadašnjeg statusa „non-annex 1” zemlje u status zemlje obveznice da primeni odredbe novog Kjoto protokola.

7. LITERATURA

- [1] *** „A Guide to Cogeneration”, Publikacija Evropske asocijacije za promociju kogeneracije, EDUCO GEN, Bruxelles, March 2001.
- [2] *** „Zakon o energiji Republike Srbije”, Službeni glasnik RS, br. 84 od 24. 7. 2004.
- [3] *** Direktiva Evropskog Parlamenta i Saveta br. 2004/8/ES od 11. 2. 2004. godine, Bruxelles, Belgium, 2004.
- [4] *** „Cogeneration”, Članak UNEP-a u publikaciji „Energy Technology Fact Sheet” iz januara 2001. www.uneptie.org/energy.
- [5] *** „European Combined Heat and Power: A Technical Analysis of Possible Definition of the Concept of „Quality CHP” – SG Quality CHP, Publikacija EUROELECTRIC, Ref. 2002-112-004, jun 2002.
- [6] A. Held and M. Ragwitz, „Identification of Administrative and Grid Barriers to the Promotion of Electricity from Renewable Energy Sources (RES-EČ”, Report, Fraunhofer Institut for DG TREN, Karlsruhe, Germany, June 2007.
- [7] Alberto Ortiz de Elgea Olasolo, „National Report on State of SSCHP Policy and Sector Situation”, Basque Energy Board (EVEČ, Bilbao, Spain, May 2004.
- [8] A. Mazer, „Electric Power Planning for Regulated and Deregulated Markets”, Wiley-Interscience, New York, NY, USA, 2007.
- [9] *** Godišnji izveštaji Elektroprivrede i Elektromreže Srbije 2001-2008.
- [10] M. Čalović i M. Mesarović, „Kogeneracija: Spregnuta proizvodnja toplotne i električne energije – velika šansa Beograda”, Zbornik radova sa 26-og Savetovanja JUKO CIGRE, Banja Vrućica, 26-30. 5. 2003. godine.
- [11] D. Vukotić i N. Krstić, „Mogućnosti primene distribuirane proizvodnje na konzumnom području EDB”, Zbornik radova 25 Savetovanja JUKO CIGRE, Herceg-Novi, 16-20. 9. 2001. godine.
- [12] N. Pavlović, „Industrijska kogeneracija u svetlu Direktive EU – Mogućnosti i ograničenja primene u Srbiji i višegodišnji program za podršku primene kogeneracije”, Saopštenje izloženo na Konferenciji „Energetska efikasnost u industriji”, Donji Milanovac, septembar 2005. godine.
- [13] M. Mesarović i M. Čalović, „Potencijal kogeneracije toplotne i električne energije u Srbiji”, Zbornik radova Savetovanja „Elektrane 2008”, Vrnjačka Banja, 29-31. 10. 2008.
- [14] *** Podaci „Beogradskih elektrana” od 10. 10. 2008. godine.
- [15] *** „Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2015. godine”, Termotehnika, Godina XXXI, br. 1-2, 2005, str. 3-70.
- [16] *** „Program ostvarivanja strategije razvoja energetike Republike Srbije 2007-2012. godine”, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 17/07.
- [17] *** „Potencijal kogeneracije toplotne i električne energije u Srbiji”, studija urađena u Energoprojektu (NIRC) za Ministarstvo nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, 2007. godine.

ZAHVALNOST:

Autori zahvaljuju Ministarstvu nauke i tehnološkog razvoja na finansijskoj podršci za izradu Studije energetskog potencijala kogeneracije u Srbiji, na osnovu koje je napisan ovaj rad.

Rad je primljen u uredništvo 02. 04. 2009. godine



Miodrag Mesarović je diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu i doktorirao na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Zaposlen je u „Energoprojekt”, gde je prošao razvojni put od projektanta do pomoćnika direktora i predsednika stručnog saveta. Redovni je član Akademije inženjerskih nauka Srbije, Generalni sekretar komiteta Srbije u Svetskom savetu za energiju, član komiteta C1 CIGRE, član Naučnog odbora Društva termičara Srbije i drugih stručnih organizacija. U okviru Nacionalnog programa energetske efikasnosti u Ministarstvu nauke i tehnološkog razvoja vodi program energetske efikasnosti u domaćinstvima. Držao je poslediplomsku nastavu na fakultetima u Beogradu, Zagrebu, Sarajevu i Skoplju. Rukovodio je brojnim projektima, studijama i strateškim dokumentima razvoja energetike. Publikovao je oko 200 stručnih i naučnih radova u zemlji i inostranstvu.



Milan S. Čalović je penzionisani profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, gde je u periodu od 1980-1998. godine predavao predmete iz oblasti analize, planiranja, eksploatacije, upravljanja i regulacije elektroenergetskih sistema, na diplomskim i postdiplomskim studijama. Pre toga je u periodu od 1958-1980. godine radio u Elektroprivredi Srbije.

Jedini je, ili prvi, autor knjiga „Osnovi analize elektroenergetskih mreža i sistema” (2004), „Planiranje elektroenergetskih sistema” (2000), „Eksploatacija elektroenergetskih sistema” (I izdanje: 1999, II izdanje: 2005) i „Regulacija elektroenergetskih sistema” (u dva toma, 1997).

Vladica Mijailović

Koncepti održavanja visokonaponske opreme i inostrana praksa

Pregledni rad
UDK: 621.31

Rezime:

U radu je dat opšti pregled koncepcija održavanja visokonaponske opreme, koje se, generalno, može podeliti na korektivno i preventivno. Preventivno održavanje se, dalje, deli na održavanje u fiksnim vremenskim intervalima i održavanje na osnovu stanja. „Izvedeni” vid preventivnog održavanja je tzv. RCM-koncept, koji predstavlja kombinaciju dva predhodno navedena načina preventivnog održavanja. Takođe, izloženi su koncepti održavanja koji se primenjuju u velikim elektroprivrednim kompanijama u svetu.

Ključne reči: održavanje, korektivno, preventivno, stanje, inostrana praksa

Abstract:

HV EQUIPMENT MAINTENANCE CONCEPTS AND INTERNATIONAL PRACTICE

The paper gives a general overview of HV-equipment maintenance concepts, which can be divided on corrective and preventive maintenance. Preventive maintenance can be classified on time-based maintenance and condition-based maintenance. „Derived” form of preventive maintenance is RCM-concept, as a combination of the two above mentioned preventive maintenance concepts. Also, an overview of maintenance concepts applied in great world electric power companies is given.

Key words: maintenance, corective, preventive, condition, international practice

1. OPŠTE [18]

Ako se izuzme investiranje u izgradnju novih objekata, drugu stavku po veličini u poslovanju svake elektroprivredne kompanije, posle troškova za plate zaposlenih, predstavljaju troškovi održavanja elektroenergetskih postrojenja i vodova.

Prema IEC definiciji, pod održavanjem se podrazumeva „skup svih tehničkih i administrativnih mera koje se preduzimaju radi:

a) obezbeđenja da elementi i objekti dugoročno obavljaju predviđenu funkciju i

b) povratka u ispravno, radno, stanje nakon ispada iz pogona zbog kvarova”.

Ne postoji koncept, metoda ili uređaj čijom primenom se u potpunosti mogu predvideti, detektovati ili otkloniti poremećaji, degradacioni procesi i uslovi koji mogu dovesti do delimičnog ili potpunog narušavanja predviđene funkcije elektroenergetskog objekta (postrojenja ili voda). Međutim, adekvatnim održavanjem svi napred pomenuti uticaji se mogu svesti na najmanju moguću meru, za zadate uslove eksploatacije.

Generalno posmatrano, održavanje se može podeliti na korektivno, preventivno održavanje u fik-

Dr Vladica Mijailović, vanr. prof. – Tehnički fakultet, 32 000 Čačak, Svetog Save 65

snim vremenskim intervalima i preventivno održavanje na osnovu stanja. „Izvedeni” koncept preventivnog održavanja je tzv. RCM-koncept (*Reliability Centered Maintenance*) (ne postoji adekvatan prevod u našem jeziku). Ovaj koncept predstavlja kombinaciju dva prethodno navedena koncepta preventivnog održavanja.

2. KONCEPCIJE ODRŽAVANJA [7–10]

2.1 Korektivno održavanje

Korektivno održavanje se sprovodi nakon nastanka funkcionalnih kvarova, kada element više ne može da obavlja predviđenu funkciju. Sastoji se od delimične ili potpune zamene posmatranog elementa ili njegove popravke. Step (obim) preduzetih aktivnosti prvenstveno zavisi od toga da li je oprema u prethodnom periodu eksploatacije bila obuhvaćena preventivnim održavanjem ili ne i, ako jeste, da li je održavanje bilo adekvatno.

Trajanje otklanjanja kvara zavisi od stepena oštećenja, obučenosti ljudstva i raspoloživosti rezervne opreme. Da li će tokom otklanjanja kvara doći i do prekida napajanja potrošača zavisi od konfiguracije postrojenja, redundantnosti elemenata i mogućnosti napajanja iz drugog pravca.

Ukoliko oprema uopšte nije bila održavana, kvarovi su najčešće nepopravljivi, odnosno otklanjaju se ugradnjom nove opreme.

2.2 Preventivno održavanje u fiksnim vremenskim intervalima

Ovo je najstariji i najzastupljeniji koncept održavanja opreme. Sprovodi se u fiksnim intervalima, koji se odnose na prethodno provedeno vreme u eksploataciji (na primer, energetske transformatori), radne časove ili radne cikluse opreme (prekidači, regulatori napona). Planovi i procedure održavanja se zasnivaju na preporukama proizvođača opreme, standardima, propisima i iskustvu korisnika opreme.

Ovakav način održavanja obično obezbeđuje zahtevani nivo raspoloživosti elementa s obzirom na njegovu namenu, ali na neekonomičan i tehnički prevaziđen način. Održavanje elemenata iste namene i istih karakteristika nema iste efekte, ako se sprovodi u jednakim vremenskim intervalima, ukoliko ovi elementi rade sa različitim opterećenjima, u različitim ambijentalnim uslovima i ako nisu iste starosti.

Suštinski problemi pri pravljenju programa preventivnog održavanja su finansijske prirode. S jedne strane, može se postaviti pitanje zašto održavati nešto što se u prošlosti nije kvarilo? S druge strane,

ekonomska procena efekata bilo kog programa održavanja se može obaviti samo statistički. Tek kada dođe do ispada zbog kvara, proračunom nastalih troškova i šteta može se proceniti valjanost programa preventivnog održavanja.

2.3 Preventivno održavanje na osnovu stanja

Stanje predstavlja kvalitativnu procenu sposobnosti elementa da obavlja predviđenu funkciju. Održavanjem na osnovu stanja definiše se veza uzrok ↔ simptom ↔ efekat (posledica), radi utvrđivanja da li postoji potreba za određenim korektivnim aktivnostima.

Za svaki element su ustanovljeni parametri čije vrednosti određuju njegovo stanje. Ako se vrednost svakog od tih parametara nalazi unutar definisanog opsega (referentne vrednosti) element se smatra ispravnim. Upoređenjem izmerenih vrednosti pojedinih parametara sa referentnim vrednostima (dijagnostikovanje) utvrđuje se da li je element ispravan ili ne i o kojoj vrsti kvara (poremećaja) se radi. Održavanje na osnovu stanja je veoma efikasno, i tehnički i ekonomski. Takođe, maksimalno se eliminiše uticaj ljudskog faktora kada je u pitanju procena vrste i ozbiljnosti nastalog poremećaja i kvalitet obavljenih poslova radi njegovog otklanjanja.

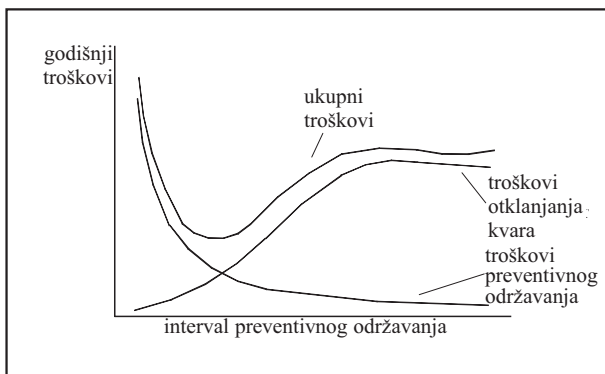
Primera radi, razmotrimo primenu metode analize rastvorenih gasova kao osnovnog i najvažnijeg dela programa održavanja na osnovu stanja. Na osnovu intenzivnih laboratorijskih analiza i eksploatacionih podataka prikupljenih od velikog broja korisnika, utvrđeno je da u kotlu transformatora nedvosmisleno postoji pražnjenje ukoliko je koncentracija acetilena u ulju veća od određene granične vrednosti ili ako se koncentracija acetilena povećava brzinom većom od dozvoljene. Na osnovu toga se može predvideti kada će doći do kvara u transformatoru, tako da se može planirati isključenje transformatora iz pogona i otklanjanje poremećaja pre nego što se isti pokvari.

Vrednosti svih važnih parametara se mogu pratiti stalno (kontinualni monitoring) ili povremeno. Koji način će biti primenjen zavisi od ponašanja elementa u prethodnom periodu eksploatacije, starosti elementa i njegove važnosti. U anglo-američkoj literaturi povremeno merenje važnih parametara se naziva *prediktivno* ili *prognozno* održavanje (*Predictive Maintenance*), dok se samo kontinualni nadzor i potrebne aktivnosti nazivaju održavanje na osnovu stanja (*Condition Based Maintenance*). Kontinualni nadzor omogućava precizno praćenje vrednosti i trenda promene pojedinih ili, ređe, svih parametara i isključenje elementa kada neki od parametara premaši podešenu vrednost.

Ključna razlika između održavanja u fiksnim vremenskim intervalima i održavanja na osnovu stanja je da se, u zavisnosti od rezultata sprovedenih ispitivanja, u potpunosti mogu eliminisati ili odložiti pojedine ili sve aktivnosti koje bi bile sprovedene u sklopu održavanja u fiksnim vremenskim intervalima. Takođe, značajno se smanjuju i troškovi održavanja. Velike elektroprivredne kompanije saopštavaju da su uvođenjem koncepta održavanja na osnovu stanja redukovale troškove održavanja za oko 30 % u odnosu na troškove održavanja u fiksnim vremenskim intervalima. Na primer, neka je planom održavanja u fiksnim vremenskim intervalima obuhvaćeno 100 elemenata iste vrste i namene. Bez obzira da li je potrebno ili ne, na ovim elementima će biti obavljene planirane aktivnosti, što će zahtevati veliki broj radnih sati za anagažovane radnike, dugo vreme isključenja i materijalne troškove. Međutim, ako se održavanje ovih 100 elemenata sprovede na osnovu stanja, biće potrebno da se na svim elementima izvrši samo provera bitnih parametara, dok će se intervencije sprovesti samo na onim elementima na kojima to bude potrebno, zavisno od rezultata obavljenih provera. Ovakav način održavanja, očito, traje znatno kraće, zahteva angažovanje manjeg broja radnika i manje košta. Takođe, znatno se produžava vreme između provera. Na slici 1 prikazana je kvalitativna zavisnost godišnjih troškova otklanjanja kvarova i troškova održavanja od dužine intervala između dva preventivna održavanja. Sa ove slike se mogu izvući veoma važni zaključci:

- troškovi otklanjanja kvarova (popravka i/ili zame-na) rastu s vremenom zbog starenja, raznih degradacionih procesa i nedovoljnog ili nekorektnog održavanja,
- visina troškova preventivnog održavanja je obrnuto proporcionalna dužini perioda između dva preventivna održavanja,
- za date pokazatelje pouzdanosti opreme u postrojenju moguće je izračunati najpovoljniju dužinu perioda održavanja (vrednost za koju se imaju najniži eksploatacioni troškovi). Za iste pokazatelje pouzdanosti, interval između dva preventivna održavanja će biti duži ako elektroprivredno preduzeće obuhvati samo štete koje ono trpi zbog neisporučene električne energije i iznenadno ispale snage, odnosno biće kraći ako se u obzir uzmu i štete koje trpe potrošači zbog prekida u napajanju električnom energijom.

Iskustva brojnih korisnika pokazuju da se primenom dobro osmišljenog koncepta održavanja na osnovu stanja mogu postići veoma dobri rezultati, u ekonomskom i tehničkom pogledu. Postoji čitav niz komercijalno dostupnih mernih uređaja koji omogu-



Slika 1 Zavisnost pogonskih troškova od dužine intervala preventivnog održavanja

ćavaju brza i relativno jeftina ispitivanja, neka čak i bez isključivanja ispitivane opreme iz pogona.

Osnovne pretpostavke za realizaciju efikasnog sistema održavanja su poznavanje opreme ugrađene u sistem i precizna pogonska statistika o kvarovima koji su se dogodili i merama koje su preduzete u sklopu preventivnog održavanja i u sklopu korektivnog održavanja. Takođe, veoma je važno raspolagati podacima o ispitivanjima i merenjima koja su izvršena. Nedostatak podataka bilo koje vrste predstavlja ozbiljnu teškoću. Naime, procena stanja elementa se zasniva i na utvrđivanju apsolutnih vrednosti bitnih parametara i na upoređenju sa podacima iz prethodnih merenja. Na osnovu apsolutnih vrednosti pojedinih parametara se može proceniti trenutno stanje elementa, a upoređenjem se utvrđuje da li je u periodu između dva merenja došlo, eventualno, do nedozvoljenog slabljenja pojedinih karakteristika. Za upoređenje se mogu upotrebiti podaci koji su prikupljeni za elemente iste namene, koji imaju slične karakteristike i rade u sličnim eksploatacionim uslovima. Nabavka ovih podataka je veoma skupa.

Izrada plana preventivnog održavanja je veoma složen proces. Primera radi, dva elementa iste namene, identičnih karakteristika i pogonske starosti se ne moraju održavati istovremeno jer rade sa različitim opterećenjem i u različitim ambijentalnim uslovima.

Kada su u pitanju elementi postrojenja, najveća pažnja se posvećuje održavanju energetske transformatora, zbog njihove cene, brojnosti i važnosti.

Važno je istaći da se, od svih merenja i ispitivanja koja se sprovode u cilju utvrđivanja stanja elementa, 80 % odnosi na proveru stanja izolacije.

Održavanje prekidača je tipičan primer važnosti pogonske statistike. Imajući u vidu da prekidači tokom čitavog veka eksploatacije „rade” nekoliko sekundi ili minuta, i njihov broj, održavanje svih prekidača je apsolutno neekonomično. Na osnovu podataka o ponašanju u prošlosti, primenom probabili-

stičkih modela, procenjuje se stanje i verovatnoća kvara svakog od prekidača i određuju oni na kojima će biti izvršena odgovarajuća ispitivanja. U zavisnosti od dobijenih rezultata sprovedenih analiza i eventualnih ispravki primenjenog modela, u sledećem ciklusu održavanja biće izvršena ispitivanja nove grupe prekidača i/ili dopunska ispitivanja na prekidačima iz prve grupe, za koje je utvrđeno da nisu u dobrom stanju.

Preterano održavanje opreme može da dovede do znatno intenzivnijeg starenja nego što bi starila da uopšte nije održavana. Primer za ovo je održavanje uređaja relejne zaštite. Neka relej reaguje 20 puta godišnje i neka je period eksploatacije 40 godina, dakle 800 reagovanja ukupno, a vreme reagovanja 80-300 s. Ako se taj relej testira svake godine a testiranje traje samo 30 s, tokom perioda od 40 godina vreme testiranja će iznositi 1 200 s, dakle, bar četiri puta duže nego da je radio u najnepovoljnijim uslovima.

Ekonomska analiza se, takođe, zasniva na stohastičkim modelima, čijom primenom se procenjuju efekti pojedinih planova održavanja.

2.4 RCM-KONCEPT ODRŽAVANJA

RCM-koncept predstavlja proces određivanja najefikasnijeg programa održavanja. Obuhvata sve vidove preventivnog održavanja, pa čak i mogućnost da se analizirana oprema uopšte ne održava preventivno, ukoliko postojeća situacija omogućava ostvarenje željenog (zahtevanog) nivoa pouzdanosti sa kojim se obavlja predviđena funkcija u jednom delu ili čitavom planskom periodu eksploatacije. Cilj RCM-koncepta je da se postigne ravnoteža između troškova koji se imaju radi realizacije nekog rešenja i ušteda (koristi) koje to rešenje donosi, uz ostvarenje potrebnih tehničkih kriterijuma. Ovo je apsolutno probabilistički pristup koji zahteva visoko sofisticirane modele i precizne ulazne podatke. Obično se primenjuje u oblastima gde posledice kvarova variraju u širokom opsegu (avio-kompanije, svemirski brodovi, nuklearne elektrane). Primera radi, primenom RCM-koncepta u Boeing-u su troškove eksploatacije smanjili za oko 20 %, jer se pokazalo da se, bez uticaja na pouzdanost letilice, pojedini važni delovi mogu menjati ne posle 1 200 h leta već posle 1 400 h.

Prema standardu SAE JA 1011 [21], RCM-priступ treba da odgovori na sledećih sedam pitanja:

- Koje funkcije treba da obavlja i kakve osobine treba da ima posmatrani element-funkcionalna celina pod zadatim pogonskim uslovima?
- Koji kvarovi dovode do prekida obavljanja predviđene funkcije (funkcionalni kvarovi)?

- Koji su uzroci svakog od funkcionalnih kvarova?
- Šta se dešava kada se dogodi neki od kvarova?
- Koje su posledice svakog od kvarova pojedinačno?
- Šta uraditi da se pojedini kvarovi predvide ili spreče (koje mere preduzeti i kada)?
- Šta uraditi ako nije moguće ustanoviti povoljne (prihvatljive) preventivne mere?

Kada je u pitanju održavanje visokonaponske (VN) opreme po RCM-konceptu, sprovode ga veće elektroprivredne kompanije koje raspolažu preciznom pogonskom statistikom. Prema ovom konceptu, sprovodi se preventivno održavanje prekidača i uređaja relejne zaštite.

3. PRIMENJENI KONCEPTI ODRŽAVANJA U VELIKIM KOMPANIJAMA

3.1 Japan [1,4]

Održavanje se sprovodi na osnovu stanja elemenata.

Aktivnosti koje se sprovode u sklopu programa održavanja klasifikovane su kao:

1. Inspekcije,
2. Otklanjanje poremećaja i poboljšavanje karakteristika opreme,
3. Otklanjanje nastalih kvarova,
4. Prevencija kvarova.

Sprovođenje ovih radova zahteva precizan pripremni-administrativni-proces: priprema planova rasporeda radova, utvrđivanje redosleda postupaka u okviru planiranih radova, beleženje svih rezultata do kojih se dođe tokom rada, formiranje izveštaja i analiza rezultata. Veoma dobri efekti su ostvareni kompjuterizacijom čitavog sistema održavanja i podelom odgovornosti po oblastima: energetski transformatori, nadzemni vodovi, kablovski vodovi, zaštitni i kontrolni uređaji, uređaji za komunikaciju, sklopni elementi i dr.

Planiranje svih aktivnosti se vrši dugoročno, na godišnjem, mesečnom i dnevnom nivou.

Dugoročnim planovima se utvrđuju objekti i elementi koji će biti podvrgnuti inspekciji tokom narednih 6(šest) godina, pri čemu se detaljan plan rada pravi za godinu dana unapred. Takođe, za tu godinu se pravi i precizan mesečni plan. Mesečni plan rada je ulazna informacija za mesečni plan održavanja na nivou preduzeća. Time se omogućava precizno planiranje angažovanja ljudstva, materijalnih sredstava i isključenja potrošača.

Dnevni planovi rada podležu hitnoj promeni ukoliko na opremi planiranoj za proveru dođe do kvara, koji tada otklanjaju za to nadležne ekipe.

Ovo, takođe, dovodi i do izmena mesečnih i godišnjih planova.

Sistem održavanja se sastoji od 3(tri) baze podataka.

b-1) Baza sa tehničkim podacima za svaki ugrađeni element.

b-2) Baza sa podacima o kvarovima i poremećajima koji su se dogodili na svakom od elemenata koji se nalaze u b-1).

b-3) Baza sa podacima o sprovedenim aktivnostima u sklopu preventivnog i korektivnog održavanja na svakom elementu pojedinačno.

Održavanje se, u najvećoj meri, sprovodi na osnovu utvrđenog stanja elementa, mada ima elementa oko čijeg održavanja se konsultuju proizvođači. Pri proceni stanja energetskih transformatora ključna je primena detaljne analize gasova rastvorenih u ulju. Važno je naglasiti da su kriterijumi interpretacije rezultata merenja i kriterijumi za utvrđivanje stanja znatno stroži nego odgovarajući kriterijumi u Evropi i Americi. Kao posledica toga, primera radi, prosečan vek eksploatacije energetskih transformatora u Japanu je oko 65 godina. Osnovu za utvrđivanje stanja transformatora predstavljaju rezultati gasno-hromatografske analize. Rezultati se interpretiraju primenom nekoliko interpretacionih šema. Ustanovljena je korelacija kojom je moguće na osnovu utvrđene koncentracija ugljen-dioksida i ugljen-monoksida proceniti koncentraciju furanskih komponenti. Takođe, na osnovu koncentracija ovih gasova može se proceniti vrednost stepena polimerizacije, koji se može izračunati na osnovu proteklog vremena eksploatacije i upotrebljene vrste papira. Ukoliko se vrši direktno određivanje sadržaja furanskih komponenti moguće je proceniti vrednost stepena polimerizacije. Na osnovu napred navedenog, upoređenjem odgovarajućih podataka može se utvrditi prisustvo degradacionih procesa, konstatovati da su uslovi eksploatacije očekivani, bolji ili lošiji od očekivanih.

Radi ilustracije efikasnosti izloženog koncepta održavanja navešćemo sledeće:

U kompaniji sa 6 celina zaposleno je 5 200 radnika. Nakon uvođenja koncepta održavanja na osnovu stanja, direktna godišnja ušteda je jednaka iznosu plata za 200 radnika, dakle 3,8 % godišnjeg platnog fonda. Indirektni povoljni efekti se ogledaju u nižoj učestanosti kvarova i nižoj ceni i kraćem trajanju otklanjanja poremećaja.

3.2 Nemačka [3]

Održavanje energetskih transformatora, mernih transformatora i odvodnika prenapona se obavlja na

osnovu stanja ovih elemenata, dok se održavanje prekidača sprovodi po RCM-konceptu.

Stanje energetskih transformatora naznačenog napona 220 kV i više se prati sistemima za kontinualni nadzor, dok se proverava stanja ostalih transformatora obavlja gasno-hromatskom analizom i merenjem sadržaja vlage u ulju, merenjem kapacitivnosti kapacitivnih provodnih izolatora ili merenjem pritiska ulja u uljem impregnisanim provodnim izolatorima, merenjem broja operacija regulatora napona, merenjem parametara pogonskog mehanizma, proverom sistema hlađenja i praćenjem nivoa opterećenja.

Uređajima za kontinualni nadzor prate se koncentracije važnih gasova i meri se nivo parcijalnih pražnjenja.

Na svim VN transformatorima koji su u pogonu duže od 30 godina vrši se snimanje karakteristike frekventnog odziva, radi detektovanja pomerivosti namotaja.

Važno je naglasiti da su za sve parametre koji se mere kontinualno ili povremeno razvijeni veoma precizni matematički modeli.

RCM-koncept kombinuje stanje elementa i njegovu važnost u mreži, uz poštovanje sledeće procedure:

- utvrđivanje stanja prekidača,
- određivanje važnosti svakog prekidača (konkretno, misli se na posledice koje nastaju usled ispada posmatranog prekidača iz pogona),
- procena optimalnog nivoa preventivnog održavanja koje treba sprovesti uz uvažavanje stanja i važnosti prekidača.

Stanje prekidača se procenjuje na osnovu starosti, tipa, broja prekidanja struja kvara, broja sklopnih operacija, prethodnog eksploatacionog iskustva sa datom vrstom prekidača, rezultata sprovedenih merenja i iskustva osoblja zaduženog za održavanje. Za svaki od napred navedenih činilaca se određuje težinski faktor (faktor uticaja, obično u opsegu 0-100), kojim se predstavlja važnost svakog činilaca na ukupno stanje prekidača.

Zavisno od procenjenog stanja i važnosti prekidača definisani su kriterijumi na osnovu kojih se određuje obim potrebnih aktivnosti u sklopu preventivnog održavanja. Obično se razmatraju tri mogućnosti: 1) zamena, 2) sitnije opravke, 3) bez ikakvih intervencija.

Merenja koja se, najčešće, sprovode na malouljnim prekidačima su merenje temperature IC-kameras, merenje vremena uključivanje-isključivanje i gasno-hromatska analiza (analiza gasova rastvorenih u ulju).

3.3 Rusija [2, 6]

U EES-u u Rusiji, instalirano je oko 20 000 energetskih transformatora naznačenog napona 110 kV i više. Od toga, oko 40 % je starije od 25 godina. Pošto je zamena tih jedinica neopravdana i tehnički i ekonomski, posebna pažnja se posvećuje utvrđivanju njihovog stanja i mogućnostima produženja životnog veka. U tom smislu, sprovedena su obima istraživanja i ankete, po ugledu na Anketu CIGRE iz 1983, i utvrđeni su pokazatelji pouzdanosti za pojedinačne komponente energetskih transformatora. Na osnovu toga, definisane su metode koje se primenjuju radi utvrđivanja stanja svake komponente pojedinačno (papirna izolacija, jezgro, namotaji, ulje, sistem hlađenja, provodni izolatori, regulator napona).

Na osnovu složenih dijagnostičkih ispitivanja, ukupno 29 vrsta merenja, određuje se vrsta radova koje treba obaviti radi revitalizacije transformatora.

Primeru radi, navešćemo rezultate analiza za 250 energetskih transformatora (svi stariji od 25 godina): kod 30 % je konstatovano normalno stanje svih bitnih parametara, dakle bez potrebe za intervenisanjem; 2 % treba zameniti, na 15 % treba obaviti zamenu sitnijih delova, 23 % zahteva relativno jeftine intervencije (sušenje ulja i papirne izolacije), dok 30 % zahteva češću kontrolu. Sušenjem ulja i papirne izolacije je postignuto da je otpor papirne izolacije povećan 2,5-5,5 puta, faktor dielektričnih gubitaka je smanjen oko 5 puta, a vrednost stepena polimerizacije je povećana za oko 30 %.

3.4 Australija [11]

Kompanije u Australiji posebnu pažnju posvećuju razvoju električnih metoda za dijagnostikovanje stanja izolacije energetskih i mernih transformatora, i to merenju faktora dielektričnih gubitaka i merenju nivoa parcijalnih pražnjenja. Za preliminarnu procenu stanja, kod elemenata sa uljnom izolacijom, primenjuje se gasno-hromatska analiza.

3.5 Francuska [5]

Stanje energetskih transformatora $U_n \geq 220$ kV se prati kontinualno, a ostalih-povremeno. Sistemima za kontinualni nadzor vrši se snimanje brzih prelaznih procesa i, obično, prati se koncentracija vodonika, koji oni smatraju najvažnijim gasom sa stanovišta postojanja poremećaja, što baš i nije tačno, imajući u vidu najnovija saznanja. Ređe se primenjuju senzori koji prate koncentracije ostalih gasova koji mogu da se pojave u ulju.

Za redovnu proveru ispravnosti energetskih transformatora koristi se gasno-hromatska analiza. Zavisno od ovih rezultata, primenjuju se merenja parcijalnih pražnjenja, merenje frekventnog odziva, merenje temperature IC-kamerom, merenje stepena polimerizacije, kapacitivnosti, impedansi, gubitaka i dr.

3.6 Irska [16]

Radi procene stanja energetskih transformatora, irske kompanije primenjuju sledeće metode (češće u beznaponskom stanju nego kontinualno): provera kvaliteta ulja (dielektrična čvrstoća, sadržaj vlage, kiselost, boja, otpor i permitivnost), gasno-hromatska analiza, provera prisustva furanskih jedinjenja u ulju, merenje stepena polimerizacije, merenje sadržaja vlage u papirnoj izolaciji, merenju faktora dielektričnih gubitaka u namotajima i kapacitivnosti, snimanje polarizacionog spektra, merenje frekventnog odziva i merenje temperature IC-kamerom.

3.7 Finska [12]

Celokupni sistem održavanja, koji se zaniva na procenjenom stanju, je kompjuterizovan. Sistem je razvijan oko 20 godina, a urađen je po ugledu na sistem koji je svojevremeno začet u USA i bio je namenjen održavanju mostova, aerodroma i energetskih vodova.

Sistem održavanja je, formalno, podeljen na nekoliko delova:

- modelovanje ponašanja opreme usled starenja, što se odražava i na stanje;
- modelovanje aktivnosti koje se preduzimaju u sklopu održavanja (preventivnog i/ili korektivnog), radi procene efekata na stanje i pouzdanost opreme;
- praćenje ponašanja elemenata u pogonu i proračun eksploatacionih troškova;
- preduzimanje odgovarajućih mera radi poboljšanja stanja i produženja životnog veka opreme.

Od sistema održavanja se očekuju odgovori na sledeća pitanja:

- 1) Koje je relno stanje opreme i kakav je budući trend promene stanja?
- 2) Kakvo je stanje opreme nakon određenog eksploatacionog perioda uzimajući u obzir mere koje su sprovedene u sklopu održavanja i kada treba sprovesti revitalizaciju?
- 3) Koji je minimalni nivo održavanja a radi obezbeđenja zahtevanog/željenog stanja opreme?

Procene i odluke koje će biti realizovane u budućnosti, a koje su donete na osnovu stanja i modelovanja svih bitnih faktora, su ključna karakteristika

sistema upravljanja održavanjem. To nije moguće uraditi samo na osnovu analize podataka iz prošlosti i prostog preslikavanja na budućnost, već se moraju modelovati svi procesi koji doprinose slabljenju karakteristika elemenata. Da bi se došlo do preciznog i pouzdanog modela potrebno je nekoliko godina intenzivnih istraživanja.

Utvrđivanje stanja se bazira na proceni preostalog životnog veka elementa. Za energetske transformatore, prekidače i rastavljače razvijeni su modeli, koji obuhvataju fizičke karakteristike opreme u matematičkom obliku i, takođe u matematičkom obliku, procese koji doprinose starenju. Modeli su, tokom godina eksploatacije, provereni odgovarajućim merenjima i izvršene su neophodne ispravke.

Model za procenu stanja energetskih transformatora obuhvata sledeće činioce: vlaga u ulju i papirnoj izolaciji, termičko starenje izolacije, dinamičko naprezanje namotaja, ispravnost regulatora napona i ispravnost provodnih izolatora.

Osnovna metoda za procenu stanja energetskih transformatora je gasno-hromatska analiza. Po potrebi, vrše se merenja intenziteta parcijalnih praznjenja i vrednosti faktora dielektričnih gubitaka.

Model za procenu stanja prekidača, za dati tip prekidača, obuhvata stanje prekidnih elemenata i pogonskog mehanizma. Stanje prekidnog elementa zavisi od broja sklopnih operacija, prekidne moći i zbirne vrednosti prekinutih struja kvara.

Merenja koja se sprovode na prekidačima su: merenje vremena uključenja/isključenja i merenje kontaktnog otpora.

Model za procenu stanja rastavljača, bez obzira na tip, je najjednostavniji i obuhvata samo habanje VN-delova.

3.8 USA [13,14, 15, 17]

Održavanje elemenata VN i VVN postrojenja se obavlja na osnovu stanja.

Utvrđivanje stanja energetskih transformatora se obavlja rutinskom primenom sledećih metoda:

- za namotaje: merenje faktora dielektričnih gubitaka, merenje kapacitivnosti, struje magnećenja i merenje prenosnog odnosa;
- za provodne izolatore: merenje faktora dielektričnih gubitaka, merenje kapacitivnosti, provera nivoa ulja i merenje temperature IC-kamerom;
- za ulje: gasno-hromatska analiza, merenje vlage, merenje dielektrične čvrstoće, merenje faktora dielektričnih gubitaka, merenje međupovršinskog napona, merenje kiselosti (neutralizacionog broja), provera boje;

- za regulator napona pod naponom: merenje kontaktnog otpora, provera prenosnog odnosa i merenje temperature IC-kamerom;
- za regulator napona u beznaponskom stanju: provera nacentriranosti, merenje kontaktne sile i merenje temperature IC-kamerom;
- rutinska merenja na jezgru se ne obavljaju.

4. ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled koncepata održavanja VN-opreme koji se primenjuju u velikim elektroprivrednim kompanijama. Najzastupljeniji koncept preventivnog održavanja je na osnovu stanja. Ovaj koncept omogućava detekciju poremećaja u najranijoj fazi i njegovo otklanjanje uz minimalne posledice u tehničkom i ekonomskom smislu. Takođe, maksimalno se eliminiše ljudski faktor kao uzrok kvarova i produžava eksploatacioni vek opreme, uz snižavanje potrebnih zaliha rezervne opreme. Mada su početna ulaganja u opremu i obuku zaposlenih u vezi ovog koncepta visoka, dugoročne uštede su veoma velike. Na godišnjem nivou, direktne uštede iznose oko 30 % u odnosu na troškove koji se imaju za slučaj sprovođenja preventivnog održavanja u fiksnim vremenskim intervalima. Ilustracije radi, dok je preventivno održavanje elemenata postrojenja sprovedeno u fiksnim vremenskim intervalima, elektroprivredne kompanije u USA su godišnje trošile oko $600 \cdot 10^9$ \$. Kada se prešlo na održavanje na osnovu stanja godišnji trošak se smanjio na $400 \cdot 10^9$ \$.

Nije moguće napraviti ozbiljnu uporednu analizu inostrane prakse i prakse u našim elektroprivrednim preduzećima. Naime, preventivno održavanje visokonaponske opreme se kod nas, uglavnom, sprovodi u fiksnim vremenskim intervalima. Ne može se reći ni da se održavanje na osnovu stanja sprovodi na sistematičan način. Od svih raspoloživih metoda za utvrđivanje stanja na energetskim i mernim transformatorima, najčešće, primenjuju se merenje temperature IC-kamerom, analiza kvaliteta ulja i DGA-analiza. Dužina intervala između dve uzastopne DGA-analize je definisana prema naznačenom naponu, ali nije do kraja jasno da li je to urađeno i prema starosti elementa. Na transformatorima koji su u pogonu duži niz godina sprovodi se furanska analiza, radi utvrđivanja stanja papirne izolacije. Na osnovu rezultata ovih analiza zaključuje se da li sprovoditi revitalizaciju ili nabaviti nov transformator.

5. LITERATURA

- [1] T. Kawamura et al., IMPROVEMENT IN MAINTENANCE AND INSPECTION AND PURSUIT

- OF ECONOMICAL EFFECTIVENESS OF TRANSFORMERS IN JAPAN, CIGRE Session 2002, p.12-107
- [2] R. Malewski, M. Kazmierski, DIAGNOSTIC TECHNIQUES FOR POWER TRANSFORMERS, CIGRE Session 2000, P1-07
- [3] O. Berg et al., EXPERIENCES FROM ON-SITE TRANSFORMER OIL RECLAIMING, CIGRE Session 2002, p.12-103
- [4] Motoo Tsuchie et al., DEVELOPMENT OF DISSOLVED GAS ANALYTICAL SYSTEM BY HEADSPACE EXTRACTION METHOD, TMT&D Review, Vol.3, No.1, 2005.
- [5] J. P. Patelli et al., FRENCH EXPERIENCE WITH DECISION MAKING FOR DAMAGED TRANSFORMERS, CIGRE Session 2002, p.12-111
- [6] R. Sobocki et al., TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMERS, THE POLISH PRACTICE, CIGRE Session 2002, p.12-104
- [7] ABNORMAL OPERATIONS GENERIC TECHNICAL GUIDELINES FOR POWER STATIONS, Facilities Instructions, Standards and Techniques, Vol. 1-12, March 2003.
- [8] MAINTENANCE SCHEDULING FOR ELECTRICAL EQUIPMENT, Facilities Instructions, Standards and Techniques, Vol. 4-1B, November 2005.
- [9] CONDUCT OF POWER MAINTENANCE, Facilities Instructions, Standards and Techniques, Vol. 6-2, March 2006.
- [10] MAINTENANCE TESTING SPECIFICATIONS FOR ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION EQUIPMENT AND SYSTEMS, International Electrical Testing Association Inc., 2005.
- [11] Tapan Kumar Saha, EXPERIENCE WITH RETURN VOLTAGE MEASUREMENTS FOR ASSESSING INSULATION CONDITIONS IN SERVICE-AGED TRANSFORMERS, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003
- [12] Chandima Ekanayake, APPLICATION OF DIELECTRIC SPECTROSCOPY FOR ESTIMATING MOISTURE CONTENT IN POWER TRANSFORMERS, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2003
- [13] AN ANALYSIS OF TRANSFORMER FAILURES, Part 1 & 2-1988 through 1997, By William H. Bartley.
- [14] Marcus Bengtsson et al, TECHNICAL DESIGN OF CONDITION BASED MAINTENANCE SYSTEM-A CASE STUDY USING SOUND ANALYSIS AND CASE-BASED REASONING, Maintenance and Reliability Conference - Proceedings of the 8 th Congress, May 2 nd - 5 th , 2004, University of Tennessee - Maintenance and Reliability Center, Knoxville, USA.
- [15] Marcus Bengtsson, CONDITION BASED MAINTENANCE SYSTEM TECHNOLOGY -WHERE IS DEVELOPMENT HEADING?, Euromaintenance 2004 - Proceedings of the 17 th European Maintenance Congress, May, 2004, AMS, Barcelona, Spain
- [16] INSULATION CONDITION MONITORING AND RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE OF ELECTRICAL PLANT, Shortcourse & workshop 24-26 February 1997, Monash University
- [17] Tony McGrail, TRANSFORMER FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS, Neta World, spring 2004.
- [18] J. Nahman, V. Mijailović, RAZVODNA POSTROJENJA, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2005.
- [19] V. Mijailović, ODRŽAVANJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA-POGONSKA ISKUSTVA, Elektroprivreda br. 3, 2003.
- [20] Vladica Mijailović, PREDLOG MODELA ZA PROCENU EFEKATA RAZLIČITIH VIDOVA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA, Elektroprivreda br.4. 2005.
- [21] <http://www.wear-management.ch>

Rad je primljen u uredništvo 22. 04. 2009. godine



Vladica Mijailović je rođen 1966. godine u Kraljevu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Na Energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je diplomirao 1991. godine. Magistrirao je i doktorirao na istom fakultetu 1995. i 1999. godine, respektivno. Nakon diplomiranja, zaposlio se na Tehničkom fakultetu u Čačku, gde je i sada zaposlen u zvanju vanredni profesor, na Katedri za Industrijsku Energetiku.

Kao autor ili koautor do sada je objavio 3 rada u vodećim međunarodnim časopisima, 5 radova u vodećem nacionalnom časopisu i 12 radova na domaćim konferencijama i savetovanjima. Koautor je jednog univerzitetskog udžbenika, jedne zbirke zadataka i tri monografije nacionalnog značaja. Rukovodio je na tri projekta finansirana od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine.

*Josif V. Spirić,
Aleksandar S. Jović i Miroslav B. Dočić*

Uticaj promene namene proizvodnih prostora i tehnoloških procesa na kvalitet električne energije

Stručni rad
UDK: 621.3.01.072; 621.316

Rezime:

Sa gledišta kvaliteta električne energije, delovi distributivnih sistema se mogu razlikovati kao „čisti” ili „zaprjani”. Vreme tranzicije često uslovljava promenu namena proizvodnih prostora menjajući na taj način tehnologiju ili njene procese, čime se automatski menjaju i zahtevi na mestu priključenja koji se postavljaju isporučiocu električne energije. Odobrena snaga koju novi kupac nasleđuje na osnovu odavno izdate elektroenergetske saglasnosti ne bi trebalo da znači automatski i odobravanje uvođenja nove tehnologije, jer je ta saglasnost podrazumevala neki drugi proizvodni proces, pa time i odgovarajući kvalitet napona.

U radu su konsekventno ilustrovane posledice priključenja fabrike koja je promenila vrstu proizvodnje u granicama ranije odobrene snage. Analizira se nastajanje kolebanja napona kao jedan od parametara kvaliteta električne energije, jer je promenom tehnologije na određenoj lokaciji došlo do njegovog odstupanja od dozvoljenih vrednosti. Daje se i kratak pregled smetnji koje izaziva kolebanje napona na mreži, kao i principi i uobičajene realizacije izbegavanja kolebanja napona u distributivnoj mreži.

Ključne reči: kvalitet električne energije, kolebanje napona, jačina treperenja, promena tehnološkog procesa

Abstract:

***THE INFLUENCE OF MANUFACTURING PREMISES
AND TECHNOLOGICAL PROCESSES ORIENTATION CHANGE ON POWER QUALITY***

From power quality point of view, parts of distributive systems can be differentiated into „clean” or „polluted”. Transition time often conditions the change in use of manufacturing premises altering thus the technology or its processes, which also automatically alters the conditions at the connection point that are placed on the power supplier. Authorized power inherited by the new consumer on the basis of previously issued consent should not automatically mean the approval of introducing new technology, because the consent referred to a different manufacturing process, and thereby adequate voltage quality.

This paper consequently illustrates the effects of connecting a plant that has changed its production type within the limits of previously approved power. The appearance of voltage fluctuation as one of power quality parameters is analyzed, because changing technology at a certain location has caused its variation from permitted values. A short review of interference caused by network voltage fluctuation is also given, as well as principles and common realizations of avoiding voltage fluctuation in distributive network.

Key words: power quality, voltage fluctuation, fluctuation intensity, technological process change

*Dr Josif V. Spirić, dipl. ing. el., Aleksandar S. Jović, dipl. ing. el. – PD „Jugoistok” d.o.o. Niš, 18 000 Niš, Bulevar dr Zorana Đinđića 46a
Miroslav B. Dočić, dipl. ing. el. – PD „Jugoistok” d.o.o. Niš – Ogranak „Elektrodistribucija Leskovac”, 16 000 Leskovac, Stojana Ljubića 16*

1. UVOD

Povod za ovaj rad je vezan za posledice do kojih se dolazi zbog promene tehnološkog procesa nekog industrijskog potrošača. U konkretnom slučaju proizvodna hala jedne fabrike korišćena je za obradu metala sa mašinama – alatljikama (strugovi, bušilice, glodalice, nekoliko aparata za zavarivanje male snage i dr.). Navedene mašine u radu mogu se okarakterisati kao „miran pogon” kod koga su promene električnog opterećenja relativno spore.

Nakon prodaje ove fabrike, novi vlasnik je u granicama prethodno odobrene maksimalne snage otpočeo sa izradom novog proizvoda (pravljenje mreža za armiranje betona) koji se zasniva na tačkastom zavarivanju.

Karakteristika pogona tačkastog zavarivanja i drugih nelinearnih „elektrotermičkih” uređaja, kao što su električni aparati za zavarivanje, elektrolučne peći i dr. je da imaju brzo promenljivo opterećenje u vremenu koje kvira kvalitet napona odnosno kvalitet električne energije.

To je i bio razlog da se izvrše merenja kod potrošača sa izmenjenim tehnološkim procesom, a u cilju provere svih parametara kvaliteta električne energije.

Proverom merodavnih parametara kao što su varijacija napona, kolebanje napona, izobličenje napona, frekvencija napona i nesimetričnost napona, koristeći upoređenje merenih rezultata sa evropskim standardom EN 50160:2000, dolazi se do zaključka da nisu ispunjeni potrebni uslovi za kolebanje napona. Zato će se u ovom radu detaljno analizirati samo problem kolebanja napona.

Zbog obima rada, daće se samo rezultati merenja jačine treperenja i rezultati proračuna snage kratkog spoja na mestu priključenja analiziranog pogona. Imajući u vidu da su slučajevi promene namene proizvodnih prostora veoma česti zadnjih godina, autori su smatrali da kraća elaboracija problema kolebanja napona može biti od koristi inženjerima distributivnih preduzeća koji su odgovorni za razvoj i eksploataciju distributivnih sistema.

Još jednom se ističe da se u radu neće komentarisati ostali parametri kvaliteta električne energije jer se, za konkretan slučaj, merenjima pokazalo da su oni u dozvoljenim granicama.

2. KOLEBANJE NAPONA

Kolebanje napona se definiše kao niz promena napona ili neka periodična promena anvelope krive napona. Detaljnije, ocenjuje se preko:

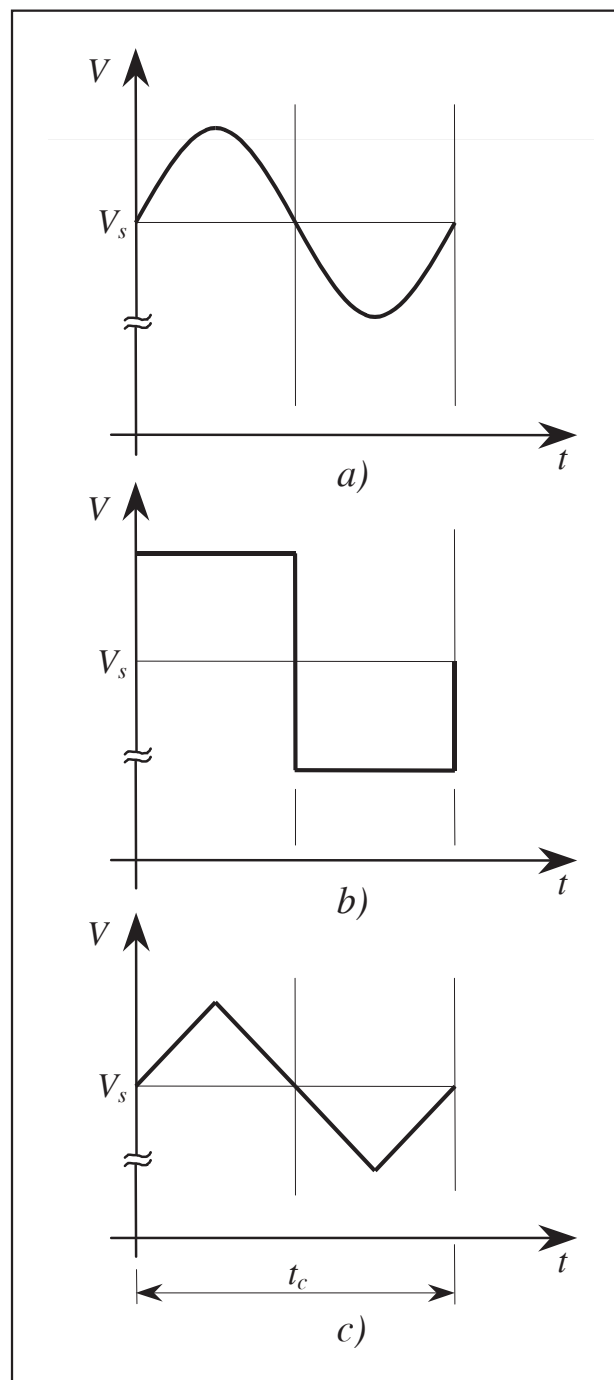
a) raspona promene napona:

$$\delta V = U_{\max} - U_{\min} \quad (1)$$

ili u procentima:

$$\delta V (\%) = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \cdot 100 \quad (2)$$

gde je U_{\max} , U_{\min} i U_n maksimalna, minimalna i naznačena vrednost napona, respektivno.



Slika 1. Harmonijske periodične smetnje
a) prostoperiodična, b) pravougaona i c) trouglasta

b) frekvencija promene napona:

$$f = \frac{m}{T} \quad (3)$$

gde je m broj promena napona, a T vreme za koje se ostvari m promena napona (uzimaju se samo one vrednosti f čija je brzina veća od 1 % u sekundi);

c) intervala između dve uzastopne promene napona (dve promene napona se smatraju jednom ako je interval između njih manji od 40 ms).

Od posebnog su značaja brza uzastopna kolebanja napona srednje periodičnosti do 33 Hz. Zovu se „fluktuacija napona”, a po manifestacijama uočenim na rasveti – flikeri.

Fliker utiče na vid čoveka i ogleda se u miganju (treperenju) svetla, a to dovodi do neprijatnih psiholoških efekata, kvarenja vida, glavobolje, itd.

Normiranje kolebanja napona se formira na osnovu uticaja treperenja svetlosnog fluksa na vid. Uticaj kolebanja napona na zamor vida zavisi od prenosne funkcije kola „izvor svetla – čovečje oko – nervni sistem”. Tačno analitičko modelovanje tog kola je teško iako su u tom pravcu vršena ispitivanja [1].

Različiti izvori svetla reaguju na promene napona drugačije, a razlikuju se i kola „čovečje oko – nervni sistem” kod raznih ljudi. Opažanje kolebanja zavisi od njegove forme i frekvencije.

Na slici 1. predstavljena je tipizacija najčešćih harmonijskih smetnji kojima se opisuje kolebanje napona. Proces promene stvarnih vrednosti napona $V(t)$ može se predstaviti sumom srednje i brze komponente koje se mogu nazvati trendom $V_s(t)$ i poremećajem $V_p(t)$ (fliker napona), respektivno. U svim slučajevima, trend je predstavljen horizontalnom linijom (V_s) koja istovremeno predstavlja i srednju vrednost poremećaja.

Istraživanje smetnji se sprovodi za harmonijske ili impulsne smetnje. Postoje i drugi oblici smetnji, kao npr. trougaoni. Za harmonijske smetnje, raspon kolebanja δV jednak je udvojenoj amplitudi, a za pravougaone razlici najveće i najmanje vrednosti.

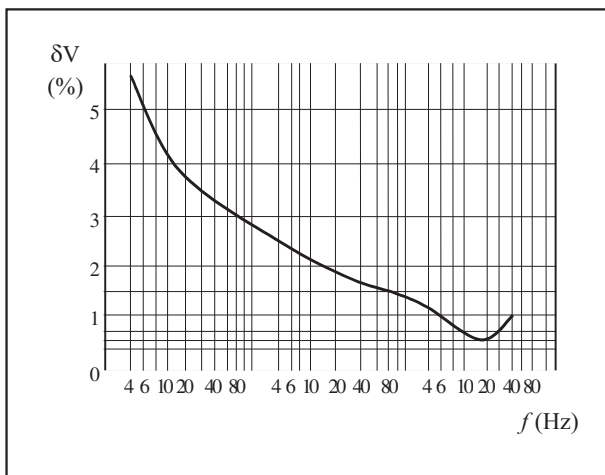
Najjače deluje kolebanje u formi pravougaonika i ono izaziva veću smetnju od flikera nego pri prostoperiodičnoj i trouglastoj formi [1].

Rasponi kolebanja napona povećavaju se sa manjim frekvencijama [2].

Kolebanje napona se obično normira u vidu zavisnosti njihovih dozvoljenih raspona od frekvencije, kao što je prikazano na slici 2. Ova kriva je dobijena eksperimentalno putem posmatranja reakcije grupe ljudi na periodično treperenje sijalice sa užarenim vlaknom [3].

Polazeći od krive na slici 2. može se doći do dozvoljene energije.

Veličina proporcionalna kvadratu vrednosti $\delta V(\%)$ izražava srednju vrednost snage kolebanja



Slika 2. Eksperimentalna kriva zavisnosti dozvoljenih kolebanja napona u funkciji frekvencije

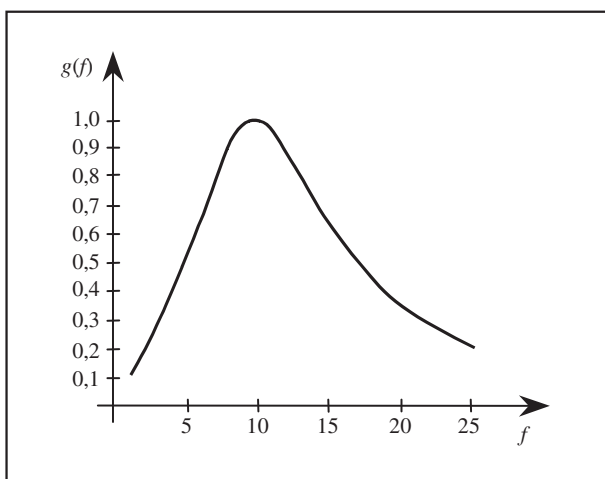
napona koja ne utiče na čovekovo oko, ako je trajanje takvog kolebanja kraće od 10÷15 minuta.

Stepen uticaja kolebanja napona na vid ljudi zavisi u osnovi od brzine promene napona, apsolutne vrednosti raspona promene i vremena trajanja kolebanja.

Prosečno oko je najosetljivije na treperenja čija je frekvencija oko 10 Hz. Kolebanja od oko 0,3 % u odnosu na nazivni napon već izazivaju smetnje.

Ako treperenje sa frekvencijom od 10 Hz i amplitudom a_{10} izazove očiglednu smetnju, ekvivalentnu smetnju će proizvesti i treperenje sa frekvencijom f i amplitudom $a(f)$:

$$a(f) = \frac{a_{10}}{g(f)} \quad (4)$$



Slika 3. Funkcija osetljivosti ljudskog oka na treperenje sa frekvencijom f u odnosu na osetljivost na 10 Hz

gde je $g(f)$ funkcija frekvencije karakteristična za ljudsko oko.

Na slici 3. je prikazana funkcija osetljivosti ljudskog oka na treperenje sa frekvencijom f u odnosu na osetljivost na 10 Hz.

Prema standardu EN 50160:2000 koju je 1993. godine izradila međunarodna organizacija CENELEC BTTF 88-6, intenzitet smetnje zbog svetlosnog treperenja ocenjuje se prema sledećim veličinama:

- kratkotrajnoj jačini treperenja (P_{st}) koja se meri tokom vremena od 10 minuta (st – „short time”);
- dugotrajnoj jačini treperenja (P_{lt}) koja se na bazi 12 uzastopnih vrednosti P_{st} za vreme od 2 h računa prema jednačini (lt – „long time”):

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \frac{P_{st,i}^3}{12}} \quad (5)$$

Pri normalnim pogonskim uslovima, dugotrajna jačina treperenja zbog kolebanja napona ne sme tokom bilo koje nedelje prelaziti vrednost jednaku 1.

Gornji kriterijum definisan je na sledeći način. Ako se u nekoj prostoriji nalazi 100 ljudi u istim uslovima, pa se intenzitet svetla promeni u toj meri da to primeti polovina, odnosno 50 ljudi, smatra se da treperenje (fliker) ima intenzitet 1.

Smetnje zbog kolebanja napona javljaju se najviše i najintenzivnije kod flikera rasvete, ali kolebanje utiče i na rad ostalih trošila električne energije ili na funkcionisanje sistema čiji je rad uslovljen kvalitetnim naponom.

Kriterijum za dozvoljeni fliker rasvete je definisan već pomenutim standardom EN 50160:2000, mada i on nije obavezujući.

Kriterijum za dozvoljeno kolebanje napona, čime bi se izbegao njegov negativan uticaj na razne uređaje električne energije, takode nije jedinstveno postavljen. Uglavnom se imaju posledice, ali nisu dovoljno kvantifikovane. Pored toga, štete koje se generišu nekvalitetnim radom uređaja nije lako definisati.

Nije sporno da su u mrežama višeg napona (110 kV i više) utvrđeni kriterijumi stroži nego u mrežama srednjeg i niskog napona. Ovo je logično, obzirom da se smetnja na mreži višeg napona odražava na veliki broj potrošača.

Već je u uvodu rečeno da je izvor pogoršanja kvaliteta napona rad pogona sa brzopromenljivim opterećenjem. Tipični uzročnici brzih kolebanja su elektrolučne peći, linije za zavarivanje i tačkasto zavarivanje, snažni pretvarači i dr.

Percentualni raspon napona δV (%) je, imajući u vidu stvarni odnos ekvivalentnog induktivnog i aktivnog otpora napojne mreže do nivoa tačke priključenja, određen promenom reaktivne snage, pa se za orijentacione proračune može pisati:

$$\delta V(\%) = \frac{\Delta Q}{S_k} \cdot 100 \quad (6)$$

gde je ΔQ raspon reaktivne snage, a S_k snaga kratkog spoja na sabirnicama napajanja.

Za određivanje dozvoljenih kolebanja napona u priključnoj tački mreže polazni podaci su grafici opterećenja sa brzopromenljivim opterećenjima. Ako je kolebanje napona različito po vrednosti, tada je neophodno odrediti ekvivalentno kolebanje napona:

$$\delta V_{ek}(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2} \cdot 100 \quad (7)$$

gde je n broj kolebanja.

Na ovaj način, ekvivalentni raspon kolebanja se određuje srednjekvadratnom vrednošću raspona promene napona za vreme analize T .

Kolebanje napona je u granicama dozvoljenog ako je ispunjeno:

$$\delta V_{ek}(\%) \leq \delta V_d(\%) \Big|_{f=f_{sr}} \quad (8)$$

gde je $\delta V_d(\%)$ dozvoljena vrednost raspona promene kolebanja pri $f=f_{sr}$. f_{sr} predstavlja srednju frekvenciju promene napona.

Dokazuje se [4] da je dozvoljeno ekvivalentno kolebanje:

- za jednu peć, ili jednog potrošača (pogon)

$$\delta V_{ek_p}(\%) = \frac{S_p}{S_k} < 0,01 \quad (9)$$

- za grupu jednakih ekvivalentnih peći

$$\delta V_{ek_{NP}}(\%) = \sqrt[4]{N} \cdot \frac{S_{p,n}}{S_k} < 0,01 \quad (10)$$

- za grupu n peći različite snage

$$\delta V_{ek_{gr}}(\%) = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^n \frac{S_{p,T_j}}{S_{p,T_{max}}} \cdot \frac{S_{p,T_{max}}}{S_k}} < 0,01 \quad (11)$$

gde su:

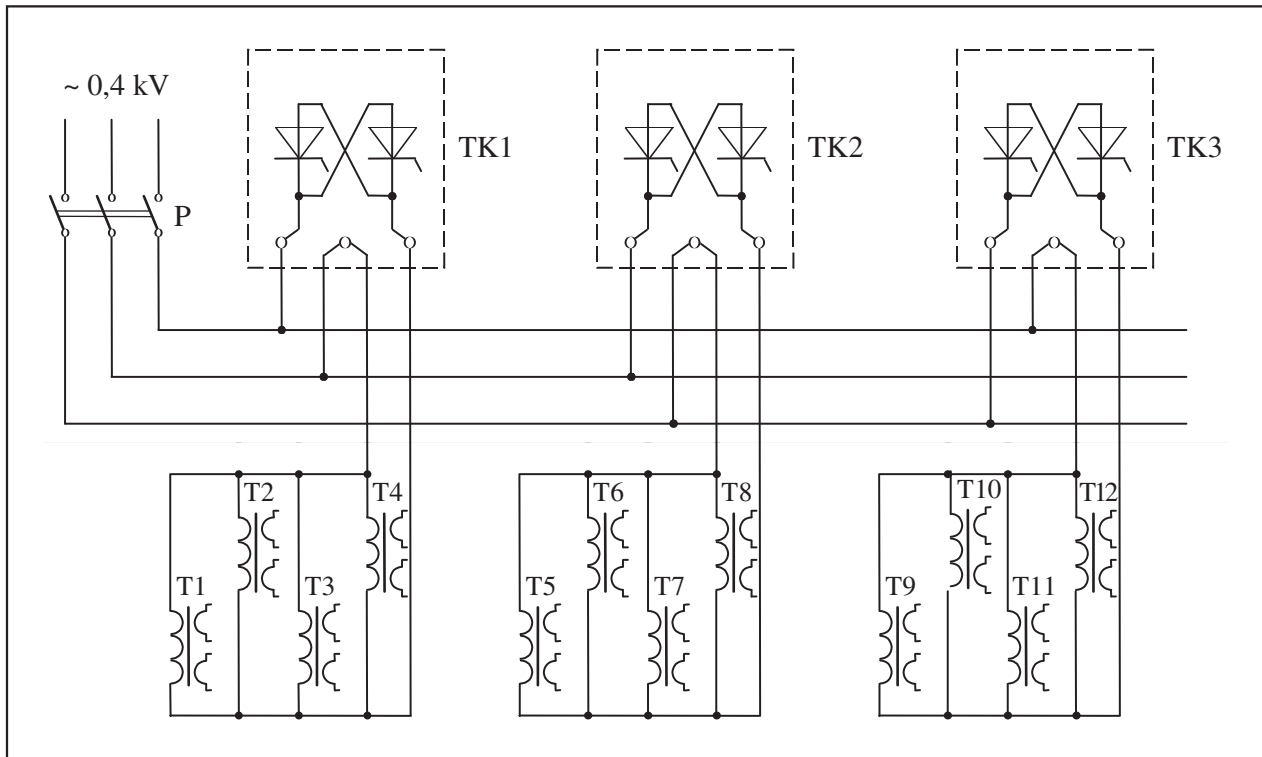
S_p – snaga opterećenja pogona ili peći u MVA [5],

N – broj peći kada imaju istu snagu,

j – broj peći.

Za praktične proračune usvaja se da ekvivalentni raspon promene napona pri kolebanju ne sme biti veći od 1 % [4, 6].

Velika kolebanja se stvaraju pri radu uređaja i linija kontaktnog zavarivanja.



Slika 4. Principijelna šema glavnih kola jedne linije sa tačkastim zavarivanjem

3. LINIJE ZA TAČKASTO ZAVARIVANJE

Uređaji za tačkasto zavarivanje razlikuju se prema:

- nameni (opšta i specijalizovana);
- konstrukciji (stacionarni, prenosni, dvoelektrodni i višeelektrodni);
- načinu pretvaranja električne energije (sa jednofaznim transformatorom naizmenične struje, niskofrekventne sa trofaznim napajanjem naizmeničnom strujom, sa jednosmernom strujom, impulsne sa korišćenjem elektrostatičke i elektromagnetne energije).

Sa gledišta izazivanja kolebanja napona, od interesa je razmatranje uređaja za tačkasto zavarivanje koji se napajaju jednofaznim naponom 400 V. Ti uređaji rade u liniji pa su specijalizovani, a stacionarne su konstrukcije i višeelektrodni.

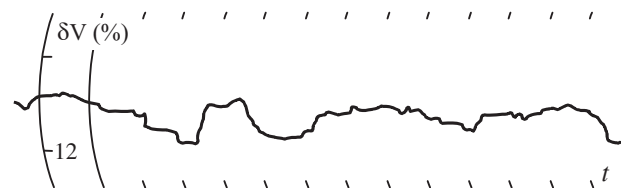
Linije sa varenjem u više tačaka dele se u osnovi na one sa istovremenim prolaženjem struje preko svih tačaka varenja i na one kod kojih struja prelazi preko zadanih tačaka varenja po određenom redosledu sa vremenskim pomeranjem.

Po pravilu, ima više transformatora sa kojih se napajaju grupe elektroda (prese za tačkasto zavarivanje).

Šema napajanja jedne linije za tačkasto zavarivanje, odnosno jedna od mogućih realizacija data je na slici 4. Jedna linija se napaja sa 2 do 50 transfor-

matora snage 30 do 100 kVA. Sekundarni napon svih transformatora je 400 V.

Na slici 5. je dat dijagram promene $dV(\%)$ u vremenu, za pogon sa velikim brojem uređaja sa tačkastim zavarivanjem. Najveća kolebanja napona primećuju se kod linija sa velikim brojem tačaka zavarivanja, kao i u automatskim linijama ostalih vrsta zavarivanja (do 19 %) [3]. Brzina promene napona dV/dt za pojedine mašine tog tipa kreću se u granicama 30÷750 % u sekundi [3]. Stvaraju se periodična, ciklična i slučajna kolebanja napona u zavisnosti od grafika opterećenja.



Slika 5. Dijagram $\Delta V(\%)=f(t)$ za pogon tačkastim zavarivanjem

Frekvencija kolebanja napona je tada:

$$f_k = \frac{2k}{t_c} \quad (12)$$

gde su:

k – broj impulsa struje za jedan ciklus zavarivanja
 t_c – vreme trajanja ciklusa zavarivanja.

Kolebanje napona koje stvara grupa mašina za zavarivanje je slučajnog karaktera. Ispitivanja pokazuju [7] da se kolebanje napona raspodeljuje po eksponencijalnoj ili raspodeli Releja (kolebanje napona grupnih grafika dostiže 20-30 %).

Srednja frekvencija f_{sr} ekvivalentnih kolebanja za grupu mašina za zavarivanje dati su u tabeli 1.

Tabela 1.

Broj kolebanja i srednja vrednost frekvencije kolebanja za pojedine ili grupe mašina

Uređaji i aparati	Broj kolebanja na čas za pojedine mašine	Broj kolebanja na čas sa nivoom većim od 0,3 % od nivoa kolebanja kod grupe mašina za varenje	f_{sr} (Hz)
Lučni automati za varenje i ispravljači za varenje	20 – 150	0 – 20	10
Jednotačkasto zavarivanje	300 – 2 000	500 – 2 000	1 250
Višetačkasto zavarivanje	100 – 1 000	400 – 2 000	1 200

4. SMANJIVANJE KOLEBANJA NAPONA

Prema relaciji (6) jasno je da se raspon promene napona može smanjiti na dva načina i to:

- povećanjem snage kratkog spoja S_k , srazmerne naponu U_n , na mestu priključka pogona koji izaziva kolebanje napona;

- smanjenjem promene reaktivne snage ΔQ koju izaziva pogon pri svom radu.

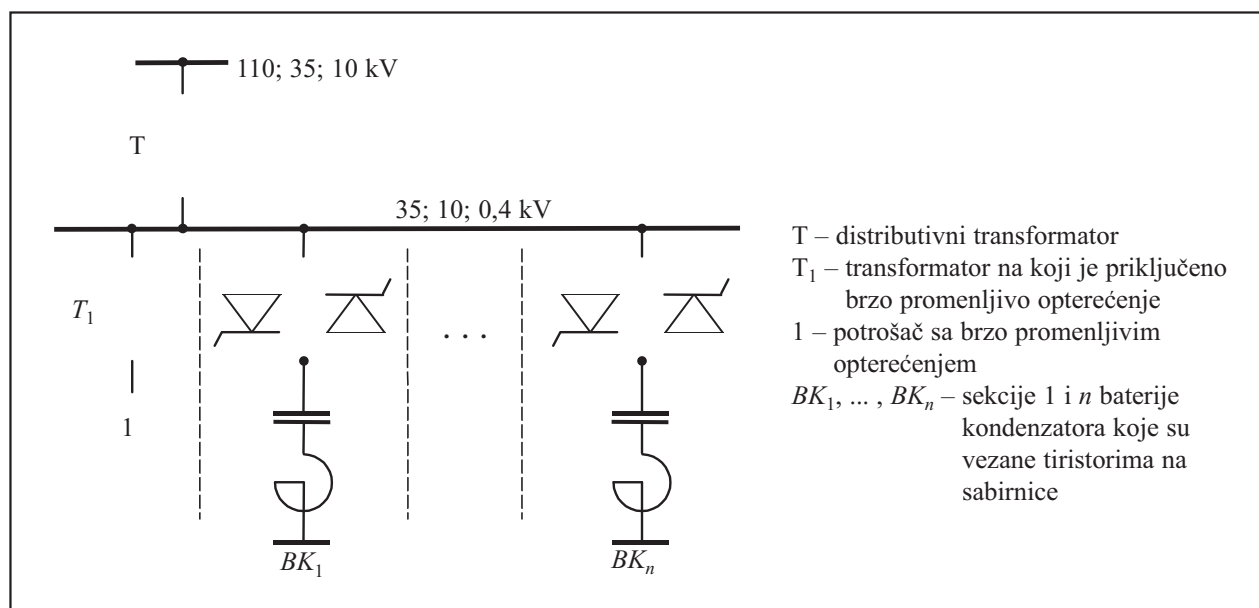
4.1. Povećanje snage kratkog spoja

Povećanje snage kratkog spoja realizuje se na jedan od sledećih načina:

- priključenje pogona sa brzopromenljivim opterećenjem na čvor distributivnog sistema sa što višim nazivnim naponom;
- napajanje pogona sa odvojenim vodovima u odnosu na ostalu „distributivnu” potrošnju;
- povećanje nazivne snage transformatora sa koga se napaja pogon;
- priključenje pogona na poseban transformator čime se on izdvaja od ostalog „distributivnog” opterećenja;
- korišćenje mrežnog transformatora sa radnim tercijerom, pri čemu je transformator konstruisan tako da je induktivna veza između sakundara i tercijera što slabija.

Gore izloženi načini imaju jednu zajedničku osobinu da štite (do određene mere) ostalu potrošnju od negativnih uticaja brzopromenljivih opterećenja na kolebanje napona. U ostalim industrijskim kompleksima, koji po pravilu imaju posebne transformatorske stanice za svoje napajanje, postoji takođe potreba da se potrošači osetljivi na kvalitet napona zaštite od dela pogona koji izaziva pogoršanje kvaliteta napona.

Ovaj problem se rešava delimičnim korišćenjem gore pobrojanih načina odvajanja celog pogona od distributivnog opterećenja, kao i korišćenjem podužne kompenzacije koja donekle poboljšava



Slika 6. Šema uređaja direktne kompenzacije

uslove rada pogona koji izaziva kolebanje napona, ali ne utiče na poboljšanje kvaliteta napona ispred ovog kondenzatorskog postrojenja.

Adekvatan učinak ima i prigušnica sa dva kraja, pri čemu se na jedan priključuje „mirno” opterećenje, a na drugi kraj brzopromenljivo opterećenje.

4.2. Smanjenje promene reaktivne snage

Za smanjenje promene reaktivne snage neophodno je primeniti kompenzacione uređaje sa parametrima koji pri brzopromenljivim opterećenjima treba da zadovolje sledeće zahteve:

- da raspoložu mogućnošću brzog dejstva na odgovarajuće promene reaktivne snage osnovnog grafika opterećenja;
- da imaju dovoljno raspoloživu reaktivnu snagu za kompenzaciju promenljive komponente (kompenzacija kolebanja napona) i stalnu komponentu (za poboljšanje koeficijenta snage) potrebne reaktivne snage. Potrebno je (posebno kod lučnih peći) i fazono upravljanje kompenzacionim uređajima.

Gornje zahteve mogu da ispune brzi statički kompenzatori. Konstruisano je dosta tipova statičkih kompenzatorskih uređaja čiji je rad zasnovan na dejstvu upravljivih reaktora i kondenzatora sa tiristor-skim prekidačima. Njihova osnovna podela je na uređaje direktne i indirektne kompenzacije.

a) *Statički uređaji direktne kompenzacije* koriste stepenasto regulisanje reaktivne snage uključenjem i isključenjem baterija kondenzatora pri promeni reaktivne snage potrošnje pogona. Šema ovog uređaja data je na slici 6.

Jedna od prednosti uređaja direktne kompenzacije je njihovo svojstvo da ne generišu u mrežu više harmonike.

Snaga svake sekcije kompenzacionog uređaja nalazi se prema:

$$\Delta Q_S \leq \frac{\delta V_d (\%) \cdot S_k}{100} \quad (13)$$

gde je $\delta V_d (\%)$ dozvoljena vrednost raspona napona.

Ukupna instalisana snaga kompenzacionog uređaja određuje se prema:

$$Q_{BK\Sigma} = \Delta Q_{\max} \cdot K_{pr} \quad (14)$$

gde su:

ΔQ_{\max} – max ($Q_{\max} - Q_{\min}$) maksimalna vrednost raspona kolebanja reaktivne snage na grafiku opterećenja,

$K_{pr} \leq 1$ – koeficijent kojim se množi promenljiva komponenta reaktivne snage opterećenja Q_{pr} .

b) *Statički kompenzacioni uređaji indirektne kompenzacije* sastoje se iz ravnomerno regulisanog

reaktora i neregulisane baterije kondenzatora ili filtera viših harmonika.

Princip ovog tipa kompenzacije zasniva se na formiranju u vremenu istog reaktivnog induktivnog opterećenja tako što regulišući reaktor dopunjuje reaktivnu snagu potrošnje do njene pune vrednosti. Tako formiranu vrednost reaktivne snage opterećenja i reaktora kompenzuje baterija kondenzatora.

Realizacija ovog načina kompenzacije data je na slici 7.

Instalisana snaga reaktivnog dela kompenzacionog uređaja određuje se na osnovu grafika opterećenja prema:

$$Q_r = \Delta Q_p \cdot K_{sr} \quad (15)$$

gde su:

ΔQ_p – ekvivalentni raspon kolebanja reaktivne snage;

K_p – koeficijent koji predstavlja udeo u kompenzaciji stalne komponente reaktivne snage.

Instalisana snaga baterije kondenzatora treba da se odredi prema:

$$Q_{BK} \geq K_{sr} \cdot (Q_{sr} + \bar{Q}_r) \quad (16)$$

gde su:

Q_{sr} – stalna vrednost reaktivne snage opterećenja,

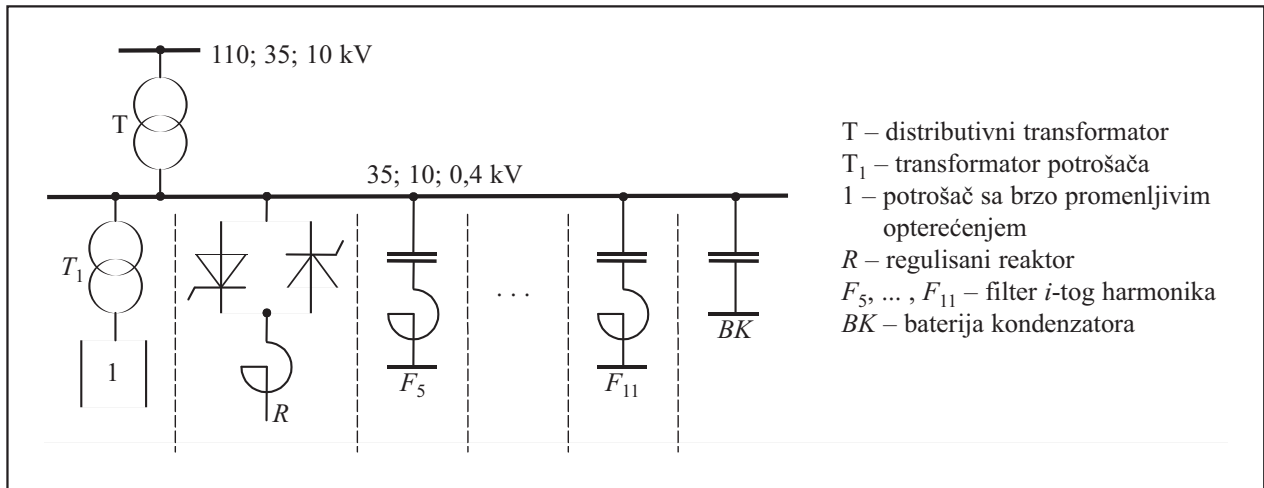
\bar{Q}_r – srednja reaktivna snaga reaktora.

Konačno, statički kompenzatori koriste kapacitivne i/ili induktivne komponente koje se povezuju, fazono upravljaju ili kombinuju sa regulisanim zasićenjem jezgra. Oni obezbeđuju potrebnu stabilizacionu reaktivnu snagu ili kontinualno ili u diskretnim vrednostima. Smatraju se najboljim rešenjima za poboljšanje kvaliteta napajanja, kako sa tehničke tako i sa ekonomske strane.

Razvija se i nova generacija statičkih kompenzatora koji u osnovi sadrže pretvarač napona. Uklopna stanja poluprovodničkih uređaja određuju iznos i karakter reaktivne snage (induktivne ili kapacitivne). Mogućnosti ovakvih kompenzatora su analogne rešenjima sa sinhronim mašinama, ali uz znatno brže delovanje. Najčešće se koristi kompenzator sa nazivom STATKOM. Samo ime je skraćenica od statičkog sinhronog kompenzatora, jer i radi analogno sinhronom kompenzatoru.

c) *Sinhroni kompenzator*, kada se priključi na sabirnice pogona sa brzopromenljivim opterećenjem, povećava snagu kratkog spoja i samim tim prigušuje kolebanje napona.

Mana im je što sporo reaguju na regulacione zahteve. Brzina reagovanja bi se mogla povećati ako bi sinhrona mašina bila snabdevena brzim automat-



Slika 7. Šema statičkog kompenzacionog uređaja indirektne kompenzacije

skim regulatorom pobude. Kako tada na pobudnom namotaju dolazi do indukovanih elektromotornih sila samoindukcije, jer ovaj namotaj ima veliku induktivnost, mogu se stvoriti prenaponi opasni za izolaciju ovog namotaja. Zbog toga je kod ovakvih specijalnih kompenzatora nominalni napon pobude niži i iznosi 20-50 V [8].

Sinhronom kompenzatoru se ne može regulisati svaka faza odvojeno. Mana ima je i visoka cena po 1 kvar, kao i složeni pogon.

5. PRIMER PROMENE NAMENE PROIZVODNIH PROSTORA

Principijelna šema distributivne mreže iz koje se napaja razmatrani realni industrijski potrošač data je na slici 8. Mesto priključenja proizvodnog pogona označeno je na slici oznakom *K*.

Podaci o elementima mreže i njihovim reaktansama dati su u tabeli 2.

Distributivna mreža je priključena na jaku mrežu naponskog nivoa 110 kV sa poznatom snagom kratkog spoja [9]. Takođe, u istu se injektira proizvodnja male elektrane čiji su generatori označeni na slici sa G₁, G₂ i G₃, a njihove ekvivalentne reaktanse imaju vrednost prema [10].

Prilikom proračuna razmatraće se rezultati sa ili bez uvažavanja uticaja male elektrane.

Za razmatranu distributivnu mrežu određuje se snaga kratkog spoja na mestu priključenja proizvodnog pogona. Svedeno na naponski nivo 10 kV, za varijantu sa ili bez uvažavanja uticaja male elektrane, njena vrednost iznosi 21,814 1 MVA i 20,805 3 MVA, respektivno.

Na osnovu relacije (9), potrebno je proveriti uslov dozvoljenog ekvivalentnog kolebanja. Uzimanjem podataka o vršnoj godišnjoj snazi koju angažu-

je priključeni pogon (702 kW), uzimajući u obzir najnepovoljniji slučaj kada se uvažava uticaj male elektrane, ekvivalentno kolebanje iznosi:

$$\delta V_{ekp} (\%) = \frac{S_p}{S_k} \cdot 100 = \frac{0,702}{21,8141} \cdot 100 = 3,22, \quad (17)$$

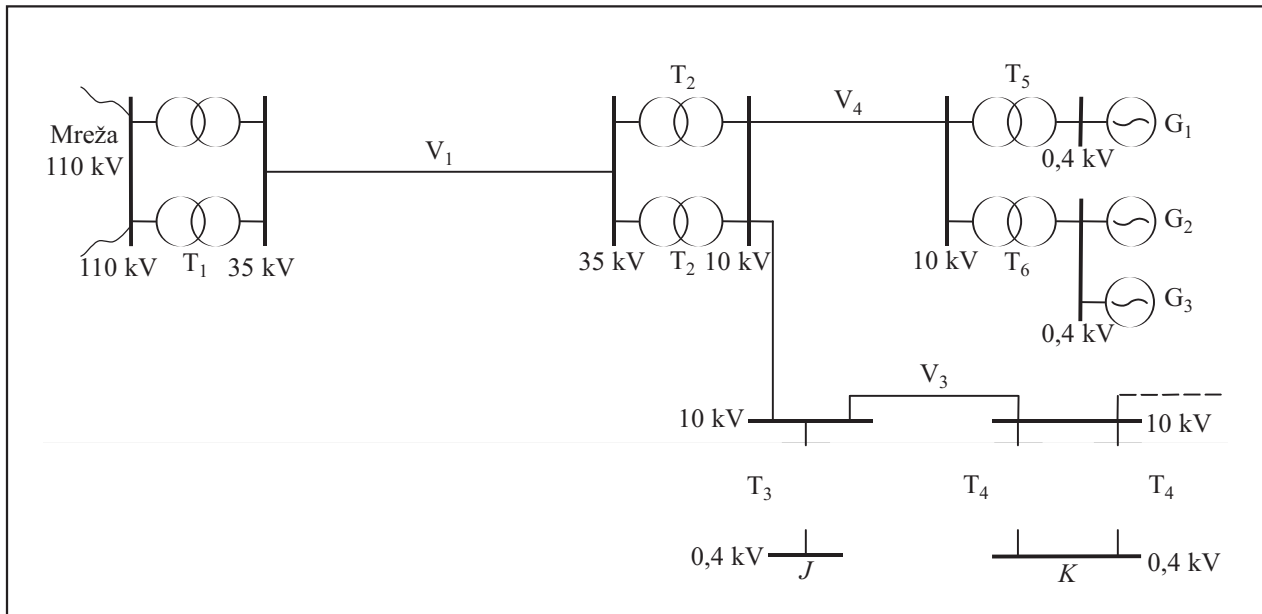
što je veće od dozvoljene vrednosti od 1 %, tako da uslov nije ispunjen.

Za primer na slici 8, korišćenjem mrežnog analizatora *Chauvin Arnoux*[®] C.A 8334, vršeno je merenje jačine treperenja za razmatrani pogon u tački *K*. Istovremeno je vršeno merenje jačine treperenja i u tački *J* sekundara transformatora T₃ sa koga se napaja distributivna potrošnja.

Tabela 2.

Podaci o elementima mreže

Oznaka elementa mreže	$S_n^{(k)}$ (MVA)	$x(u_k)$ (%)	l (km)	m (kV/kV)	X (Ω)
M	1352,7	–	–	–	0,073 9
T ₁	31,5	10,86	–	110/35	0,344 8
V ₁	–	0,4	13,2	–	0,431
T ₂	4	5,76	–	35/10	1,44
V ₂	–	0,1	0,52	–	0,052
V ₃	–	0,1	0,53	–	0,053
T ₃	0,4	4	–	10/0,4	10
T ₄	0,63	5	–	10/0,4	7,936 5
V ₄	–	0,35	2	–	0,7
T ₅	1	6	–	10/0,4	6
T ₆	0,4	4	–	10/0,4	10
G ₁	0,8	0,35	–	–	0,437 5
G ₂	0,139	0,5	–	–	3,597 1
G ₃	0,139	0,5	–	–	3,597 1



Slika 8. Principijelna šema distributivne mreže

Dijagrami jačine treperenja dobijeni za sedmodnevni period prikazani su na slici 9 (merenje u tački K) i na slici 10 (merenje u tački J).

Maksimalne izmerene vrednosti jačine treperenja $P_{lt,i}$ u tački K su za:

$$\begin{aligned} \text{fazu 1:} & P_{lt,1}=4,27 \\ \text{fazu 2:} & P_{lt,2}=4,40 \\ \text{fazu 3:} & P_{lt,3}=4,67 \end{aligned}$$

Maksimalne izmerene vrednosti jačine treperenja $P_{lt,i}$ u tački J su za:

$$\begin{aligned} \text{fazu 1:} & P_{lt,1}=1,38 \\ \text{fazu 2:} & P_{lt,2}=1,35 \\ \text{fazu 3:} & P_{lt,3}=1,26 \end{aligned}$$

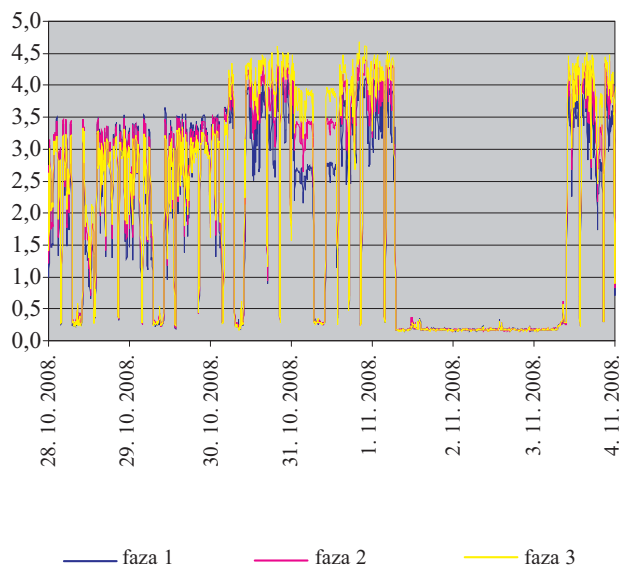
Sa slika 9 i 10 vidi se da se periodi sa najvećim vrednostima P_{lt} poklapaju.

Na osnovu izvršenih merenja i relacije (5) zaključuje se da rad pogona sa drugačijom vrstom opterećenja uzrokuje kolebanje napona (oličeno u flickeru) koje prekoračuje dozvoljenu vrednost. Gornje vrednosti jačine treperenja dobijene su za period u kome je ostvarena snaga oko tri puta manja od vršne godišnje snage.

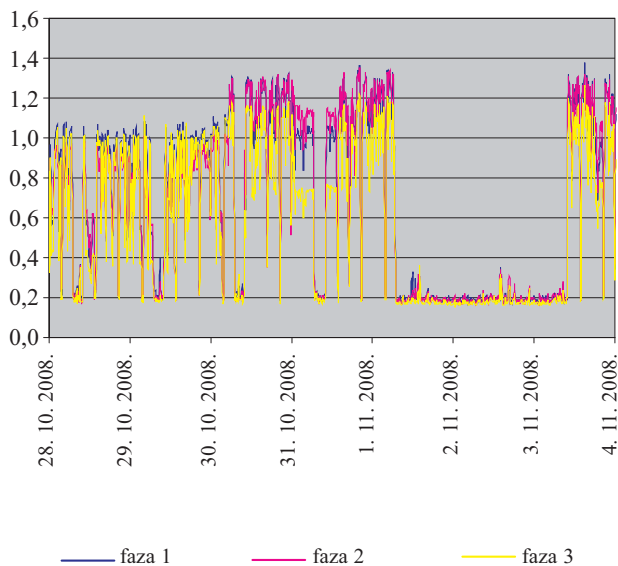
Povećanje snage ovog pogona u delu linije za kontaktno zavarivanje, bez adekvatnog reagovanja nekom od nabrojanih mera iz poglavlja 4, još više bi pogoršalo kolebanje napona. Posmatrano sa strane distributivne mreže, na osnovu analize merenih i računatih vrednosti, pogon ne zadovoljava jedan od standarda za kvalitet napona, pa se samim tim pove-

ćanje snage ovog pogona ne može dozvoliti sa postojećim načinom priključenja na mrežu.

Autori smatraju da je izbor načina smanjenja promene reaktivne snage stvar izbora korisnika razmatranog pogona kao investitora, a da u ovom slučaju distributer treba da bude samo kontrolor dozvoljenih vrednosti. Distributer može i treba da odlučuje samo o tački priključenja na mrežu pogona sa brzopromenljivim opterećenjem, prirodno težeći da ona bude sa što većom vrednošću snage kratkog spoja.



Slika 9. Merenje jačine treperenja na sabirnicama niskog napona proizvodnog pogona (tačka K)



Slika 10. Merenje jačine treperenja na sabirnicama niskog napona distributivnog transformatora (tačka J)

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu obradenog primera iz prakse gde se menja namena proizvodnog prostora, pa samim tim i njegova tehnologija, zaključuje se da su lako moguće situacije distribuiranja nekvalitetne električne energije na pojedinim delovima distributivnog sistema.

Apstrahovanje mogućnosti promene tehnološkog procesa koja može da izazove pogoršanje parametara kvaliteta napona u distributivnoj mreži, a da pri tome ne dođe do prekoračenja odobrene snage, odnosi se i na pogone sa nepromenjenim i promenjenim vlasnicima.

Obradeni primer dokazuje da je promena namene proizvodnog prostora sa gledišta kvaliteta električne energije još opasnija za slučaj povećanja jednovremene snage iznad odobrene vrednosti.

Posledice se reflektuju na dva načina:

a) relativno „čista” distributivna mreža može da se „zaprlja” pojavom novog tehnološkog procesa sa udarnim i brzopromenljivim opterećenjima;

b) relativno „prljava” distributivna mreža može da smeta radu novog tehnološkog procesa koji zahteva „čistu” distributivnu mrežu.

Sankcionisanja kupca iz stava a) mogu se prepoznati i to implicitno samo u nekim članovima važeće zakonske regulative.

Sankcionisanje isporučioaca iz stava b) viđeno je samo delimično u Uredbi o uslovima isporuke električne energije. Neophodno je prethodne posledice izbeći, videvši sve okolnosti koje utiču na pogorša-

vanje kvaliteta napona u budućem Pravilniku o radu distributivnog sistema.

7. LITERATURA

- [1] [idlovskiy A. K., Kurennyy Ç. G., VVEDENIE V STATISTI^ESKUÕ DINAMIKU SISTEM ÇLEKTROSNAB@ENIÆ, Naukova dumka, Kiev, 1984.
- [2] @elezko Ö. S., POTERI ÇLEKTROÇNERGII I SE KA^ESTVO V ÇLEKTRI^ESKIH SETÆH, Obzornaæ informaciaæ, Informçnergo, Moskva, 1989.
- [3] Borisov B. P., Vagin G. Æ., ÇLEKTROSNAB@ENIE ÇLEKTROTEHNOLOGI^ESKIH USTANOVOK, Naukova dumka, Kiev, 1985.
- [4] Ivanov B. S., Sokolov V. I., RE@IMB POTREBLIENIÆ I KA^ESTVO ÇLEKTROÇNERGII SISTEM ÇLEKTROSNAB@ENIÆ PROMB[LENNB[PREDPRIÆTIY, Çnergo-atomizdat, Moskva, 1987.
- [5] Ov~arenko A. S., Rozinski? D. I., POVB [ENIE ÇFFEKTIVNOSTI ÇLEKTROSNAB@ENIÆ PROMB[LENNB[PREDPRIÆTIY, Tehnika, Kiev, 1989.
- [6] Rajaković N., Tasić D., Savanović G., DISTRIBUTIVNE I INDUSTRIJSKE MREŽE, Akademiska misao, Beograd, 2004.
- [7] @e`elenko I. V., Bo`ko V. M., Vagin G. Æ., Rabinovi~ M. L., ÇFFEKTIVNBE RE@IMB RABOTB ÇLEKTROTEHNOLOGI^ESKIH USTANOVOK, Tehnika, Kiev, 1987.
- [8] @e`elenko I. V., Iskakov K. B., Lipskiy A. M., RE@IMB NAPRÆ@ENIÆ V GORODSKIH ÇLEKTRI^ESKIH SETÆH, Kazahstan, Alma-Ata, 1984.
- [9] STUDIJA PARAMETARA KRATKOG SPOJA ZA 2010. GODINU, Direkcija za razvoj EPS-a, Beograd, 1995.
- [10] Požar H., VISOKONAPONSKA RASKLOPNA POSTROJENJA, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.
- [11] Hot E., ELEKTROTEHNIČKA KONVERZIJA ENERGIJE, Svjetlost, Sarajevo.
- [12] Obradović B., Đoković M., Brajović V., TERMOTEHNIKA SA ELEKTROTERMIJOM, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [13] Majstorović A., Jovanović M., OSNOVI ZAVARIVANJA, LEMLJENJA I LEPLJENJA, Naučna knjiga, Beograd, 1995.
- [14] Jovanović S. M., OSNOVE ELEKTROTERMIJE I ELEKTROTERMIČKA POSTROJENJA, Nauka, Beograd, 1994.
- [15] ČETVRTO SAVETOVANJE O KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Split, 1975.

- [16] Pelissier R., LES RÉSEAUX D'ÉNERGIE ELECTRIQUE, Dunod, Paris, 1971, 1975.
- [17] Ožegović M., Ožegović K., ELEKTRIČNE MREŽE, Sveučilište u Splitu, Split, 1982.
- [18] @e`elenko I. V., POKAZATELI KA^ESTVA ĆLEKTROĀNERGII I IH KONTROLÝ NA PROMB[LENNBH PREDPRIÆTIÆH, Ćnergoatomizdat, Moskva, 1986.
- [19] Tanasković M., Bojković T., Perić D., DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE, Akademska misao, Beograd, 2007.
- [20] Novinc Ž., KAKVOĆA ELEKTRIČNE ENERGIJE, Graphis, Zagreb, 2003.
- [21] UREDBA O USLOVIMA ISPORUKE ELEKTRIČNE ENERGIJE, Službeni glasnik RS, br. 107, Beograd, 2005.

Rad je primljen u uredništvo 02. 04. 2009. godine



Josif V. Spirić je rođen 1945. godine u Leskovcu. Diplomirao je 1970. godine, magistrirao 1985. i doktorirao 1997. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Od 1970. do 1974. godine radio je u fabrici „Mačkatica” u Surdulici na problemima motornog pogona i elektrotermije. Od 1974. godine radi u JP „Elektrodistribucija” Leskovac kao glavni inženjer eksploatacije, šef projektnog biroa, tehnički direktor i direktor. Od 2007. godine radi kao savetnik u PD „Jugoistok” u Nišu. Ima zvanje naučnog saradnika.

Na stručnom planu bavio se problemima kompenzacije, eksploatacije, kvaliteta električne energije, gubitaka, upravljanja opterećenjem, automatizacijom srednjenaponskih mreža i planiranjem gradskih i ruralnih mreža.



Aleksandar S. Jović je rođen 1980. godine u Leskovcu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 2005. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu na smeru za Industrijsku energetiku. Posle diplomiranja zaposlio se u PD „Jugoistok” d.o.o. Niš, Ogranak „Elektrodistribucija Leskovac” najpre kao inženjer za merenja i kontrolu, a od 2009. godine radi u Centru za gubitke Privrednog društva. Oblasti interesovanja su mu električna merenja i analiza i eksploatacija distributivnih mreža.



Miroslav B. Dočić je rođen 1976. godine u Leskovcu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 2001. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu na smeru za Industrijsku energetiku, a trenutno je student postdiplomskih studija na istom fakultetu. Posle diplomiranja zaposlio se u JP „Elektrodistribucija” Leskovac. Radio je na poslovima tehničkog rukovodioca Pogona Lebane, inženjera za merenja i kontrolu, a trenutno je direktor za Tehnički sistem Ogranka „Elektrodistribucija Leskovac”.

Do sada je objavio desetak radova koji su prezentovani u časopisima i na domaćim i međunarodnim konferencijama. Oblasti interesovanja su mu analiza, eksploatacija i automatizacija distributivnih mreža.

Siniša Spremić

Primena spektroskopije u frekventnom području za određivanje stanja izolacije 110 kV provodnih izolatora

Stručni rad

UDK: 621.315.619; 621.315.61; 621.315.62

Rezime:

Stanje izolacije transformatora i provodnih izolatora na bazi celuloze može da se odredi primenom metode spektroskopije na osnovu frekvencijskog odziva karakteristike faktora dielektričnih gubitaka $\text{tg}\delta$. Iz karakteristike se mogu izvući zaključci o sadržaju vode u papirnoj izolaciji kao i o stanju ulja ili drugog izolacionog materijala kojim je papirna izolacija impregnirana i okružena. Naznačeni su najvažniji uzroci starenja čvrste i tečne izolacije sa posebnim osvrtom na vodu. Daju se opšti podaci o provodnim izolatorima kondenzatorskog tipa sa poređenjem prethodnih merenja kapacitivnosti (fabrička ispitivanja) sa novijim merenjima na 110 kV provodnim izolatorima. Prikazana je metoda kojom su vršena novija merenja, dat tabelarni prikaz poređenja starih i novih merenja kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka na 110 kV provodnim izolatorima istog tipa i opisana problematika korekcija merenih vrednosti faktora dielektričnih gubitaka. Na kraju, dati su prikaz i analiza rezultata merenja faktora dielektričnih gubitaka pri promeni frekvencije na 110 kV provodnim izolatorima različitih tipova.

Ključne reči: provodni izolator, izolacija, ulje, papir, faktor dielektričnih gubitaka, frekvencija

Abstract:

APPLICATION OF FREQUENCY DOMAIN SPECTROSCOPY FOR DETERMINING INSULATION CONDITION OF 110 kV BUSHINGS

Frequency domain spectroscopy gives the possibility to determine the condition of cellulose based insulation of transformer windings and bushings using dissipation factor $\text{tg}\delta$ frequency response. From $\text{tg}\delta$ frequency response it is possible to come to a conclusion about water content in paper insulation and about condition of oil or other material impregnating or surrounding the paper insulation. There are specified most important factors which are responsible for deterioration of solid and liquid insulation with distinct attention on water. There is given general data about condenser type of bushings with comparison between former capacitance measurements (factory tests) and new ones on 110 kV bushings. New measuring results method was shown, there is tabular review of comparison between new and old capacitance and dissipation factor measurements of 110 kV bushings of the same type and described problem to correct measuring values of dissipation factor. At the end, presentation and analysis of dissipation factor $\text{tg}\delta$ frequency response of different types of 110 kV bushings is given.

Key words: bushing, insulation, oil, paper, dissipation factor, frequency

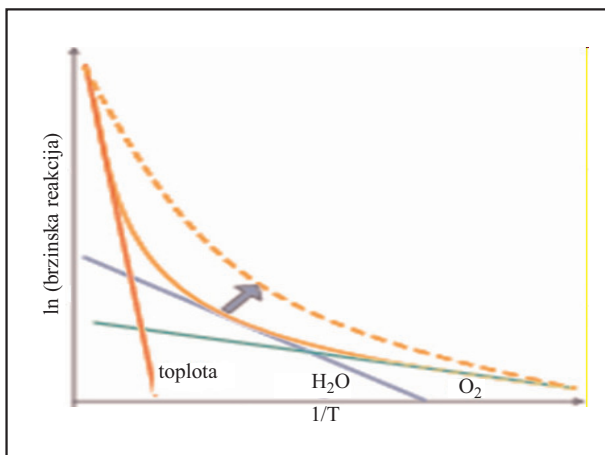
1. UVOD

U poslednjih desetak godina su razvijeni uređaji koji različitim metodama i uz podršku softvera imaju mogućnost da odrede sadržaj vode u izolaciji transformatora na bazi celuloze. Prva metoda je merenje napona oporavka ili merenje povratnog napona (Return or Recovery Voltage Measurement), druga metoda je metoda polarizacije i depolarizacione struje (Polarization and Depolarization Current Method), a treća metoda je spektroskopija u frekventnom području (Frequency Domain Spectroscopy) što je glavna tema ovog članka. U članku su naznačeni glavni uzroci starenja izolacije, sa posebnim osvrtom na vodu, zbog primene spektroskopije u frekventnom području u određivanju sadržaja vode u čvrstoj izolaciji na bazi celuloze. Daju se opšti podaci o kondenzatorskom tipu provodnih izolatora sa poređenjem prethodnih merenja kapacitivnosti (fabrička ispitivanja) sa novijim merenjima na 110 kV provodnim izolatorima. Prikazana je metoda kojom su vršena nova merenja, sa opisom određenih prednosti u odnosu na starije merne uređaje. Dat je tabelarni prikaz poređenja novih i starih merenja kapacitivnosti i $tg\delta$ na 110 kV provodnim izolatorima istog tipa. Grafički prikazi nelinearne promene vrednosti $tg\delta$ 110 kV provodnih izolatora u zavisnosti od temperature i sadržaja vlage i nelinearne promene vrednosti $tg\delta$ papirne izolacije i ulja u odnosu na frekvenciju su dati u potpoglavlju vezanom za problematiku korekcije merenih vrednosti $tg\delta$ 110 kV provodnih izolatora. Dalje su prikazani i analizirani grafici $tg\delta$ (f) različitih tipova 110 kV provodnih izolatora distributivnih transformatora prenosnih odnosa 110/21/10,5 kV/kV/kV i 110/36,75/10,5 kV/kV/kV snaga od 20 MVA do 63 MVA.

2. STARENJE IZOLACIJE

Glavni uzroci starenja čvrste i tečne izolacije su temperatura uljnog/celuloznog dielektrika, prisutnost vode i prisutnost kiseonika. Pored ovih manji, ali ipak značajan uticaj, ima i kiselost ulja. Na slici 1. su prikazani uticaji temperature, kiseonika, sadržaja vode i kiselina na brzinu degradacije celulozne izolacije. Koren strelice na slici je naslonjen na karakteristiku bez uticaja kiselina, a vrh strelice na isprekidanoj liniji prikazuje karakteristiku sa uticajem kiselina.

Na starenje usled temperature se može uticati smanjenjem radne temperature ulja i čvrste izolacije samo konstrukcionim zahvatima na unapređenju sistema hlađenja (povećanje rashladnih površina, veći broj pumpi i ventilatora ili veći protok ulja i/ili va-



Slika 1. Uticaj temperature, kiseonika, sadržaja vode i kiselina na brzinu degradacije celulozne izolacije

zduha. Temperatura ulja i čvrste izolacije je funkcija temperature ambijenta, opterećenja i osunčanosti.

Dodavanjem inhibitora u ulje oksidacioni procesi se značajno usporavaju. Kvalitetna originalno inhibirana ulja i nakon dugogodišnje eksploatacije imaju odlične karakteristike ulja sa veoma niskom kiselošću.

Primena spektroskopije u frekventnom području ima za cilj da se odredi sadržaj vode u čvrstoj izolaciji na bazi papira i specifična električna otpornost ulja. Zbog mogućnosti određivanja sadržaja vode u čvrstoj izolaciji ovde će se dati kratak opis uticaja vode na starenje papirne izolacije i opisati poreklo vode u papirnoj izolaciji.

Pravilnim održavanjem sistema za disanje transformatora i dobrom zaptivenošću obezbeđuje se da voda iz okoline ne uđe u tečnu i čvrstu izolaciju. Voda se ne može potpuno odstraniti iz čvrste izolacije, tako da novi transformator ili provodni izolator u čvrstoj izolaciji ima određenu količinu vode. Kvalitetnim sušenjem čvrste izolacije pre sipanja obradnog ulja obezbeđuje se nizak nivo vode u ulju i čvrstoj izolaciji. U toku eksploatacije voda se može odstraniti iz čvrste izolacije i ulja odgovarajućim postupkom. Voda se stvara degradacijom (oksidacijom) papirne izolacije i ulja, a sama voda dalje ubrzava oksidacione procese. Voda je i uzrok i rezultat razlaganja papira i ulja. Voda će se nejednako raspodeliti sa mnogo više vode u papiru nego u ulju. Značajan faktor kako će se voda raspodeliti između iste mase papira i ulja je temperatura. Na višim temperaturama voda iz papira odlazi u ulje čime se njen sadržaj u ulju može značajno povećati dok se u papiru (zbog daleko veće količine nego u ulju) sadržaj vode malo smanji. U 110 kV provodne izolatore vlaga može da uđe u slučajevima otvaranja provodnog izolatora (apsorpcija iz atmosfere), ako postoji cure-

nje ili loši spojevi na mestima zaptivanja (prodor vode ili vlage iz vazduha) i degradacijom izolacije starenjem (stvara se vlaga). 110 kV provodni izolatori starije izvedbe su imali donji deo uronjen u ulje transformatora koji nije bio zaštićen tako da je vlaga iz ulja transformatora mogla da prodre u papirnu izolaciju 110 kV provodnog izolatora. Noviji 110 kV provodni izolatori imaju donji deo uronjen u ulje transformatora zaštićen oblogom od epoksidne smole (stariji zaštićeni su zaliveni nepoznatim materijalom) sa gumenim zaptivačima čime je uljem ili smolom impregnirana ili smolom vezana papirna izolacija 110 kV provodnog izolatora u delu uronjenom u ulje transformatora odvojena od ulja transformatora.

3. OPŠTI PODACI O ISPITIVANIM 110 kV PROVODNIM ISOLATORIMA I POREĐENJE PRETHODNIH MERENJA KAPACITIVNOSTI (FABRIČKA ISPITIVANJA) SA NOVIJIM MERENJIMA

3.1. Opšti podaci o ispitivanim 110 kV provodnim izolatorima

Ispitivani 110 kV provodni izolatori su kondenzatorskog tipa sa stepenasto izvedenom izolacijom od papira sa umetnutim provodnim (ili poluprovod-

nim) slojevima. FDS metodom su ispitani 110 kV provodni izolatori sa uljem impregniranim papirom (Oil Impregnated Paper – u daljem tekstu: OIP), sa smolom vezanim papirom (Resin Bonded Paper – u daljem tekstu: RBP) i sa smolom impregniranim papirom (Resin Impregnated Paper – u daljem tekstu: RIP). Većina 110 kV provodnih izolatora je RBP tipa, tako da je i većina ispitanih 110 kV provodnih izolatora RBP tipa. Svi ugrađeni 110 kV provodni izolatori su sa porcelanskim izolatorom i kod većine postoji priključak za merenje tgδ. Dužina dela uronjenog u ulje (deo ispod prirubnice) se razlikuje, kao i ukupna dužina provodnog izolatora. Dužina „kondenzatorskog” dela provodnog izolatora i broj i raspored provodnih (poluprovodnih) slojeva određuju kapacitivnost provodnog izolatora.

3.2. Poređenje prethodnih merenja kapacitivnosti (fabrička ispitivanja) sa novijim merenjima

U tabeli 1. su dati podaci o novim merenjima kapacitivnosti 110 kV provodnih izolatora i prikaz razlike merene kapacitivnosti u odnosu na referentne vrednosti.

Nepoznato je kojim uređajem i kojom metodom je izvršeno referentno merenje tangens delta i kapa-

Tabela 1.

Rezultati merenja kapacitivnosti 110 kV provodnih izolatora

Tip	Godina proizvodnje	Broj isp. komada	Opseg C_{ref} (pF)	Opseg C_{mer} (pF)	Broj komada 5<DC<10 (%)	Broj komada 10<DC<20 (%)	Broj komada DC>20 (%)
GOB 550	1982-89.	4	150,2-152,3	149,8-152,6	0	0	0
KTrf 145/630	1967.	8	124-131	142,5-154,8	0	8	0
KVP123/630/CH1	1992-95.	12	123,4-141	131,8-144,2	4	0	0
KVP123/630/e	1969.	19	nepoznato	144,3-162,1	7a)	2a)	0a)
KVP123/630/g	1969.	8	nepoznato	158,7-168,3	1a)	0a)	0a)
KVP123/630/r	1974-76.	32	111-113b)	107,6-129,5	8b)	2b)	0b)
123-550/400	1973.	4	181-194	211-219	1	3	0
123-550/400	1974.	6	nepoznato	124,1-135,3	1a)	0a)	0a)
145/630	1967-68.	8	nepoznato	142-154	1a)	0a)	0a)
CTf 123-550/400	1974.	2	nepoznato	150,7-153	?	?	?
CTkf 123-550/400	1975.	20	102-111	112,7-121,4	16	4	0
CTkf 123-550/400	1977-80.	24	95-102	104,3-113,3	9	10	0
UTkf 123-550/400	1982-84.	36	98-104	104,7-118	21	12	0
OTxf 550/32/0	1986.	4	nepoznato	236,6-237,9	0	0	0
RTkf 550/32/0 K	1987.	8	275-288	278,7-293	0	0	0
PNO.123.550.800	1999-05.	44	179,1-272,2	177,5-274,8	0	0	0
PSO.123.550.800	2005.	4	275,6-277,2	272,6-274,4	0	0	0
UKUPNO	-	243	-	-	69	41	0

Legenda uz tabelu 1:

- a) – za meru odstupanja uzeta najniža izmerena vrednost kapacitivnosti
- b) – podatak proizvođača provodnog izolatora za serije, uzeto kao referentna vrednost

citivnosti 110 kV provodnih izolatora izuzev merenja koja su obavljena kod domaćeg proizvođača transformatora gde je korišćen Šeringov most. Prikaz uređaja i metode kojom se vrše nova merenja će biti dati u tački 4. Preračunavanja rezultata kapacitivnosti uz uvažavanje temperature i frekvencije nisu vršena jer su merenja vršena pri frekvenciji od 50 Hz, a temperatura nema uticaj na promenu kapacitivnosti.

Očigledno je da velik postotak ispitanih provodnih izolatora ima povišenu kapacitivnost u odnosu na početnu. Svi provodni izolatori sa povišenom kapacitivnošću su RBP tipa.

Uzroci povećanja kapaciteta mogu biti naprsline usled slabije kontrolisanog postupka prevlačenja smolom i namotavanja čime se ostavlja zarobljen vazduh u šupljinama što kasnije proizvodi pojavu parcijalnih pražnjenja uzrokujući eroziju materijala. U [1] se navodi da je starenje kod RBP uzrokovano naprslinama smolom vezanog papira i nehomogene impregnacije izolacionim uljem, tako da životni vek ima veliko rasipanje i ne bi trebalo da prelazi 30 godina. Zbog ovog je neophodno pratiti promene kapacitivnosti provodnih izolatora.

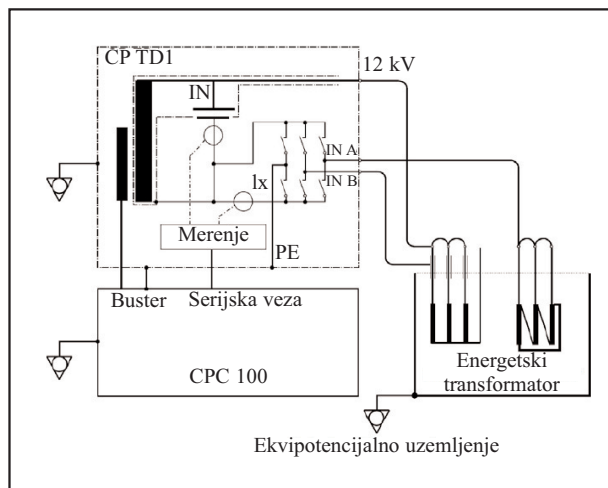
4. PRIKAZ MERNE METODE, POREĐENJE MERENJA NA 110 kV PROVODNIM IZOLATORIMA ISTOG TIPA I PROBLEMATIKA KOREKCIJA

4.1. Prikaz korišćene merne metode

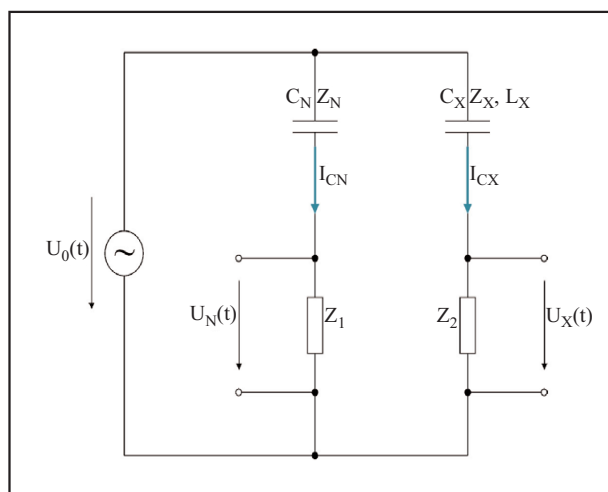
Nova merenja se vrše uređajem CPC100+CPTD1, a uprošćena šema je prikazana na slici 2.

Na slici 3. je prikazan merni princip uređaja CPC100+CP TD1 i isti koristi metodu sličnu Šeringovom mostu. Glavna razlika je da merni princip uređaja CP TD1 ne zahteva podešavanje za merenje C i tgδ. CN je referentni kondenzator izolovan gasom sa tgδ ispod 10^{-5} . U laboratorijskoj upotrebi, takvi kondenzatori se često koriste da bi se dobila precizna merenja, s obzirom da su klimatski uslovi veoma stabilni. Ovo nije slučaj sa merenjima na terenu gde temperature mogu značajno da variraju, što dovodi do povećanja i smanjenja dužine elektrode u referentnom kondenzatoru. Uređaj CP TD1 uzima sve ove efekte u obzir i kompenzuje ih elektronski, tako da je moguće meriti na terenu sve do $tg\delta = 5 \times 10^{-5}$.

Dva ulaza IN-A i IN-B sa prekidačkom matricom smeštenom unutar uređaja omogućavaju da se sa jednim penjanjem na transformator obavi merenje tgδ i kapacitivnosti na VN-M i VN-SN ili da se obavi merenje na dva provodna izolatora. Pripremom odgovarajućih „kartica” u kancelariji skraćuje



Slika 2. Uprošćena šema merenja



Slika 3. Merni princip uređaja CP TD1

se vreme potrebno za merenje. Postoji mogućnost automatskog merenja tgδ i kapaciteta u više tačaka (npr. merenje po naponu ili frekvenciji). Prebacivanje podataka se može vršiti preko mreže ili na prenosivi računar putem CPC100. Novije verzije CPC100 imaju USB priključak za prebacivanje podataka.

4.2. Poređenje merenja na 110 kV provodnim izolatorima istog tipa

Zbog nepostojanja tačnih referentnih (početnih) vrednosti tgδ i kapacitivnosti za veći broj tipova 110 kV provodnih izolatora u tabeli 2 su prikazani podaci o merenjima za tipove za koje posedujemo početne podatke sa ispitnih listova proizvođača 110 kV provodnih izolatora ili sa ispitnih listova transformatora. Za svaki tip je prikazan uzorak od 4 provodna izolatora sa jednog transformatora i on daje sliku za čitavu populaciju provodnih izolatora istog tipa.

Tabela 2.

Prikaz početnih i novih rezultata merenja $tg\delta$ i kapacitivnosti 110 kV provodnih izolatora

Tip	Godina proizvodnje	Priklj.	C_{ref} (pF)	C_{mer} (pF)	$tg\delta_{ref}$ (%)	$tg\delta_{mer}$ (%)	T_{ref} (°C)	T_{mer} (°C)
GOB 550	1983.	N	151,6	152,6	0,561	0,420	17	45
		A	151,5	152,1	0,546	0,500	17	45
		B	152,3	152,2	0,575	0,473	17	45
		C	150,2	149,8	0,571	0,449	17	45
KTrf 145/630	1967.	N	124	142,5	0,880	0,650	-	35
		A	-	147,3	-	0,784	-	35
		B	131	154,8	0,650	0,586	-	35
		C	130	146,8	0,650	0,724	-	35
KVP123/630/CH1	1995.	N	130,5	133,9	0,700	0,589	22	50
		A	132,3	134,4	0,680	0,574	22	50
		B	129,2	131,8	0,680	0,598	22	50
		C	126,2	131,1	0,650	0,540	22	50
123-550/400	1973.	N	181	211	0,617	0,709	19	27
		A	193	219	0,637	0,630	19	-
		B	184	211	0,617	0,519	19	27
		C	194	216	0,626	0,490	19	27
CTkf 123-550/400	1975.	N	111	119,9	0,674	0,656	26	20
		A	110	119,4	0,592	0,591	26	20
		B	107	117,8	0,666	0,646	26	20
		C	106	118,2	0,645	0,638	26	20
CTkf 123-550/400	1980.	N	100	111,2	0,544	0,452	24	40
		A	95	106,0	0,550	0,521	24	40
		B	102	107,1	0,580	0,469	24	40
		C	100	105,1	0,582	0,493	24	40
UTkf 123-550/400	1982.	N	101	107,2	0,585	0,491	22	40
		A	102	106,0	0,598	0,479	22	40
		B	102	110,4	0,593	0,455	22	40
		C	102	106,5	0,594	0,485	22	40
RTkf 550/32/0 K	1987.	N	285	281,4	0,307	0,225	23	50
		A	288	282,3	0,278	0,221	23	50
		B	284	283,2	0,300	0,220	23	50
		C	283	280,1	0,303	0,228	23	50

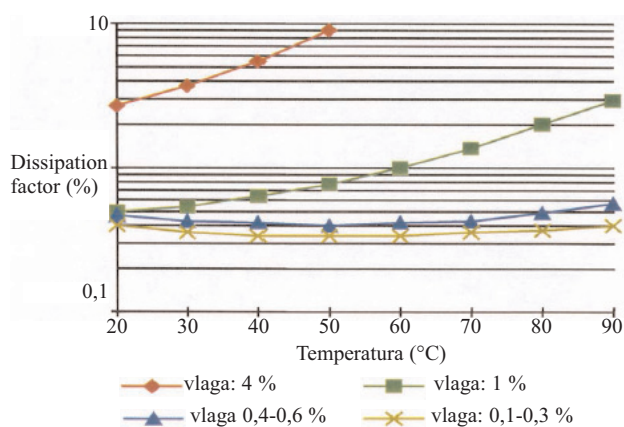
Na tipu GOB 550 je rezultat novog merenja na 58 Hz iz 2006. godine, a ostala novija merenja su na 50 Hz iz 2007. godine.

U tabeli 2. se vidi da su kod većine prikazanih novijih merenja $tg\delta$ 110 kV provodnih izolatora vrednosti $tg\delta$ manje od merenja koja su obavljena ranije i koja su bila uglavnom na nižim temperaturama. Očekivano je da vrednost $tg\delta$ pri istoj temperaturi kod starih 110 kV provodnih izolatora mora biti barem malo veća od referentne vrednosti.

4.3. Problematika korekcija merenih vrednosti $tg\delta$

Kod 110 kV provodnih izolatora tipa OIP se kod papirne izolacije sa malim sadržajem vlage u papiru (do 0,6 %) $tg\delta$ u odnosu na temperaturu [2] menja na način da se do temperature od oko 60 °C smanjuje, a pri daljem povećanju temperature se po-

većava. Kod veće vlažnosti papira $tg\delta$ se povećava sa povećanjem temperature. Korekcionni faktori (kri-



Slika 4. Promena $tg\delta$ (T) za različite sadržaje vlage u papirnoj izolaciji provodnih izolatora

ve) pokazuju da se na temperaturi od 60 °C dobije vrednost $\text{tg}\delta$ od oko 75 % vrednosti $\text{tg}\delta$ na 20 °C kod niskog sadržaja vlage u papiru [3]. Slično ponašanje je i za 110 kV provodne izolatore tipa RIP. Na slici 4. je dat prikaz karakteristika $\text{tg}\delta$ u zavisnosti od temperature sa različitim sadržajem vlage u papirnoj izolaciji za provodne izolatore tipa OIP [3] (moist. = moisture = vlaga).

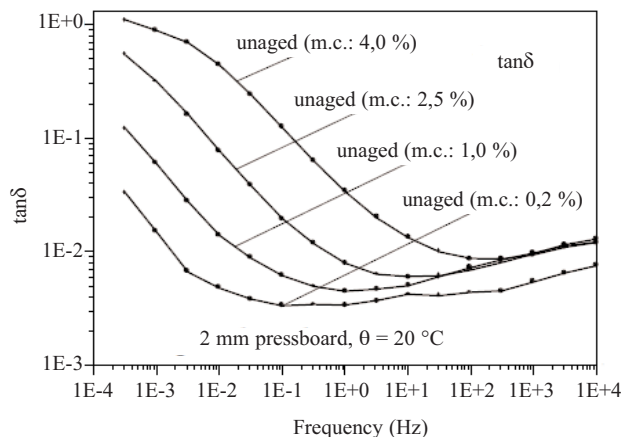
Pored merenja i poređenja vrednosti $\text{tg}\delta$ sa početnim fabričkim merenjima neophodno je vršiti merenje i poređenje vrednosti kapacitivnosti sa početnim fabričkim merenjima provodnih izolatora.

Ako se kod novih merenja napravi korekcija zbog povećanja kapacitivnosti opet bi vrednosti $\text{tg}\delta$ kod većine provodnih izolatora bile niže od referentnih vrednosti. S obzirom da su nova merenja urađena pri višim temperaturama provodnih izolatora i ukoliko se pogleda slika 4. može se izvući zaključak da provodni izolatori imaju niže vrednosti $\text{tg}\delta$ jer im je papirna izolacija još uvek sa niskim sadržajem vlage i umereno ostarela. Ukoliko bi se uz zaključak iz prethodne rečenice napravila korekcija i po temperaturi (nepoznata je tačna karakteristika korekcije), vrednosti $\text{tg}\delta$ novijih merenja bi bile veće od referentnih. To je očekivano jer su provodni izolatori dugo u pogonu čime su im pogoršane karakteristike.

Za poređenje novomeranih vrednosti $\text{tg}\delta$ sa referentnim (početnim) vrednostima neophodno je, pored korekcije po temperaturi (ukoliko se za određeni tip poseduje korekciona karakteristika i ukoliko je primenjiva), uzeti u obzir i promenu kapacitivnosti. Korigovani faktor dielektričnih gubitaka $\text{tg}\delta'$ se u odnosu na promenu kapacitivnosti može preračunati ovako: $\text{tg}\delta' = \text{tg}\delta_{\text{mereno}} \cdot (C_{\text{mereno}} / C_{\text{referentno}})$. Ovde se mora napomenuti da se pri promeni frekvencije od 15 Hz do 400 Hz kapacitivnost provodnog izolatora smanji do 1 %. Ukoliko se merenje vrši na 58 Hz zbog izbegavanja uticaja polja okolnih elemenata, zbog promene $\text{tg}\delta$ sa frekvencijom, neophodno je izvršiti i korekciju $\text{tg}\delta$ po frekvenciji. Kako korekcija po frekvenciji nije linearna, vrši se i merenje na 50 Hz. Od 2007. godine se vrši i merenje po frekvenciji od 15 Hz do 400 Hz koliki je opseg uređaja za merenje.

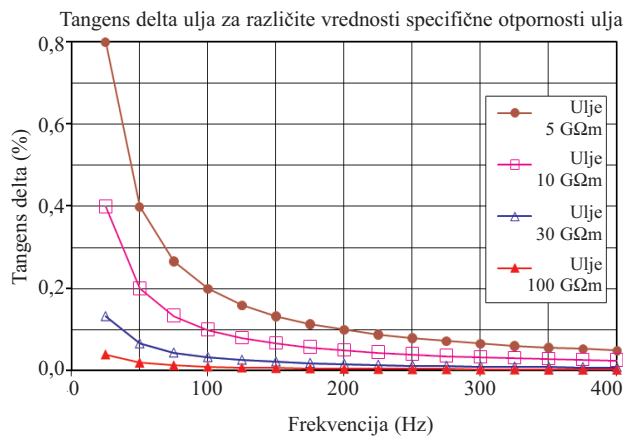
Na slici 5. je prikazana karakteristika $\text{tg}\delta$ (f) za presovane papirne ploče debljine 2 mm sa različitim sadržajem vlage sa obe ose u logaritamskoj raspodeli [6]. Očigledna je nelinearna promena $\text{tg}\delta$ (f) za papirni deo izolacije. Nelinearna je i promena $\text{tg}\delta$ u odnosu na promenu sadržaja vode u papiru.

Faktor dielektričnih gubitaka ($\text{tg}\delta$) ulja je obrnuto proporcionalan frekvenciji, a uopšten prikaz promene $\text{tg}\delta$ ulja u odnosu na frekvenciju je dat na slici 6. Faktor dielektričnih gubitaka $\text{tg}\delta$ ulja se povećava pri povećanju temperature, a specifična elek-



Slika 5. Prikaz $\text{tg}\delta$ (f) za nove presovane papirne ploče sa različitim sadržajem vode

trična otpornost ulja se smanjuje sa povećanjem temperature, ali se direktan odnos između $\text{tg}\delta$ ulja i specifične električne otpornosti ne može primeniti. U daljim razmatranjima je neophodno izvući korelaciju između promena $\text{tg}\delta$ i specifične električne otpornosti ulja u odnosu na temperaturu i to primeniti na kvantitativno tačnije određivanje specifične električne otpornosti ulja iz karakteristike $\text{tg}\delta$ ulja, a ne samo na osnovu karakteristike $\text{tg}\delta$ ulja kvalitativno i kvantitativno proceniti stanje.



Slika 6. Promena specifične električne otpornosti ulja u odnosu na frekvenciju

Korekcije $\text{tg}\delta$ po temperaturi i frekvenciji nisu rađene zbog nelinearnosti i nepoznavanja karakteristika korekcije, a karakteristike $\text{tg}\delta$ različitih tipova provodnih izolatora po temperaturi i po frekvenciji su različite. Također su različite i karakteristike $\text{tg}\delta$ istog tipa po temperaturi i po frekvenciji zbog različitog stanja izolacionog sistema te se svaki provodni izolator mora analizirati posebno. Korekcionni faktori (za mali sadržaj vlage u papirnoj izolaciji) po temperaturi proizvođača provodnih izolatora se mo-

gu (ukoliko se poseduju) primeniti kod novih provodnih izolatora kao i kod starih kod kojih nije došlo do značajnijeg pogoršanja stanja izolacionog sistema. Zbog nepostojanja sveobuhvatne korekcionne karakteristike korekcionna procena se za sada radi iskustveno, poređenjem. Korekcija tgδ po promeni kapacitivnosti (nova u odnosu na početnu vrednost) se razmatra, ali se ne računa i ne prikazuje posebno.

U [4] se navodi da se provodni izolatori sa RBP izolacijom moraju menjati ako kapacitivnost poraste za više od 20 % od početne (referentne) vrednosti i ukoliko vrednost tgδ pređe 2 %, gde je bitna karakteristika trend rasta. U [5] se navodi da je kritično stanje ukoliko se kapacitivnost promeni za više od 10 %, a vrednost tgδ poraste za više od 3 x referentna vrednost, bez obzira na tip izolacije. Gotovo svi proizvođači provodnih izolatora daju podatke o dozvoljenim promenama kapacitivnosti i maksimalnim vrednostima tgδ. Neki proizvođači su ranije, a neki kasnije odustali od RBP tipa provodnih izolatora (izuzev za niže naponske nivoe). Za tipove OIP i RIP se zaključuje da su postojani što se tiče kapacitivnosti i vrednosti tgδ. Na dva 110 kV provodna izolatora (koji se nalaze u neutrali 110 kV) tipa CTkf 123-550/400 i KVP 123/630/r su izmerene visoke vrednosti tgδ i na istima će biti izvršeno dodatno merenje i po potrebi će biti zamenjeni. Za merenje je preostalo još 104 komada 110 kV provodnih izolatora (26 transformatora) čime bi svi 110 kV provodni izolatori (izuzev onih bez priključka za merenje tgδ gde je potrebno vađenje iz suda transformatora – 48 komada i jednog gde se nije mogao skinuti poklopac priključka za merenje tgδ) imali merenje ne starije od 2002. godine.

5. REZULTATI MERENJA FAKTORA DIELEKTRIČNIH GUBITAKA tgδ METODOM FDS NA 110 kV PROVODNIM IZOLATORIMA RAZLIČITIH TIPOVA

Kod metode FDS primenjuje se sinusoidalni napon u opsegu frekvencije i na osnovu merene struje, kako po amplitudi tako i po faznom stavu, se određuje kompleksna dielektrična konstanta međunamotajne izolacije za potrebe određivanja sadržaja vode u celuloznoj izolaciji i specifične električne otpornosti ulja. Ova metoda se može primeniti i na provodne izolatore kodenzatorskog tipa sa papirnom izolacijom impregnisanom (ili vezanom) različitim materijalima. Obično se za prikaz merenih podataka koristi faktor dielektričnih gubitaka tgδ koji je frekventno zavisian odnos između imaginarnog i realnog dela kompleksne dielektrične konstante. Pogodnost ove metode je u tome što se kod većine provodnih izolatora ne može ispitati ulje jer su potpuno

zaptiveni, a uzorkovanje papira nije moguće. Primeenom spektroskopije u frekventnom području može se dobiti uvid u stanje izolacije provodnog izolatora preko rezultata specifične otpornosti ulja i sadržaja vode u papiru. Uređaj kojim su vršena merenja ima opseg od 15 Hz do 400 Hz, dok specijalni uređaji za metodu FDS sa softverom imaju opseg reda 0,1 mHz do 10 kHz, a imaju i mogućnost unosa geometrije namotaja u smislu procentualnog učešća kanala za ulje cilindričnog namotaja kako bi se dobili tačniji rezultati. Specijalni uređaji za metodu FDS rade sa nižim ispitnim naponom reda 100 V što povlači manje dimenzije i težinu uređaja i manju opasnost po ispitivače, ali zbog izbegavanja uticaja okolnih polja moraju biti opremljeni odgovarajućim filterima. Provodni izolatori nemaju kanale za ulje već su od centralne cevi do prirubnice potpuno popunjeni impregnisanim papirom i provodnim (poluprovodnim) slojevima.

FDS metoda ima prednost jer uključuje merenje tgδ i kapacitivnosti. Time je moguće otkriti grešku u postavci merenja, a promena kapacitivnosti u odnosu na merenja u fabrici može da pokaže da je došlo do degradacije materijala ili proboja između provodnih slojeva.

Merenjem pri jednoj frekvenciji ne možemo uočiti promenu svojstava u različitim materijalima. Analiza karakteristike tgδ po frekvenciji omogućava mnogo bolju dijagnostiku ispitivane izolacije. Na višim frekvencijama preovlađujuće utiče tgδ celulozne izolacije, na srednjim frekvencijama provodnost ulja je dominantan faktor, a na nižim frekvencijama na tgδ preovlađujuće utiče tgδ celulozne izolacije.

Određeni faktori imaju uticaj na pouzdanost i stabilnost analize rezultata. Ovi uticaji su glavni izvor grešaka. To su: temperatura izolacije, migracioni procesi, smanjenje provodnosti ulja, paralelne strujne staze, temperaturna kompenzacija u softveru za analizu, interpretacija merenih podataka, poređenje sa kartama ravnoteže vlage i vreme merenja.

Za određivanje sadržaja vlage u papirnoj izolaciji, postoje i metode korišćenjem različitih nomograma (npr. General Electric nomograph) i ravnotežnih karata (npr. Oommen equilibrium charts) pomoću kojih se uz poznavanje sadržaja vlage u ulju i temperature uzorka ulja može odrediti sadržaj vlage u papirnoj izolaciji. Ukoliko se uporede rezultati dobijeni različitim kartama, dobijaju se značajno različiti rezultati koji mogu da se razlikuju i višestruko.

Približno tačan sadržaj vlage u papirnoj izolaciji se može utvrditi metodom Karl Fišerove titracije, ali kod provodnih izolatora nema mogućnosti da se uzme uzorak papira za analizu.

Korekcija po temperaturi zbog nelinearnosti uljno-papirne izolacije nije jednostavna za izvođe-

nje. Temperaturni uticaj pomera karakteristike tgδ ulja u pravcu x-ose (na logaritamskoj skali), ali se uticaj difuzije vode iz papira u ulje ne može jednostavno sagledati. Povećanjem temperature voda iz papira ide u ulje, doduše u samom papiru se veoma malo smanji sadržaj vode u odnosu na ukupan sadržaj vode u papiru i to prvenstveno u vanjskim slojevima papira. Dobijaju se dva efekta – povećanjem temperature menja se vrednost tgδ papira, a istovremeno smanjenjem sadržaja vode u papiru usled povećanja temperature tgδ papira se smanjuje. Ulje, zbog povećanja temperature, dobija vodu iz papirne izolacije, a zbog povećanja temperature povećava se vrednost tgδ ulja. Na karakteristiku tgδ ulja presudnu ulogu imaju temperatura i specifična otpornost, a postoji i uticaj vode i kiselosti ulja. Na karakteristiku tgδ papirne izolacije presudnu ulogu imaju temperatura i sadržaj vode u papirnoj izolaciji.

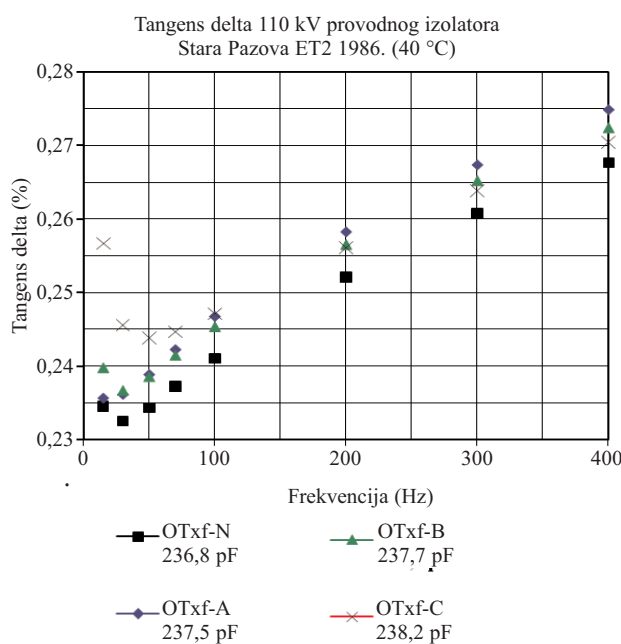
Nabavkom savremenog uređaja za merenje faktora dielektričnih gubitaka od 2007. godine počela su se vršiti merenja tgδ po naponu u 5 tačaka (1, 3, 5, 7 i 10 kV) uz frekvenciju od 58 Hz kako bi se izbegao uticaj okolnih elemenata postrojenja u pogonu i po frekvenciji u 8 tačaka (15, 30, 50, 70, 100, 200, 300 i 400 Hz) pri ispitnom naponu od 3 600 V. Uređaj za merenje nema softver za određivanje sadržaja vlage u papiru ni temperaturnu kompenzaciju merene vrednosti tgδ (izuzev ako se ubaci ručno proračunata). U 2006. godini su vršena merenja samo u jednoj tački i to pri naponu od 10 kV i frekvenciji od 58 Hz.

Merenja se prema uputstvu proizvođača vrše sa kompletno odspojenim priključnim stezaljkama transformatora, fazni i neutralni priključci pojedinih namotaja su međusobno povezani golim višežičnim provodnikom, transformatorski sud uzemljen, priključci su po potrebi obrađeni kako bi se ostvario dobar kontakt. Ovo je neophodno kako bi se izbegle greške u merenjima zbog velikih prelaznih otpora. Po potrebi se izvrši čišćenje vanjskih površina (porcelan) provodnih izolatora. Za temperaturu provodnih izolatora se uzimaju vrednosti temperature ulja očitane sa kontaktnih termometara, ali se mora uzeti u obzir da je tačnost kontaktnih termometara mala. Većina merenja je izvršena odmah nakon isključenja transformatora, a kompletna merenja po naponu i po frekvenciji na 4 provodna izolatora traju oko pola sata.

Na slici 7. je dat prikaz karakteristika tgδ po frekvenciji za 110 kV provodne izolatore tipa OIP. Vidi se da je na nižim frekvencijama (ispod 50 Hz) prisutan uticaj ulja koji podiže vrednost tgδ, ali je taj uticaj veoma mali. Može se reći da je i uljna i papirna izolacija ovih 110 kV provodnih izolatora u dobrom stanju sa procenom da je specifična električna

otpornost ulja oko 300 GWm na datoj temperaturi (40 °C), a preračunato na 90 °C bi bila oko 35 GWm za provodni izolator u fazi „C”. Ulje drugih provodnih izolatora ima značajno veću specifičnu električnu otpornost na datoj temperaturi (procena oko 500 GΩm). Pored ovog može se videti da kod viših frekvencija gde je dominantan uticaj celulozne izolacije postoji mala razlika u vrednosti tgδ između pojedinih provodnih izolatora koji su iz iste serije, približno jednakih kapacitivnosti i mereni su na istoj temperaturi. Ovo ukazuje na male razlike u sadržaju vlage u papirnom delu izolacije.

Sadržaj vlage u papiru je teško proceniti, ali s obzirom na izgled karakteristika sa slike 7. može se pretpostaviti da je manji od 1 %. Kada bi se imala merenja na više različitih temperatura na većem broju 110 kV provodnih izolatora istog tipa i sličnih početnih karakteristika mogao bi se izvući kvalitetniji zaključak o sadržaju vlage u papiru, tj. dati približna vrednost sadržaja vlage u papiru na osnovu promene tgδ u zavisnosti od temperature. U daljim razmatranjima je neophodno sagledati uticaj temperature na promenu tgδ.

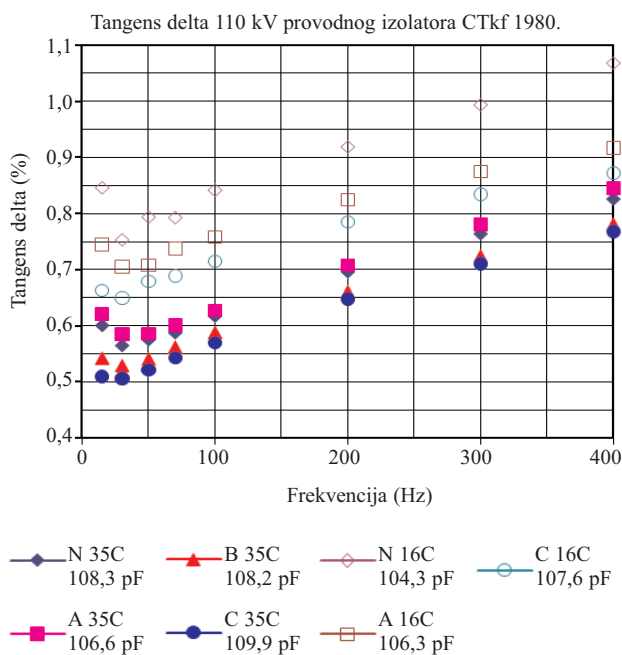


Slika 7. Karakteristika provodnih izolatora OIP

Razdvajanje karakteristike tgδ provodnog izolatora po frekvenciji na uljni deo i papirni deo se može uraditi na način da se u ukupnu karakteristiku ubaci karakteristika koja odgovara karakteristici tgδ ulja i da se onda ona „oduzme” od ukupne karakteristike. Očigledno je da je na merenim frekvencijama od 15 do 400 Hz dominantan uticaj papirne izolacije (na frekvencijama većim od 100 Hz je predo-

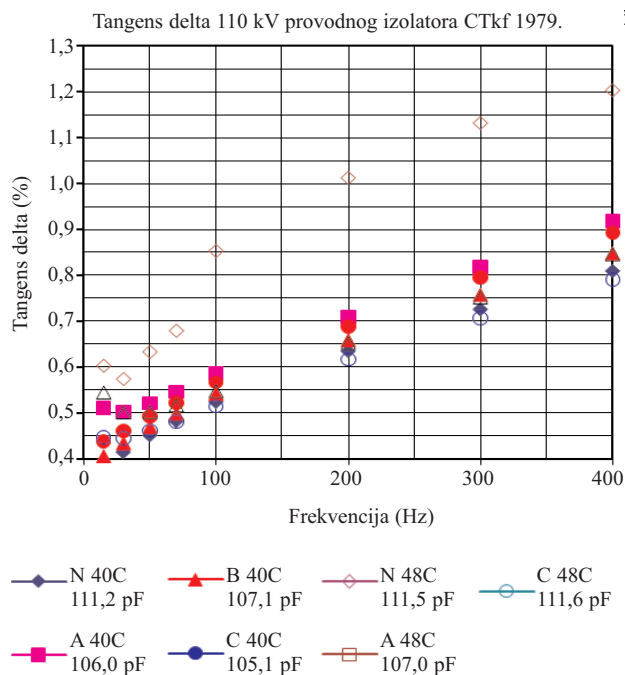
minantan) jer bi u slučaju da tu ima veći uticaj tgδ ulja ukupna karakteristika imala drugačiji izgled. Uticaj tgδ ulja se pojavljuje na frekvencijama manjim od 50 Hz uvećavajući karakteristiku tgδ papirnog dela. Karakteristika tgδ uljnog dela izolacije se odabira kako bi se uklopila u ukupnu karakteristiku.

Na slici 8. se vidi da vrednosti tgδ provodnih izolatora merenih na nižoj temperaturi imaju veće vrednosti, što je i očekivano. Moguće je da bi merenje na istoj temperaturi dalo približno jednake karakteristike. Provodni izolatori B 35C (faza „B” na 35 °C) i C 35C su u boljem stanju od N 35C i A 35C. Ulje im je nešto boljih karakteristika. Generalno se može reći da je stanje uljno-papirne izolacije ovih provodnih izolatora dobro, tj. uljno-papirna izolacija je malo ostarela. Jedini zabrinjavajući podatak je porast kapacitivnosti <10 % u odnosu na početnu vrednost.



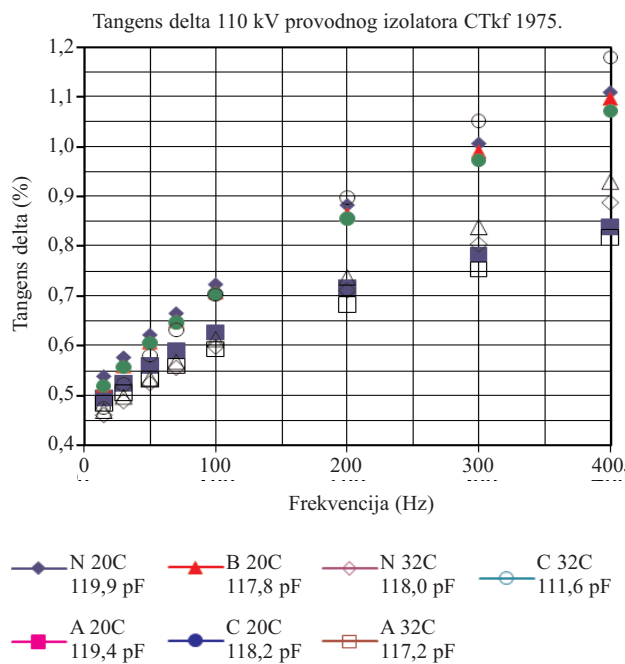
Slika 8. Karakteristika provodnih izolatora RBP iz 1980. godine

Na slici 9. se vidi da su ovi provodni izolatori mereni na približno istim temperaturama te da su im i karakteristike tgδ približno jednake izuzev A 48C koji ima povišenu vrednost. Visoku vrednost ima i provodni izolator u neutrali (nije prikazan na slici). Ova dva provodna izolatora su prilikom merenja po naponu pokazala značajniji pad vrednosti tgδ pri povišenju napona što ukazuje na loš spoj (prelazni otpor) ili lošu vezu izvoda za merenje tangens delta sa poslednjim slojem tako da će ovi provodni izolatori biti dodatno provereni.



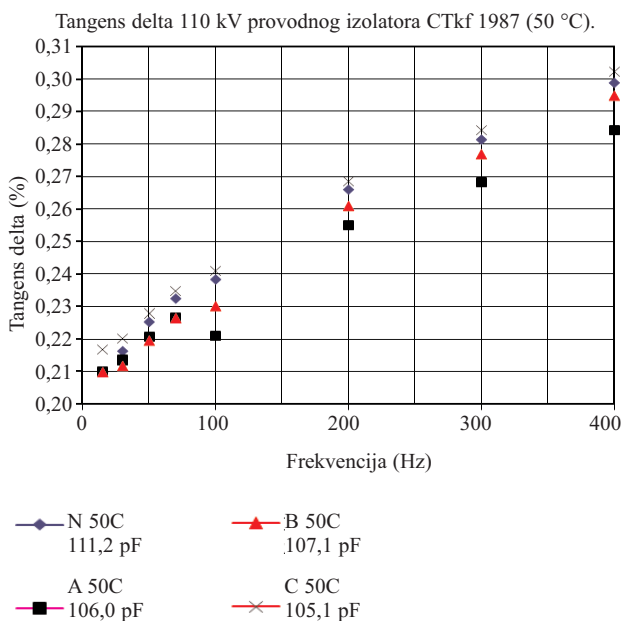
Slika 9. Karakteristika provodnih izolatora RBP iz 1979. godine

Na slici 10. se vidi da karakteristika jednog provodnog izolatora odstupa od preostala tri sa istog transformatora. Takođe se na nižim frekvencijama ne može uočiti uticaj ulja.



Slika 10. Karakteristika provodnih izolatora RBP iz 1975. godine

Na slici 11. se vidi da se kod merenja na 100 Hz kod provodnih izolatora B 50C, i posebno izraženo kod A 50C, pojavio značajniji propad vrednosti tgδ od očekivane prema izgledu krivih. Uzrok može biti smetnja u mreži frekvencije 100 Hz. Slično je kod A 48C na slici 9. s tim da tu vrednost tgδ na 100 Hz ima višu vrednost od očekivane u odnosu na druge tačke.



Slika 11. Karakteristika provodnih izolatora RIP iz 1987. godine

Kod svih provodnih izolatora tipa RBP je jedini zabrinjavajući podatak porast kapacitivnosti u odnosu na referentnu vrednost, a porast kapacitivnosti ide do 15 %.

Na slikama 8, 9 i 10 je dat prikaz karakteristika 110 kV provodnih izolatora istog tipa, ali različitih godišta (postoje razlike u referentnoj kapacitivnosti). Ovaj tip 110 kV provodnih izolatora (različitih godišta) u ukupnom broju učestvuje sa 1/6.

Karakteristike slične onima na slikama 8, 9 i 10 se dobijaju i za provodne izolatore RBP tipa UTkf izuzev što ovaj tip umesto ulja ima Micagel, a također i za 110 kV provodne izolatore drugih proizvođača.

Može se uočiti da je kod novijih tipova RIP (pošto je napuštena proizvodnja tipa RBP) ili kod novijih tipova OIP došlo do značajnog povećanja kapacitivnosti 110 kV provodnih izolatora iako su im mere ostale približno jednake. Mogući razlog je tražnja kupaca da vrednost tgδ bude ispod određene vrednosti (0,5 %). Stariji 110 kV provodni izolatori su imali početne (referentne) vrednosti tgδ gotovo uvek iznad 0,5 %. Sa praktično istom tehnologijom i istim materijalima uz približno iste mere nije mo-

guće smanjiti vrednost tgδ. Zato su proizvođači provodnih izolatora kao jedinu moguću meru za smanjenje vrednosti tgδ ispod 0,5 % upotrebili promenu konstrukcije u smislu da su smanjili broj provodnih slojeva, čime su povećali kapacitivnost (kapacitivnost uvećana skoro 3 puta) i time smanjili vrednost tgδ na vrednosti od oko 0,3. Pretpostavljam da su proizvođači, korišćenjem novih programskih paketa i tokom dužeg ispitivanja i praćenja provodnih izolatora sa smanjenim brojem provodnih slojeva (povećana kapacitivnost), došli do zaključka da smanjeni broj provodnih slojeva neće značajnije povećati električna naprezanja kondenzatorskog dela provodnog izolatora kao i da neće uticati da se raspodela električnog polja pogorša u smislu da se električna naprezanja između provodnog izolatora i drugih delova transformatora povećaju. Pored ovog učinjene su i neke konstrukcione izmene ugradnjom obloge na delu uronjenom u ulju i savremenijih oblikovača polja na završetku dela uronjenog u ulje čime se električno polje dodatno oblikuje u cilju smanjenja električnih naprežanja.

6. ZAKLJUČAK

Do sada obavljena merenja tgδ i kapacitivnosti na jednoj frekvenciji ili u frekventnom opsegu su pokazala da je stanje izolacionog sistema 110 kV provodnih izolatora tipova OIP i RIP dobro. Kod tipa RBP je stanje izolacionog sistema zadovoljavajuće zbog povećanja kapacitivnosti, a ovaj tip čini većinu 110 kV provodnih izolatora u pogonu. U narednom periodu je neophodno redovno, u periodima od 5-6 godina, vršiti merenja tgδ i kapacitivnosti i po potrebi vršiti zamene sumnjivih provodnih izolatora. Kod zamena 110 kV provodnih izolatora veći problem može biti u tome ukoliko se ne poseduje 110 kV provodni izolator istog tipa (i mera) pa se zamena vrši novim 110 kV provodnim izolatorom zbog neophodnih dorada užeta i postavljanja nove bolcne.

Rezultati tgδ dobijeni metodom FDS – spektroskopijom u frekventnom području i kod suženog frekventnog opsega od 15 Hz do 400 Hz mogu da se iskoriste za procenu stanja izolacionog sistema, tj. za približno određivanje sadržaja vode u papiru i specifične otpornosti ulja.

Rezultati merenja pri jednoj frekvenciji (npr. 50 Hz) mogu pokazati povišenu vrednost tgδ što onda povlači zaključak da je izolacioni sistem loš, ali ovom metodom se može pokazati koji deo izolacionog sistema je loših karakteristika (možda i oba).

Merenjem kapacitivnosti i upoređujući iste sa fabričkim ispitivanjem (ukoliko postoje) se može doneti zaključak da li je došlo do značajnijeg pogoršanja karakteristika provodnih izolatora.

Poređenjem ovde prikazanih merenja, već obavljenih merenja na provodnim izolatorima drugih tipova i budućih merenja na različitim tipovima provodnih izolatora pokušaće se detaljnije obraditi različiti uticaji na karakteristike tgδ ulja (ili drugog materijala) i papira provodnih izolatora. Od posebnog interesa je određivanje korelacije između promene tgδ i specifične električne otpornosti ulja u odnosu na temperaturu i određivanje (sagledavanje) uticaja promena temperature na promenu tgδ pojedinačnog provodnog izolatora u cilju određivanja sadržaja vlage u papiru.

6. LITERATURA

- [1] Joachim Schneider, Claus Neumann, Jurgen Hografer, Wolfram Wellssow, Michael Swan, Armin Schnettler, ASSET MANAGEMENT TECHNIQUES, 15th PSCC – Session 41, Liege, 22-26 August 2005.
- [2] ABB, PRODUCT INFORMATION – DISSIPATION FACTOR OVER THE MAIN INSULATION ON HIGH VOLTAGE BUSHINGS, ABB, 2002.
- [3] ABB, PRODUCT INFORMATION – BUSHINGS DIAGNOSTICS AND CONDITIONING, ABB, 2000.
- [4] Tobias Stirl, Raimund Skrzypek, Stefan Tenbohlen, Rummiya Vilaithong, ON-LINE CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS FOR POWER TRANSFORMERS THEIR BUSHINGS, TAP CHANGER AND INSULATION SYSTEM, CMD 2006.
- [5] OMICRON, CPC TD1 UPUTSTVO ZA KORIŠĆENJE – SISTEM VISOKE PRECIZNOSTI ZA ISPITIVANJE IZOLACIJE VISOKONAPONSKIH SISTEMA NA TERENU (ZAJEDNO SA DODACIMA), Omicron electronics, 2005.
- [6] Walter S. Zaengl, DIELECTRIC SPECTROSCOPY IN TIME AND FREQUENCY DOMAIN FOR HV POWER EQUIPMENT (TRANSFORMERS, CABLES, ETC.), 12th Internat. Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2001, Bangalore, India, 20 – 24 August 2001.

Rad je primljen u uredništvo 24. 10. 2008. godine



Siniša Spremić (rođen 15. 9. 1966. godine) studirao u Zagrebu i Novom Sadu, diplomirao na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu 1995. godine. Od 1995. do 1997. godine radio na poslovima kontrole kvaliteta u „Sever” Subotica, od 1997. do 2004. godine na poslovima energetike i upravljanja u Ogranku „ED Subotica” i od 2004. godine na poslovima održavanja ET 110/x kV i 35/x kV u Upravi „Elektrovojvodine”. E-mail: siniša.spremic@ev.rs

Žarko Markov

Tehnički uslovi za telefonsku mrežu Elektroprivrede Srbije

Stručni rad
UDK: 621.395

Rezime:

U radu se istražuje kakav bi trebalo da bude budući oblik tehničkih uslova za telefonsku mrežu elektroprivrede i za opremu od koje se gradi mreža. Brzi razvoj novih tehnika onemogućava da se za ovu opremu postave detaljni tehnički uslovi kao nekada. Zbog toga se predlaže da se skup nepromenljivih tehničkih uslova ubuduće odnosi samo na raspoloživost, privatnost, klimatske uslove, prenaponsku zaštitu i korisničke mogućnosti.

Ključne reči: *tehnički uslovi, elektroprivredna telefonska mreža*

Abstract:

TECHNICAL REQUIREMENT FOR EPS TELEPHONE NETWORK

New technical requirements for EPS telephone network are discussed. Fast development of new technologies makes it impossible to establish detailed technical requirements as before. Instead of classic technical requirements, we propose a reduced set of requirements that comprises availability, privacy, temperature range, overvoltage protection, and user possibilities. These requirements will be the same for all network technologies.

Key words: *technical requirements, telephnone network of power industry*

1. UVOD

Tehnički uslovi (TU) u telekomunikacijama je odomaćeno ime za skup propisa koji se odnose na neki uređaj, telekomunikacionu mrežu ili deo mreže a koji propisuju rad, korišćenje i održavanje. Tehnički uslovi (kao što su [1], [2], [3], [4]) su korišćeni za projektovanje, ispitivanje, atestiranje uređaja i mreže. Njih donosi i održava organizacija – vlasnik mreže. Postupak donošenja tehničkih uslova je uvek složen i dugotrajan jer objedinjuje različita polja kao što su radna svojstva uređaja, tehnološke zahteve, postupke održavanja i skladištenja, klimatske uslo-

ve, itd. Pored ovoga, složenosti i relativno dugom trajanju procesa donošenja TU doprinosi i uključivanje stručne javnosti u ovaj proces.

Vlasnik mreže kroz tehničke uslove ističe osnovnu namenu uređaja ili mreže. Tehnički uslovi uvek imaju vremenski ograničenu važnost. Vreme važenja uslova se skraćuje razvojem tehnologije telekomunikacija.

Jasno je da su ova dva zahteva suprotna:

- da proces donošenja TU bude ozbiljan tj. dugotrajan i
- da se putem TU obezbede nova tehnološka rešenja tj. zahtev za sve češćim menjanjem TU.

Dr Žarko Markov, vanr. prof. – Iritel, 11 080 Zemun, Batajnički put 23

Zbog toga se postavlja pitanje: da li mogu postojati adekvatni TU u uslovima čestih tehnoloških promena? U ovom kratkom radu će se potražiti odgovor na ovo pitanje u slučaju telefonskih centrala za elektroprivrednu telefonsku mrežu, EATC.

2. O STRUKTURI TEHNIČKIH USLOVA ZA EATC

Tehnički uslovi za elektroprivredne telefonske centrale EATC (skraćenica od *Elektroprivredne Automatske Telefonske Centrale*), [1], [2], po nameni i strukturi liče na TU za slične uređaje tj. za centrale javne mreže, [4], i korporacijske (pretplatničke, privatne) centrale, [5], [6]. Struktura klasičnih TU se sastoji od više delova, od kojih po jedan deo:

- 1 – propisuje namenu uređaja,
- 2 – opisuje mrežu,
- 3 – propisuje korisničke mogućnosti,
- 4 – opisuje korisničke priključke i interfejs,
- 5 – opisuje mrežne veze i interfejs,
- 6 – propisuje numeraciju u mreži,
- 7 – propisuje korisničku i mrežnu signalizaciju,
- 8 – propisuje saobraćajne mogućnosti korisnika, mreže i pojedinih organa,
- 9 – propisuje zaštitu privatnosti mreže,
- 10 – propisuje otpornost na prenaponske smetnje,
- 11 – propisuje vrstu napajanja,
- 12 – propisuje raspoloživost, tj. najkraće srednje vreme između kvarova i najduže srednje vreme popravki,
- 13 – propisuje postupak atestiranja i merenja svojstvenih veličina,
- 14 – propisuje prostoriju za smeštaj opreme, osvetljenje i klimatske uslove rada,
- 15 – propisuje skladištenje uređaja,
- 16 – opisuje rezervne delove, instrumente za kontrolu i merenje i alat,
- 17 – opisuje promenu kapaciteta uređaja tj. proširenja,
- 18 – propisuje povezivanje sa postojećim elementima mreže,
- 19 – propisuje transportne uslove,
- 20 – propisuje postupke u slučaju kvara,
- 21 – propisuje oblik i sastav ponude proizvođača.

U daljem tekstu će biti reči o tome kako razvoj novih tehnologija različito utiče na pojedine delove TU.

3. ATESTIRANJE

Osnovna namena postupka atestiranja uređaja je da se utvrdi da li je uređaj pogodan da se ugradi u mrežu. Atestiranje se izvodi za jedan tip uređaja i,

posle uspešnog ispitivanja, se izdaje atestna potvrda. Osnovu za atestna ispitivanja čine tehnički uslovi. Postupak atestiranja opreme za elektroprivrednu mrežu se, u načelu, sastoji od laboratorijskog i pogonskog ispitivanja.

Laboratorijskim ispitivanjem se mogu proveravati mogućnosti centrale i izvršiti merenja pojedinih svojstava. Neka od ovih merenja je, praktično, nemoguće izvršiti u stvarnom radu. Primer ovakvog merenja i provere je merenje propusnosti upravljačkog organa tj. centralnog procesora centrale. Ovo merenje se vrši proizvodnjom telefonskih poziva simulatorom, pa je jasno da ovakve provere u stvarnom radu teško mogu da se izvedu.

Pogonsko ispitivanje centrale se vrši radi provere svojstava centrale koja se ne mogu simulirati u laboratoriji. Primer za ovo su prenaponske smetnje u elektroenergetskim objektima u kojima je smeštena telekomunikaciona oprema. Samo se, dakle, u energetskom objektu može izvršiti prava provera rada telekomunikacione opreme u prisustvu prenaponskih smetnji. Vremenski interval pogonskog ispitivanja treba da je dovoljno dug (bar šest meseci, na primer) da bi se telekomunikaciona oprema ispitala u svim kritičnim uslovima kao što su velika opterećenja energetskog sistema (zima) i uticaj atmosferskih pražnjenja (leto).

4. POSTOJEĆI TEHNIČKI USLOVI ZA EATC

Postojeći tehnički uslovi su skup normi koje treba da zadovolji EATC da bi mogla biti ugrađena u elektroprivrednu telefonsku mrežu. Tehnički uslovi se, u gruboj podeli, mogu podeliti na:

- grupu načelnih uslova
- grupu konkretnih uslova koje je potrebno zadovoljiti u jednom vremenskom intervalu i
- grupu uslova koji su vezani za pojedina tehnološka rešenja.

4.1. Načelni uslovi su oni koji se odnose na raspoloživost, privatnost i funkcionalne mogućnosti.

Raspoloživost je verovatnoća da se, u slučajnom trenutku, mrežom može preneti kvalitetni telefonski signal. Visoka raspoloživost elektroprivredne telefonske mreže je svojstvo zbog kojega se gradi ova mreža. Uslovi koji određuju raspoloživost moraju biti zadovoljeni bez obzira na tehnologiju izgradnje telefonske mreže elektroprivrede. Osnovno načelo da energetski objekat nikad ne može ostati bez telefonske veze sa mrežom, koje je važno u prvoj mreži, mora ostati u važnosti i u svim sledećim mrežama. Ovo pravilo se izražava kroz stav da, pri

obnavljanju mreže, nova mreža ne može imati manju raspoloživost od prethodne. U uslove koji se tiču raspoloživosti mogu se ubrojati i uslovi koji se odnose na napajanje, radnu temperaturu i prenaponsku zaštitu.

Privatnost elektroprivredne telefonske mreže znači da njoj ne mogu pristupiti neovlašćeni korisnici. Ovaj uslov se u staroj mreži lako ispunjavao korićenjem posredovanih telefonskih veza iz javne mreže. Korišćenje internetske i mobilne telefonije donosi složeniji pristup zadovoljenju ovog uslova.

Funkcionalne mogućnosti u elektroprivrednoj mreži su vezane za brže ostvarivanje telefonskih veza operativne telefonije. Primeri ovih mogućnosti su brzo i prioritarno ostvarivanje operativnih poziva, poprečne veze.

4.2. Uslovi koji su vezani za jedan period vremena se odnose na adresiranje (numeraciju), signalizaciju i specijalizovani komandno telefonski posrednički uređaj (KTP).

Numeracija i upućivanje poziva koje je vezano za numeraciju su vrlo važni elementi mreže. Za **numeraciju** se ne mogu odrediti svi detalji koji će važiti u mrežama svih tehnoloških generacija. Primer 1: u sadašnjoj mreži sve mrežne tačke imaju svoj karakteristični telefonski broj dok u paketskoj mreži neke mrežne tačke imaju samo svoju IP adresu ali ne i svoj telefonski broj. Primer 2: u sadašnjoj mreži korisnici se biraju pozivnim brojevima (otuda termin *numeracija*) a u nekim novim mrežama biranje može da bude obavljano nekim drugim adresama (kao što je *e-mail* adresa) ili, možda u daljoj budućnosti, glasom. Zbog toga će termin *numeracija* postajati sve češće *adresiranje*. Jasno je da TU koji kaže da je numeracija šestocifrena, četvorocifrena ili zatvorenog tipa može da bude vezan samo za neka tehnološka rešenja.

Sadašnji stavovi TU koji se odnose na apsorpciju i prevođenje cifara se mogu u budućim mrežama prevesti u uslove koji važe za korisničke mogućnosti vezane za skraćeno biranje i preusmeravanje poziva.

Usvojena tj. važeća numeracija u mreži se mora poštovati ali se dogovorom može promeniti. Načela koja mora da zadovolji svaki sistem numeracije tj. adresiranja su jednoznačnost, delotvornost, omogućavanje delotvornog upućivanja poziva, rad sa susednim mrežama. Prilikom promene numeracije ova promena se mora izvršiti u celoj mreži i u što kraćem vremenskom intervalu.

Upućivanje poziva se takođe može samo načelno odrediti u TU. Primer 1: stavovi TU o upućivanju posle prve, druge, itd. cifre već u paketskim

mrežama nemaju smisla jer se upućivanje ne vrši na osnovu izabranih cifara već na osnovu IP adresa. Primer 2: određivanje najvećeg broj tranzitnih tačka za jednu vezu takođe gubi smisao pošto se u novim mrežama putevi signalne informacije i govornog signala razlikuju.

Za upućivanje poziva kroz elektroprivrednu mrežu se može odrediti broj obilaznih (alternativnih) upućivanja, kao uslov koji doprinosi raspoloživosti veza.

Signalizacija je u klasičnim tehničkim uslovima propisivana i za korisnike i za mrežu. U novim mrežama se pojavljuje više korisničkih i mrežnih signalizacija tako da je propisivanje vrste signalizacije vrlo delikatno.

KTP je u klasičnim centralama bio sklop koji je imao dosta strogo propisana svojstva. U novim mrežama se neka od tih svojstava ne mogu ostvariti (rezervacija govornog kanala, na primer).

4.3. Uslovi koji se odnose na tehnološka rešenja su oni koji se odnose na priključke i elektromehanička svojstva.

Primeri za ove uslove su oni koji se odnose na tastere, preklopnike, svetleće lampe kojih u savremenim centralama ne mora ni biti.

5. TEHNIČKI USLOVI I PROMENA TEHNOLOGIJE

Kao što se može i naslutiti, promena važenja i primenljivosti pojedinih tehničkih uslova se sa promenom tehnologije različito menja.

Načelni tehnički uslovi iz odeljka 4.1. ostaju u važnosti za svaku elektroprivrednu telefonsku mrežu, bez obzira na tehnologiju u kojoj je izgrađena.

Tehnički uslovi iz odeljka 4.2. se mogu, ali ne moraju, menjati sa promenom tehnologije. Tačnije rečeno, uslovi iz ove grupe će se menjati samo ako to zahteva zadovoljenje uslova iz grupe načelnih tehničkih uslova. Primer: signalizacija će se menjati ako doprinosi delotvornijem ostvarivanju operativnih veza. (Primer: savremene signalizacije omogućavaju identifikaciju pozivajućeg što, automatski, može povećati prioritet operativnih poziva.)

Mnogi tehnički uslovi iz grupe 4.3. gube smisao. Tako je, na primer, uslov da „sila za aktiviranje tastera treba da bude između 1N i 10N”, [2], potpuno zastareo kod savremenih centrala koje su bez tastera.

6. NAČELNI TEHNIČKI USLOVI

Kao što se iz prethodnog kratkog opisa tehničkih uslova za EATC može videti, jedino su načelni

tehnički uslovi oni koji važe za svaku mrežu i čine osnovu prema kojoj se gradi elektroprivredna telefonska mreža. Pozabavimo se detaljnije ovim tehničkim uslovima:

– **Raspoloživost (Availability, A) je osnovno svojstvo EATC koje se propisuje za rad u elektroprivrednoj mreži.** U klasičnim TU bilo je uobičajeno da se raspoloživost propisuje za centralu tj. za one njene delove čiji kvar može da izazove havarijski kvar centrale: upravljački organ i izvor napajanja sa sistemom hlađenja. Uobičajeno je, takođe, bilo da se za raspoloživost zahteva vrednost $A \geq 0,999\ 99$ tj. vrednost veća ili jednaka „pet devetki”, što je značilo da će ukupno vreme neispravnosti centrale u toku godine biti najviše 5,3 minuta. Za ispravan rad centrale je potrebno da svi centralni organi rade ispravno. To znači da raspoloživost ovih centralnih organa centrale mora biti veća od pet devetki.

U savremenim telefonskim mrežama, zasnovanim na paketskoj tehnici, se raspoloživost mrežnog čvora ne može propisati kao u slučaju klasičnog telefonskog mrežnog čvora tj. centrale. Razlog je taj što je često upravljanje centralizovano za mrežu ili deo mreže tako da se TU za raspoloživost moraju odrediti na drugi način. U [7] se raspoloživost određuje za celu telefonsku vezu.

Na slici 1. je prikazana jedna paketska telefonska veza u mreži sa centralizovanim upravljačkim organom (UO). (Jasno je da UO u pogledu raspoloživosti predstavlja redno vezani elemenat u mreži.)

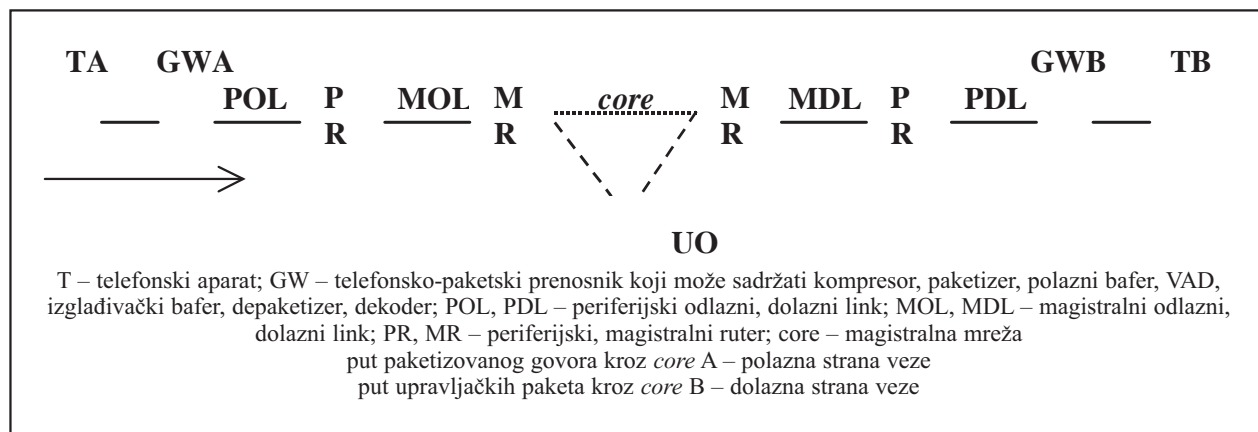
Sa slike 1. je jasno da se tražena raspoloživost veze od pet devetki teško može ostvariti ukoliko pojedini elementi nisu udvostručeni. Zbog toga je uobičajeno da se svi elementi, sem korisničkih (T i GW) moraju (bar) udvostručavati a mreža graditi sa okolnim upućivanjem.

Može se, dakle, reći da se TU koji se odnose na raspoloživost savremenih paketskih telefonskih mreža menjaju po svojoj suštini: umesto na centrale oni se odnose na veze i arhitekturu mreže.

– **Privatnost elektroprivredne telefonske mreže je druga važna osobina zbog koje se ova mreža gradi kao privatna.** Privatnost mreže je važna zbog tajnosti korporacijskih poslovnih informacija i zbog zaštite od preopterećenja u novim mrežama. Naime, savremene paketske telefonske mreže se ostvaruju preko paketske mreže koja pored telefonske usluge pruža i ostale telekomunikacione usluge. Za razliku od klasičnih mreža, u savremenim paketskim mrežama, nekontrolisane usluge (Internet, podaci, video) mogu ugroziti kvalitet prenošenog paketskog telefonskog signala. Zbog toga je veoma važno da se korporacijskoj mreži dozvoli samo pristup ovlašćenim korisnicima. TU za nove mreže moraju da budu postavljeni i u vezi privatnosti, jer se samo na taj način može pouzdano proračunati saobraćajno opterećenje tj. garantovati kvalitet prenošenja paketizovanih telefonskih signala.

– **Temperaturni uslovi su oni koje mora da zadovolji oprema bez obzira u kojoj tehnici je izrađena.** TU za temperaturnu izdržljivost moraju davati radni temperaturni opseg u objektu gde je smeštena oprema. Ukoliko sama oprema ne zadovoljava ove uslove, već zahteva uređaje za klimatizaciju, tada oprema i uređaji za klimatizaciju moraju zadovoljavati TU za pouzdanost iz odeljka 6.1.

– **Uslovi za prenaponsku zaštitu su stroži nego isti za opremu u javnim telekomunikacionim mrežama, [8].** Uzroci ovoga su očigledni: oprema je bliža izvorima prenapona a same prenaponske



Slika 1.

smetnje su znatno češće nego kada se govori o opremi u javnim mrežama. Problem prenaponske zaštite je znatno ozbiljniji danas nego u ranijim vremenima zbog dva razloga:

- savremenija oprema je i osetljivija na prenaponske smetnje i elektroprivredna telekomunikaciona mreža se sve više gradi od opreme namenjene javnim mrežama.

U ranijim vremenima, elektroprivredna telekomunikaciona mreža je građena od specijalizovanih uređaja koji su razvijani za ovu primenu. Ovi uređaji su, pored ostalog, imali i povećanu otpornost na prenaponske smetnje. Korišćenju opreme namenjene javnoj mreži u energetskim objektima treba da prethode dobri TU u pogledu otpornosti na prenapone i obavezno pogonsko ispitivanje.

– Neophodne funkcionalne mogućnosti u pogledu telefonskih poziva treba da budu predmet TU.

Za razliku od javne mreže gde ove mogućnosti služe povećanju prihoda vlasnika mreže, u elektroprivrednoj mreži korisničke mogućnosti moraju služiti povećanju raspoloživosti i brzine ostvarenja veza kao i davanja prednosti operativnom saobraćaju.

Primer korisničke mogućnosti koja povećava raspoloživost je mogućnost preusmeravanja poziva u svim slučajevima nedostupnosti traženog (*Call Forwarding Unconditional, CFU*, [9]),

Primer mogućnosti koja ubrzava biranje je prolazno biranje iz javne mreže (*Direct-Dialling-In, DDI*, [10]).

Primer korisničke mogućnosti koja omogućava ostvarivanje prednosti operativnog saobraćaja je identifikacija pozivajućeg (*Calling Line Identification Presentation, CLIP*, [11]).

7. ZAKLJUČAK

Kao što se iz prethodnog kratkog izlaganja vidi, klasični tehnički uslovi koji detaljno propisuju sva

svojstva opreme za elektroprivrednu mrežu više nemaju smisla. Naime, tehnološke promene se dešavaju za sve kraće vreme tako da ih je nemoguće pratiti kroz tehničke uslove. Ako međunarodne norme smatramo svojevrsnim tehničkim uslovima za opremu, vidimo da i u toj oblasti razvoj, proizvodnja i upotreba nove opreme prednjače usvajanju normi za istu opremu.

Tehnički uslovi se, u današnje vreme, podižu na viši nivo, tj. propisuju se dve vrste svojstava. Prva su ona osnovna svojstva koja važe za mrežu bez obzira na tehnologiju gradnje mreže. To su tzv. načelni tehnički uslovi i oni se odnose na: raspoloživost mreže, privatnost mreže, klimatske uslove, prenaponsku zaštitu i korisničke mogućnosti.

Druga vrsta svojstava su ona koja će važiti u sledećem periodu vremena za mrežu jedne tehnološke generacije kao što je to, na primer, adresiranje.

8. LITERATURA

- [1] TEHNIČKI USLOVI ZA TELEFONSKU AUTOMATIKU, JUGEL, 1969.
- [2] TEHNIČKI USLOVI ZA ELEKTROPRIVREDNE TELEFONSKE CENTRALE, JUGEL, 1985.
- [3] TEHNIČKI USLOVI ZA VISOKOFREKVENTNE VEZE PO VODOVIMA VISOKOG NAPONA, JUGEL, 1969.
- [4] TEHNIČKI USLOVI ZA ANALOGNE I DIGITALNE TELEFONSKE CENTRALE, ZJPTT, 1991.
- [5] ZBIRKA PROPISA IZ OBLASTI PRETPLATNIČKIH UREĐAJA I APARATA, ZJPTT, 1988.
- [6] ZBIRKA PROPISA IZ OBLASTI PRETPLATNIČKIH UREĐAJA I APARATA, ZJPTT, 1997.
- [7] CISCO SYSTEMS: IP Telephony: The Five Nines Story, White paper
- [8] ITU-T Recommendation K.20, K21, K22.
- [9] ITU-T Recommendation I.252.4
- [10] ITU-T Recommendation I.251.1
- [11] ITU-T Recommendation I.251.3

Rad je primljen u uredništvo 03. 10. 2008. godine



Žarko Markov rođen 1946. godine. Diplomirao 1969, magistrirao 1975. godine i doktorirao 1976. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Radi u Iritelu na razvoju i proizvodnji telefonskih centrala za elektroprivrednu telefonsku mrežu (videti: www.iritel.com/english/products/products.html). Autor nekoliko desetina radova objavljenih u zemlji i inostranstvu, od kojih se petnaestak odnosi na elektroprivrednu telefoniju. Učestvovao u izradi Tehničkih uslova za elektroprivredne telefonske centrale i u projektima digitalne telefonske mreže EPS-a. Objavio nekoliko knjiga i udžbenika. Ima naučno zvanje naučnog savetnika i nastavno zvanje vanrednog profesora. Dobitnik nagrade za elektroniku iz fonda „Prof. Branko Raković” za 1997. godinu.

Distribucija električne energije – rešeni primeri

*Autori: T. Bojković, M. Tanasković, D. Perić
Izdavač: Akademska misao, Beograd, 2009.*

Recenzija: dr Jovan Nahman

OPŠTI PODACI

Knjiga ima 295 stranica teksta sa slikama, tabelama i priložima. Materija je podeljena u 6 glava sa spiskovima referenci na kraju svake glave. Bibliografski podaci obuhvataju inostrane i domaće knjige i članke, odgovarajuću tehničku regulativu i pojedine studije i projekte rađene u razmatranim oblastima.

ANALIZA RUKOPISA

U 1. Glavi prikazuju se proračuni vezani za izbor karakteristika energetskih transformatora s obzirom na dozvoljene struje kratkih spojeva u postrojenjima različitih distributivnih naponskih nivoa. Daju se primeri izbora regulacionih opsega transformatora. Posebno se detaljno prikazuju načini proračuna opterećenja transformatora u karakterističnim vremenskim periodima radi pravilnog izbora instalisane snage. Pored navedenog, pokazuje se način izbora zaštite transformatora od struja kratkog spoja i preopterećenja, kao i zaštite od prenapona.

Predmet razmatranja u 2. Glavi su proračuni u vezi sa izborom i projektovanjem nadzemnih vodova i kablova napona 1 kV, 10 kV i 20 kV uključujući i samonosive kablove koji se sve više koriste u današnjim distributivnim mrežama. Detaljno se prikazuju primeri proračuna stubova različitog tipa sa različitim vrstama i rasporedom provodnika na glavi stuba. Takođe se na nizu primera pokazuje način proračuna ugiba i mehaničkog opterećenja provodnika vodova sa krutim i lančastim izolatorima, kao i način određivanja sile zatezanja pri montaži provodnika. Posebno se razmatra postavljanje telekomunikacionih kablova (TK) na stubove nadzemnih vodova. Značajan deo ove Glave posvećen je pri-

merima proračuna toplotnih opterećenja distributivnih kablova različitih naponskih nivoa i konstrukcija uključujući kablove 110 kV kojima se napajaju distributivne transformatorske stanice (TS). Razmatraju se toplotna narezanja u normalnom letnjem i zimskom pogonu i naprezanja kod kratkih spojeva.

U 3. Glavi se, preko velikog broja tipičnih brojnih primera, prikazuju proračuni kojima se utvrđuju potrebni uslovi za priključenje malih elektrana (ME) na distributivnu mrežu. Pokazuje se način provere dozvoljene snage ME, prisustva flikera i viših harmonika, kao i uticaja na snage kratkog spoja. Takođe se daju primeri izbora snage vetroturbin i pripadajućeg generatora s obzirom na dijagram brzine vetra. Posebno se razmatraju okolnosti koji se imaju u oblastima sa „košavskim” vrstama vetra, kojih ima dosta na teritoriji Srbije.

Proračunima sistema uzemljenja distributivnih postrojenja i mreža posvećena je 4. Glava. Odabranim primerima prikazuje se način proračuna redukcioni faktora nadzemnih vodova i kablova, način provere uslova bezbednosti kod TS 10 (20) kV/ 0,4 kV i izbor uzemljivača ovih TS. Posebno su obrađeni slučajevi sa različitim vrstama napojnih vodova i načinima uzemljenja zvezdišta distributivne mreže. Dato je nekoliko primera izračunavanja izlazećeg potencijala iz izvorne TS kod različitih vrsta napojnih kablova. Pored navedenog, prikazan je i način proračuna i izbora uzemljenja stubova nadzemnih vodova sa tipskom konstrukcijom temelja.

Glava 5. bavi se problematikom pouzdanosti distributivnih sistema i procenama šteta usled prekida isporuke električne energije. Prikazuje se način određivanja osnovnih pokazatelja pouzdanosti elemenata sistema iz pogonskih podataka i primena

radnih tabela u tim proračunima. Na karakterističnim primerima prikazuje se tablična metoda za proračune pouzdanosti postrojenja i analizira uticaj različitih rešenja na pokazatelje pouzdanosti. Nekoliko zadataka se bavi procenom pouzdanosti distributivnih vodova sa različitim brojem prolaznih potrošačkih TS. Na dobro izabranim primerima pokazano je kako primena automatskih uređaja različite vrste i njihov razmeštaj utiču na pokazatelje pouzdanosti karakterističnih sistema napajanja potrošača.

Zadaci iz oblasti planiranja razvoja i izgradnje distributivnih sistema obrađuju se u 6. Glavi. Pokazuje se kako se proračunavaju vršne snage domaćinstava sa različitim načinima grejanja i jednovremene snage grupa potrošača. Ovakvi se proračuni rade za niskonaponske izvode, TS X kV/0,4 kV, stambena naselja i mreže i postrojenja viših distributivnih napona. Prikazuje se primena metoda za prognozu potrošnje električne energije i aktivnih vršnih snaga.

U Prilozima dati su tabelarno i grafički podaci o elementima postrojenja i mreža koji se koriste kod različitih proračuna urađenih u prethodnom tekstu.

ZAKLJUČAK I PREDLOG

Rukopis preko karakterističnih praktičnih primera pokazuje kako treba raditi pojedine važne proračune u sklopu izgradnje i eksploatacije distributivnih sistema. Ova zbirka zadataka uspešno prikazuje primenu metoda i postupaka izloženih u knjizi „Distribucija električne energije” od istih autora. Kao takva ona doprinosi boljem razumevanju materije u pomenutoj knjizi i omogućava zainteresovanom čitaocu da stekne predstave o vrednostima pojedinih veličina i parametara koja je od izuzetne važnosti u obrazovanju inženjera.

S obzirom na prethodno, preporučujem da se predmetna zbirka problema štampa kao knjiga. Ona će značajno doprineti boljem razumevanju složene problematike sistema za distribuciju električne energije i pomoći studentima i inženjerima elektrotehnike u sticanju novih znanja i osposobljavanju za rešavanje problema sa kojima će se sretati u praksi.

Beograd, 22. 1. 2009. godine

Recenzija: prof. dr Dragan Tasić

OPŠTI PODACI

Distribucija električne energije predstavlja jedan od četiri podsistema u hijerarhijskoj strukturi elektroenergetskog sistema. Uloga distributivnih mreža, odnosno distributivnog podsistema je da omogući transport električne energije od distributivnih podstanica (koje napaja prenosna mreža) do potrošača električne energije. S obzirom na to da je reč o izuzetno važnoj problematici to je značajna svaka pojava nove zbirke koja kroz odgovarajuće primere omogućava lakše razumevanje navedene problematike. Zbirka zadataka autora dipl. inž. Tomislava Bojkovića, dr Miladina Tanaskovića i dr Dragoslava Perića upravo kroz odabrane primere doprinosi jednostavnijem razumevanju problematike distribucije električne energije. Materija je izložena na 295 stranica teksta sa slikama, tabelama i prilozima. Podeljena u je 6 poglavlja. Na kraju svakog poglavlja dat je spisak korišćene literature.

ANALIZA RUKOPISA

U prvom poglavlju se obrađuje izbor karakteristika energetske transformatora s obzirom na dozvoljene struje (snage) kratkih spojeva u postrojenjima različitih naponskih nivoa, kao i sa aspekta regu-

lacije napona. Razmatrana je i opteretljivost transformatora za trajni i prinudni pogon i uticaj opterećenja na životni vek transformatora. Pored toga, u ovom poglavlju je obrađena i problematika zaštite transformatora od kratkog spoja, preopterećenja i prenapona.

Drugo poglavlje je posvećeno problematici izbora karakteristika distributivnih vodova. Veliki deo ovog poglavlja bavi se mehaničkim proračunom nadzemnih vodova. Kroz brojne primere dat je proračun sila koje deluju na stablo stuba, način izbora temelja, proračun ugiba i zatezanja provodnika, proračun razmaka između provodnika i izbor konzola. Pored razmatranja Al/č provodnika, tretirani su i vodovi sa slaboizolovanim provodnicima. Kroz određene primere razmatrano je postavljanje telekomunikacionih i optičkih kablova na stubove nadzemnih distributivnih vodova. Značajan deo ovog poglavlja posvećen je termičkim aspektima nadzemnih i kablovskih vodova različitih naponskih nivoa. Obrađena su dozvoljena strujna opterećenja u trajnom pogonu, u letnjem i zimskom periodu, kao i u režimu kratkog spoja.

Treće poglavlje obrađuje problematiku malih elektrana u distributivnoj mreži. Izvršena je, kroz odgovarajuće primere, analiza kriterijuma za pri-

ključenje malih elektrana na distributivnu mrežu: provera dozvoljene snage male elektrane, provera prisustva flikera i viših harmonika, kao i provera na snagu kratkog spoja. Dati su i primeri gde se pokazuje izbor snage malih hidroelektrana i vetroturbina i pripadajućih generatora.

Predmet razmatranja u četvrtoj glavi su uzemljenja distributivnih postrojenja. Dati su, pogodno odabrani, primeri proračuna: redukcionog faktora kablovskih i nadzemnih vodova, dimenzionisanja uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV/kV i TS 35/10 kV/kV uz uvažavanje bezbednosnih uslova, iznošenja potencijala i dimenzionisanja uzemljivača stubova. Kod dimenzionisanja uzemljivača transformatorskih stanica obrađeni su slučajevi sa različitim napojnim vodovima i načinima uzemljenja zvezdišta distributivne mreže. Iznošenje potencijala razmatrano je za kablove tipa NPO 13-A i XHE 49-A. Pri dimezionisanju uzemljivača stubova analizirana je i granična vrednost struje zemljospoja u izolovanoj mreži s obzirom na dozvoljeni napon dodira.

U petom poglavlju je razmatrana problematika pouzdanosti distributivnih mreža i procena šteta usled neisporučene električne energije potrošačima. Prikazan je način proračuna osnovnih pokazatelja pouzdanosti elemenata sistema na osnovu pogonskih podataka, kao i primena radnih tabela. Odabranim primerima pokazan je način proračuna pouzdanosti distributivnih postrojenja i distributivnih vodova. Značajna pažnja je posvećena određivanju pouzdanosti u automatizovanim gradskim i vangradskim srednjenaponskim mrežama.

Šesto poglavlje se bavi aspektima planiranja razvoja i izgradnje distributivnih mreža. Prikazani su načini proračuna vršne snage i maksimalnog jednovremenog opterećenja domaćinstava, niskona-

ponskog (NN) izvoda i naselja. Razmatrane su mogućnosti opterećenja transformatora u normalnom i havarijskom pogonu i načini rezerviranja u distributivnoj mreži. Pored navedenog, prikazana je i primena metoda za prognozu potrošnje električne energije i vršne snage.

U Prilozima su data 35 priloga, gde su tabelarno i grafički prikazani podaci o elementima mreža, koji se koriste za različite proračune urađene u zbirci.

ZAKLJUČAK I PREDLOG

Primeri u zbirci su tako odabrani da čitaoca uvođe u problematiku izgradnje i eksploatacije distributivnih mreža, ukazujući na načine pojedinih veoma važnih proračuna. Izlaganje je jasno i koncizno, a rešenja su data sa svim detaljima. Zbirka je u potpunosti usaglašena sa materijom izloženom u knjizi „Distribucija električne energije” od istih autora i doprinosi boljem razumevanju materije izložene u navedenoj knjizi. Ona može biti od koristi kako studentima elektroenergetike, tako i inženjerima koji se u svom radu bave navedenom problematikom.

Zadovoljstvo recenzenta je da istakne veoma korektnu saradnju sa autorima zbirke, u pogledu respektovanja iznetih primedbi i sugestija tokom recenziranja, a koje su prvenstveno bile u funkciji daljeg povećanja kvaliteta (koji nije sporan) predmetne zbirke.

Na osnovu svega izloženog, recenzent predlaže da se rukopis pod naslovom „Distribucija električne energije-rešeni primeri” autora dipl. inž. Tomislava Bojkovića, dr Miladina Tanaskovića i dr Dragoslava Perića publikuje kao zbirka rešenih zadataka.

U Nišu, 2. 2. 2009. godine

Nadzor i dijagnostika tehničkih sistema

*Autori: dr Ranko Antunović, docent
Izdavač: Grafomokerc, Trebinje, 2009.*

Recenzija: dr dr hc Života Živković, red. prof.

Autor knjige, u šest poglavlja, opisuje karakteristične tehničke sisteme, koristeći pritom njihove mehaničke modele i veliki broj crteža i ilustracija. Knjiga osim toga sadrži uvod, bogat spisak literature, nomenklaturu reči i skraćenica kao i dva dodatka: PRIMJERI DIJAGNOSTIČKIH ANALIZA IZ PRAKSE I PREGLED NORMI I STANDARDA IZ OBLASTI NADZORA VIBRACIJA.

Autor znanlčki gradi strukturu knjige i sistematski uvodi čitaoca u osnovne zadatke nadzora i dijagnostike. Posle uvoda u naslovnu problematiku, u prvom poglavlju su opisani merni parametri nadzora, u drugom su prikazane metode tehničke dijagnostike, autor u trećem poglavlju analizira uzroke neispravnosti tehničkih sistema a u četvrtom prikazuje merno-nadzorni dijagnostički lanac.

Peto poglavlje predstavlja najvredniji deo ove knjige. Autor, koji i predhodna poglavlja obogaćuje

sopstvenim doprinosom, u ovom poglavlju predstavlja originalni pristup izboru optimalnog modela vibrodijagnostike, postavke problema optimizacije, vrednosti funkcije postavljenog cilja i definisanju vibrodijagnostičkog modela.

U šestom poglavlju govori se o automatizaciji tehničke dijagnostike, prikazani su ekspertni sistemi u oblasti vibrodijagnostike, njihova arhitektura kao i ADVIZOR.

Knjiga „Nadzor i dijagnostika tehničkih sistema”, autora Ranka Antunovića, predstavlja korisnu literaturu svima koji žele da se bave ovom oblašću, pre svega studentima, a dodaci na kraju je čine i veoma upotrebljivom u praksi.

Preporučujem izdavaču da odobri štampanje ove knjige.

Recenzija: red. prof. Aleksandar Veg

Predmetna knjiga obrađuje tematiku primenjenih dijagnostičkih metoda.

Kroz šest poglavlja opisana su karakteristična mašinska postrojenja, dati su odgovarajući mehanički modeli, izdvojene kritične tačke sistema i preporučeni sistemi nadzora i dijagnostičke metode za postizanje pune raspoloživosti i pouzdanosti postrojenja.

Jedno poglavlje knjige, pod naslovom „Optimalni vibrodijagnostički model”, predstavlja separat iz doktorske teze autora.

Ovim se širem krugu tehničke javnosti omogućuje uvid u originalni doprinos autora disciplini tehničke dijagnostike.

Knjiga obiluje ilustracijama, detaljnim opisima i neophodnim teorijskim objašnjenjima za potpuno razumevanje obrađene tematike.

Shodno iznesenim ocenama predlažem Izdavaču da se knjiga pod naslovom: „Nadzor i dijagnostika tehničkih sistema”, autora Ranka Antunovića prihvati za štampu.

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

Kriterijumi za kategorizaciju radova u stručnom časopisu „Elektroprivreda”

ORIGINALNI NAUČNI RAD

U ovu kategoriju svrstavaju se radovi, koji sadrže originalne rezultate istraživanja, interesantne za širi krug stručnjaka u području koje je predmet rada. Primena dobijenih rezultata treba da bude prikazana na realnim primerima iz inženjerske prakse. Ovi radovi treba da su napisani tako, da je na osnovu izloženih sadržaja i informacija, moguće praktično primeniti saopštene rezultate i proveriti urađene primere.

PRETHODNO SAOPŠTENJE

Kao prethodno saopštenje svrstava se rad koji sadrži elemente originalnosti, ali koji nisu dovoljni da bi se rad mogao smatrati u potpunosti originalnim naučnim radom iz jednog ili više navedenih razloga:

- doprinosi su manjeg značaja*
- nisu obuhvaćeni neki od značajnih činilaca*
- nema primene na realnom primeru*
- rešenje nije realizovano (kada je reč o novom uređaju, mernoj metodi ili objektu)*

PREGLEDNI RAD

Ovi radovi sadrže celoviti prikaz stanja i tendencija razvoja pojedinih oblasti nauke i tehnologije. Radovi ove kategorije obavezno sadrže kritički osvrt i ocenu onoga što je razmatrano. Citirana literatura u radu treba da bude dovoljno obuhvatna, kako bi se na osnovu nje omogućio što širi i bolji uvid u predmetne sadržaja. Obavezno je citiranje relevantnih referenci autora, koje se odnose na razmatranu problematiku, čime se potvrđuje kompetentnost sa pisanje radova iz ove kategorije. Ukupan broj razmatranih citata ne bi trebalo da bude manji od 15 i trebalo bi pretežno da bude iz vodećih svetskih publikacija.

STRUČNI RAD

Ovi radovi mogu da sadrže prikaz rešenja nekog uređaja, sklopa ili instrumenta koje je originalno u domaćim uslovima, kao i prikaz značajnih praktičnih realizacija, projekata, studijskih analiza i sl. Radovi ove kategorije mogu da sadrže doprinose primeni poznatih metoda i naučnih rezultata i njihovom prilagođenju potrebama aktuelne prakse.

REDAKCIJA
časopisa „Elektroprivreda”



AKCIONARSKO DRUŠTVO PRENOS
– PODGORICA

Elektroprivreda

Elektroprivreda

Ministarstvo elektroprivrede FNRJ

BILTEN

Biro-a za unapredjenje proizvodnje

God. I br. 1

Izdavač: Ministarstvo elektroprivrede FNRJ – Biro za unapredjenje proizvodnje.

Uredjuje redakcioni odbor, odgovorni urednik: **Ing. Herman Mates.**

Uredništvo: Beograd, Bulevar Vojvode Mišića 41, tel. 50-831, lok. 153.

Oktoбар 1948 god.

ELEKTROPRIVREDA