

Godina
Year

LIV

Oktober-December
October-December

Broj
No.

4

Sadržaj	Strana Page	Content
		<i>Branislav Đorđević</i>
PRILOG OBJEKTIVNIJEM VREDNOVANJU OBNOVLJIVIH ENERGIJA (I)	3	A CONTRIBUTION TOWARDS A MORE OBJECTIVE EVALUATION OF RENEWABLE RESOURCES (I)
		<i>Veselin Ilić, Milenko Đurić, Aleksandar Čukarić</i>
TESTIRANJE ALGORITMA ZA DETEKCIJU KRATKIH SPOJEVA U SEKUNDARU MONOFAZNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA POMOĆU LABORATORIJSKIH SNIMAKA KVAROVA	15	TESTING OF ALGORITHM FOR SHORT CIRCUIT DETECTION IN MONOPHASE POWER TRANSFORMER SECONDARY BY MEANS OF LABORATORY RECORDS OF FAULTS
		<i>Tomislav Milanov</i>
PRORAČUNI SIMETRIČNIH TROPOLNIH STRUJA KVARA U ELEKTRODISTRIBUTIVNIM I PRENOSNIM MREŽAMA NA KONZUMU JP "ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD"	25	CALCULATIONS OF SYMMETRICAL THREE-POLE FAULTY CURRENT IN POWER DISTRIBUTION AND TRANSMISSION NETWORKS SUPPLIED BY "JP ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD"
		<i>Mirko Ivković</i>
STANJE ISTRAŽENOSTI I OCENA AKTIVIRANJA REZERVI UGLJA LEŽIŠTA "MELNICA"	32	STATUS OF PERFORMED RESEARCH WORK AND ESTIMATE OF ACTIVATION OF COAL DEPOSITS OF MELNICA
		<i>Budimir Rošić, Nikola Ćuk, Milan Petrović</i>
PROGRAMSKI SISTEM ZA PRORAČUN I OPTIMIZACIJU TOPLOTNIH ŠEMA TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA	39	PROGRAM SYSTEM FOR CALCULATION AND OPTIMIZATION OF THERMAL DESIGNS OF THERMAL POWER PLANT
		<i>Branislav M. Savić, Novica Vasiljević, Saša Damnjanović, Titoslav Živanović i Dragan Tucaković</i>
SOFTVERSKI SISTEM ZA DIJAGNOSTIKU RADA PARNOG BLOKA	47	SOFTWARE SYSTEM FOR DIAGNOSIS OF STEAM BLOCK OPERATION
		<i>Vladimir Stevanović, Milovan Studović</i>
ANALIZE DINAMIČKIH OPTEREĆENJA PAROVODA SVEŽE PARE I CEVOVODA NAPOJNE VODE	57	ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS OF MAIN STEAM AND FEEDWATER PIPELINES
		<i>Vera Šijački Žeravčić, Biljana Anđelić, Gordana Bakić, Miloš Đukić, Dušan Milanović, Aleksandar Vlajčić, Petar Maksimović</i>
UTICAJ KVALITETA MATERIJALA NA POUZDANOST TERMOENERGETSKOG POSTROJENJA	64	THE INFLUENCE OF MATERIAL QUALITY ON POWER PLANT RELIABILITY
		<i>Vlastimir Jovanović, Miloš Kostić</i>
ELEKTROSTATIČKI EKRANI IZMEĐU NAMOTAJA VN I NN - UGRADNJA U BLOK TRANSFORMATORU OD 725 MVA	71	ELECTROSTATIC SHIELD BETWEEN HV AND LV COILS-BUILDING INTO 725 MVA GENERATOR TRANSFORMER
		<i>Branko Milosavljević, Radmilo Antić, Branko Maoduš, Miodrag Petrović</i>
OKLOPLJENE GENERATORSKE SABIRNICE ODRŽAVANJE I KVAROVI U EKSPLOATACIJI	78	ARMOURED GENERATOR BUS-BARS OVERHAULING AND FAULTS DURING OPERATION
		<i>Zoran Mićević, Đorđina Milovanović</i>
UTICAJ PROMENE KVALITETA UGLJA NA RAD KOTLA I POMOĆNE OPREME	83	INFLUENCE OF THE CHANGED PROPERTIES OF COAL ON THE BOILER AND AUXILIARY PLANT OPERATION
		<i>Ranko Rakanović, Jovan Nešović, Dragan Petrović, Ljubiša Vujačić, Saša Đorđević</i>
ČETVOROOSOVINSKI VAGON ZA PREVOZ UGLJA U TE "NIKOLA TESLA", OBRENOVAC	89	FOUR - AXLE WAGGON FOR TRANSPORTATION OF COAL IN THERMAL POWER PLANT OBRENOVAC
		<i>Branislav Đorđević</i>
Prikaz knjige HIDRAULIČNE MAŠINE		Review of book HYDRAULIC MACHINES
Miroslav Benišek		Miroslav Benišek

**IZDAVAČ:
PUBLISHER:**

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

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

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

Branislav A. Bošković, dipl. ing.

**IZDAVAČKI SAVET
PUBLISHING COUNCIL**

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

**REDAKCIONI ODBOR
EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

Časopis "Elektroprivreda" izlazi kvartalno.
The "Elektroprivreda" journal is issued quarterly.

Časopis "Elektroprivreda" se izdaje u 2001. godini uz finansijsku pomoć
Saveznog sekretarijata za razvoj i nauku.

The "Elektroprivreda" journal is published in 2001 with financial support of
the Federal Secretariat for Development and Science.

Štampa: "Grmeč" AD - "Privredni pregled", Beograd, Maršala Birjuzova 3
PRINTED BY: "Grmeč LTD" - "Economic Review", Beograd, Maršala Birjuzova 3

TIRAŽ: 1 000 primeraka
CIRCULATION: 1,000 copies

Branislav Đorđević

Prilog objektivnijem vrednovanju obnovljivih energija (I)

Originalni naučni rad
UDK: 620.9; 621.22; 621.31; 621.577; 662.997

*Najteže se primećuju strateške greške.
(Maynov zakon, Marphyjevi zakoni)*

Rezime:

Prikazuje se metodika za vrednovanje hidroenergetskih potencijala, u okviru svih obnovljivih i neobnovljivih izvora energije. Pokazuje se da će se u najskorijoj budućnosti najveći deo tehnički iskoristivog vodnog potencijala naći u kategoriji ekonomski iskoristivog potencijala. Uvode se pokazatelji: vremena vraćanja uložene energije za izgradnju i održavanje energetske izvora, indeksa strateškog prioriteta izvora energije ili mere racionalizacije. Pokazuje se neosporna prednost hidroenergije u odnosu na sve druge obnovljive izvore.

Ključne reči: obnovljive energije, hidroenergetski potencijali, vrednovanje, vreme vraćanja utrošene energije

Abstract:

A CONTRIBUTION TOWARDS A MORE OBJECTIVE EVALUATION OF RENEWABLE RESOURCES

The paper presents a new approach to evaluation of hydropower potential, in the context of all energy renewable and nonrenewable sources. Contemporary trends are mainly the increase of installed capacity of new power plants and upgrading of existing ones, increase of part of technically usable potential that became also economically usable. Feasibility of hydropower generation becomes: any power plant is economically justified if it produces cheaper energy than thermal and nuclear power plants, taking into account also the expenses for environmental protection. The author defines relations: the time of return of energy used for construction, maintenance and exploitation of energy sources; index of strategic priority of energy sources. These relations show clearly that hydropower potential is the best renewable energy source.

Key words: renewable energy, hydropower potential, evaluation, the time of return of energy used for construction, maintenance and exploitation of energy sources

1. UVOD

Sve ubrzanije iscrpljivanje neobnovljivih energetske resursa i zaoštavanje energetske pro-

blema u svetu, doveli su do toga da se sve veća pažnja usmerava prema obnovljivim izvorima energije. Među obnovljivim energetske resursima posebno mesto zauzima hidroenergija, koja, zahva-

Prof. dr Branislav Đorđević, dipl.ing.grad. – Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 11000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

ljujući mogućnostima velike koncentracije na mestu korišćenja, predstavlja izvor sa visokom ukupnom energetsom dohodovnošću. Zbog toga u svetu postoji tendencija da sve veći deo tehnički iskoristivog hidropotencijala prelazi u kategoriju ekonomski iskoristivog potencijala. Generalno se može smatrati da će se u doglednoj budućnosti ukupan tehnički iskoristiv hidropotencijal, onaj koji je stavljen pod posebnu društvenu zaštitu (prostornim planovima i drugim merama zaštite namene prostora) – naći u kategoriji ekonomski iskoristivog potencijala i da će se pristupiti njegovom korišćenju. Razloga za tu tendenciju ima više, pri čemu su posebno relevantni sledeći: (1) sa razvojem elektroenergetskog sistema (ubuduće – EES) i promena nivoa konzuma i strukture proizvodnje, menja se uloga hidroelektrana (ubuduće – HE) u EES: hidroelektrane preuzimaju sve važniju i delikatniju ulogu u obezbeđivanju vršne snage i energije i ostvarivanju zahtevane rezerve i pouzdanosti sistema; (2) tendencije poskupljenja fosilnih goriva menjaju uslove vrednovanja HE: ekonomične postaju sve HE čija je cena energije manja od cene energije najskupljih termoelektrana (ubuduće – TE) koje svojim ulaskom u pogon istiskuju iz EES; (3) kompleksno korišćenje voda, u okviru kompleksnih sistema, učinilo je ekonomičnim mnoge energetske objekte koji nisu bili ekonomični kada su razmatrani samo kao energetska postrojenja, (4) uvođenje novih HE u EES povećava ekonomsku stabilnost EES; (5) brzi razvoj tehnologije opreme za HE (posebno za objekte na malim padovima) proširuje opseg ekonomične eksploatacije mnogih ranije neekonomičnih hidro potencijala, (6) HE raznih tipova i veličina povećavaju vitalnost EES u uslovima izvanrednih događaja.

I pored tih neospornih tendencija, često se osporavaju projekti hidroelektrana. Malo upućena javnost, pa čak i jednostrano obrazovani eksperti za pojedine oblasti, skloni su da sa neodmerenom glorifikacijom, najavljuju mogućnosti korišćenja pojedinih obnovljivih izvora energije – kao zamenu za hidroelektrane, koje se bez ozbiljnijih uporednih analiza optužuju za ekološku destrukciju životne sredine. Pritom se zaboravljaju sledeće važne činjenice: (a) gotovo svi obnovljivi izvori energije, osim vodnih snaga, veoma su rasuti, te je neophodna njihova složena i skupa koncentracija, da bi se omogućilo korišćenje; (b) zbog velike rasutosti, korišćenje takvih obnovljivih resursa skopčano je sa velikim utroškom drugih materijalnih resursa (čelika, aluminijuma, bakra, stakla, plastike, betona, itd.), do kojih se dolazi utroškom velikih količina energija, tako da je njihova ukupna neto energetska dohodovnost dosta mala; (c) za neke obnovljive resurse, kao što je npr. bioenergija, troši se velika količina druge energije (nafte) za proizvodnju i sakupljanje biomase, što se začuđujuće često pre-

vida; (d) neki obnovljivi resursi (vetar, energija Sunca) vremenski su vrlo promenljivi, tako da njihovo korišćenje ne smanjuje potrebnu instalisanu snagu drugih elektrana, te svaki takav izvor mora biti dubliran i sa odgovarajućom klasičnom elektranom, čime se samo povećava pritisak na sve materijalne i energetske resurse; (e) korišćenje nekih obnovljivih izvora nije prihvatljivo sa gledišta očuvanja životne sredine, jer se troši i / ili obezvređuje veliki prostor, odnosno, moraju se pojačano koristiti prljave tehnologije za dobijanje materijala koji su potrebni za njihovo korišćenje.

Zato se obnovljivi energetske resursi moraju brižljivo razmatrati sa stanovišta ukupne energetske dohodovnosti, kako se ne bi načinila strateška greška da se izgrade energetske nerentabilna postrojenja, koja su progutala više energije tokom proizvodnje u njih ugrađenih materijala, nego što će proizvesti energije tokom čitave svoje eksploatacije i koja su nepovratno devastirala prostor. Cilj ovog razmatranja je da se u analize uvedu pokazatelji energetske dohodovnosti – kojima se kvantificiraju energetske performanse pojedinih izvora energije, isključivo sa stanovišta upoređivanja količina energije koje se utroše na njihovu izgradnju, s jedne strane i količine energije koju ta postrojenja mogu da proizvedu tokom čitave svoje eksploatacije, s druge strane. Učinjen je napor da se objektivno razmatraju pojedini obnovljivi izvori energije, kako bi se pokazalo u kojoj meri se na njih zaista može računati u budućnosti. Sažeto, ovo razmatranje ima za cilj da unese više egzaktno energetske realnosti u vrednovanje obnovljivih izvora energije.

2. POKAZATELJI ENERGETSKE DOHODOVNOSTI

Ocena energetske efektivnosti i svrsishodnosti korišćenja pojedinih obnovljivih, ali i neobnovljivih izvora energije, kao i vrednovanje opravdanosti pojedinih investicionih mera za racionalizaciju potrošnje, može se obaviti samo ukoliko se uvedu objektivni pokazatelji energetske dohodovnosti. Smisao tih pokazatelja je da kvantifikuju odnose ukupnih rashoda i prihoda energije – tokom izrade i eksploatacije izvora energije, ili sprovođenja mera za štednju energije.

Pod rashodima energije podrazumevaće se suma svih primarnih energija koje se moraju utrošiti za izgradnju postrojenja / elektrane, odnosno, za realizaciju investicionih mera za smanjenje potrošnje energije. Tu ulazi ukupna energija koja se troši za proizvodnju materijala za izgradnju elektrana i svih njenih uređaja, za građenje objekata, kao i za njihovo održavanje. U slučaju mera štednje energije, rashode čini energija utrošena za proizvodnju materijala za termičku izolaciju zgrada i dodatna energija utrošena za realizaciju tih mera zaštite, itd. Ukoliko energetske objekat zaposeda velike površi-

ne produktivnog zemljišta, u rashode se moraju uračunati i gubici energije biomasa, koje bi se mogle proizvoditi na tom zemljištu.

Energetski prihod čini energija koja se dobija iz razmatranog izvora, odnosno, koja se uštedi kao rezultat primene dodatnih investicionih, u suštini – energetskih ulaganja. Da bi upoređivanje bilo korektno, i prihodi i rashodi se moraju svesti na iste jedinice primarne energije. Zavisno od načina upoređivanja i interpretacije prihoda i rashoda energije, moguće je definisati više pokazatelja, od kojih se ovde navode sledeća tri.

1. Vreme vraćanja primarne energije utrošene za građenje. Taj pokazatelj definiše vreme, izraženo u godinama, za koje elektrana, odnosno investiciona mera štednje, vrati primarnu energiju koja je utrošena za njenu realizaciju. Taj pokazatelj je veoma indikativan, jer, ukoliko su vrlo dugački periodi vraćanja utrošene energije, to jasno pokazuje da sa dugoročnog strateškog energetskog stanovišta nema smisla graditi takva postrojenja. Da bi se takav pokazatelj definisao, uvode se sledeće oznake: PE – primarna energija, neposredno utrošena za proizvodnju materijala za realizaciju elektrane (ugalj utrošen za proizvodnju koksa koji se troši u proizvodnji čelika, gas, tečna goriva, itd); EE – električna energija utrošena za realizaciju postrojenja; η_k – koeficijent korisnog dejstva (k.k.d.) u procesu konverzije goriva (ugalj, gas, tečna goriva) u električnu energiju, $\eta_k = (T_1 - T_0) / (T_1 + 273 \text{ }^\circ\text{C})$, pri čemu se preliminarno može usvojiti: $\eta_k \approx 0,33$; $k = 1/\eta_k$ – koeficijent za pretvaranje električne energije u odgovarajuću veličinu primarne energije goriva: $k \approx 3$; P_e – nominalna snaga uređaja za konverziju obnovljive ili neobnovljive energije u korisni oblik energije; T_i – godišnje vreme korišćenja snage uređaja (vreme / godina); η_u – k.k.d. uređaja pri konverziji u korisnu energiju; η_{op} – nominalni srednji stepen iskorišćenja snage uređaja.

Utrošena primarna energija (UPE) za proizvodnju uređaja može se definisati izrazom:

$$UPE = PE + EE \cdot k \text{ [J]} \quad (1)$$

Sa UPE su obuhvaćeni svi energetski rashodi u procesu realizacije postrojenja – od proizvodnje materijala potrebnih za izgradnju, do energije koja se utroši za građenje objekata.

Dobijena korisna energija (DE_i), kao prosečni godišnji energetski prihod od uređaja koji obavlja konverziju primarne energije u korisnu energiju, može se predstaviti u opštem vidu:

$$DE_i = P_e \cdot \eta_{op} \cdot T_i \cdot \eta_u \text{ [J/god]} \quad (2)$$

Ukoliko su velike fluktuacije proizvodnje, te se ostvarena snaga iskazuje krivom trajanja snage $N(t)$, tada se dobijena električna energija dobija na uobičajen način

$$DE_i = \int_0^T N(t) dt \text{ [kWh/god]} \quad (3)$$

gde je T – referentno vreme, $T = 8760$ sati / godina.

U slučaju da se konverzija obavlja u električnu energiju, dobijena energija ima energetski ekvivalent uštedene primarne energije DE :

$$DE = DE_i \cdot k \text{ [J/god]} \quad (4)$$

Vreme vraćanja primarne energije (θ_v) koja je utrošena za izgradnju / proizvodnju postrojenja, ili za sprovođenje investicionih mera racionalizacije potrošnje, tada se može definisati kao:

$$\theta_v = UPE / DE \text{ [J : J/god = god]} \quad (5)$$

Okvirne analize pokazuju da se po ovom pokazatelju θ_v najbrže vraća energija utrošena za izgradnju većih termoelektrana i gasnih elektrana, kod kojih je θ_v oko godinu dana. Slede hidroelektrane racionalnih pribranskih tipova, kod kojih je taj pokazatelj θ_v oko 1,5 ÷ 2 godine. Izrazito su dohodovne i nuklearne elektrane, kod kojih je θ_v oko dve godine. Po tom pokazatelju znatno su nepovoljnija neka postrojenja za korišćenje tzv. obnovljive energije. Zbog velike rasutosti energije većine obnovljivih izvora neizbežni su vrlo visoki specifični trošci materijala po jedinici raspoložive snage, odnosno, proizvedene energije, tako da za takva postrojenja pokazatelj θ_v najčešće iznosi više od 10 godina. Kao što će se kasnije pokazati, neki vidovi konverzije tzv. obnovljive energije toliko su "skupi" sa stanovišta tog pokazatelja, da tokom čitavog veka eksploatacije neka takva postrojenja ne mogu da vrate primarnu energiju koja je utrošena za njihovu izgradnju. U tu kategoriju spadaju neki tipovi solarnih uređaja.

2. Vreme vraćanja energije za izgradnju i održavanje. Imajući u vidu činjenicu da se u sisteme za proizvodnju energije mora stalno da unosi energija za održavanje, koja je različita za pojedine vidove konverzije i vrste uređaja, kao i da se nepovratno troši prostor kao resurs za proizvodnju obnovljive bioenergije, uvodi se nov pokazatelj – vreme vraćanja energije utrošene za izgradnju i održavanje postrojenja, kao i izgubljene energije zbog zaposedanja produktivnog prostora. U tom slučaju se primarna energija (UPE_1) utrošena za građenje, održavanje i izgubljena zbog angažovanog prostora, može kvantificirati u iznosu

$$UPE_1 = PE + EE \cdot k + OE \cdot t_e + BE \text{ [J]} \quad (6)$$

gde su uvedene nove veličine: OE – primarna energija koja se troši na održavanje postrojenja u toku godine, t_e – period eksploatacije (godina), BE – ukupna energija biomasa koja se tokom čitavog pe-

rioda eksploatacije gubi na elektranom zaposnednutom prostoru, koji bi se mogao upotrebiti za neki vid proizvodnje biomasa (računajući se turnusima moguće proizvodnje biomasa – ogrevnog drveta ili jednogodišnjih kultura).

Pokazatelj θ_1 vremena vraćanja te utrošene / izgubljene energije može definisati odnosom

$$\theta_1 = UPE_1 / DE \quad [J : J/\text{god} = \text{god}] \quad (7)$$

Taj pokazatelj još objektivnije kvantificira energetska svrsishodnost korišćenja pojedinih vrsta obnovljive energije. On je još nepovoljniji od prethodnog za niz obnovljivih energija, imajući u vidu velike specifične utroške energije, koji nastaju zbog njihove velike rasutosti.

3. Indeks strateškog prioriteta izvora energije i/ili investicionih mera štednje. Da bi se analitički definisala i razgraničila dugoročna strateška valjanost i prioritetnost korišćenja pojedinih obnovljivih i neobnovljivih izvora energije, i/ili investicionih mera za štednju potrošnje (dogradnja termičkih izolacija zgrada, veća ulaganja u tzv. solarnu arhitekturu, itd), uvodi se indeks strateškog prioriteta (ISP) izvora energije ili mere štednje:

$$ISP = DE / [(UPE/t_e) + GE + OE] \quad (8)$$

Od novih oznaka, ovde je: GE – potrošnja primarnih neobnovljivih energija u procesu proizvodnje korisnih oblika energije (potrošnja uglja, gasa, tečnih goriva, itd), DE ima šire tumačenje u odnosu na jednačine (4 i 7), te predstavlja i energetska ekvivalent proizvedene i/ili uštedene energije, primenom investicionih mera za uštedu potrošnje energije.

Indeks ISP je bezdimenzionalna veličina, koja može da bude veća ili manja od 1. U slučaju kada je $ISP > 1$ sasvim je očito da se radi o izvoru energije ili meri racionalizacije potrošnje koji imaju neospornu dugoročnu stratešku valjanost, jer je energetska prihod veći od sume svih rashoda – potrošnih primarnih energija. Očito je da se u toj kategoriji mogu naći samo neki koncentrisani obnovljivi izvori energije, i neke energetska efikasne investicione mere štednje. Jasno je da veći dugoročni strateški prioritet imaju oni izvori energije i one mere štednje koji imaju veći indeks ISP, tako da se kriterijum za ocenu dugoročne strateške valjanosti pri izboru energetska izvora ili mera štednje, u slučaju više mogućih opcija, može formalizovati u obliku:

$$ISP \rightarrow \max \quad (9)$$

Vrednost indeksa $ISP < 1$ imaju svi izvori neobnovljive energije, ali i neki izvori obnovljive energije, koji zbog velike rasutosti zahtevaju velike specifične utroške materijala po jedinici proizve-

dene energije. Ukoliko je $ISP < 1$, takav energetska izvor, čak i ako je u pitanju konverzija obnovljive energije, ne može da nosi atribut "obnovljivosti", jer se za njegovu izradu i održavanje utroši više energije no što on može da proizvede u procesu eksploatacije. Ukoliko se analiziraju investicione mere za racionalizaciju potrošnje, ako je indeks $ISP < 1$, sasvim je očito da takva mera nema energetska smisla, jer se više primarne energije izgubi za njeno sprovođenje, no što će se energije uštedeti tokom čitavog perioda eksploatacije.

Okvirne analize koje je uradio autor pokazuju da najviši rang u kategoriji strateški najvrednijih izvora i mera, onih koji imaju $ISP > 1$, ima mera štednje energije primenom termičke izolacije zgrada. Te mere su posebno efikasne ukoliko se izvedu odmah, tokom građenja, ma da su i mere sanacije već izgrađenih nedovoljno termički zaštićenih zgrada energetska vrlo efikasne. To će se ilustrovati merenjima koja pokazuju da kuća stambene površine 100 m^2 , klasično građena od opeke, bez toplotne izolacije, koja se greje na 20°C dok je napolju 0°C , pri brzini vetra od 50 km/h , ima toplotne gubitke ekvivalentne snazi od 12 kW . Ukoliko se izvede toplotna izolacija zidova, poda i tavana, gubljenje toplote se smanjuje na samo oko 6 kW , uz mogućnost dodatnog smanjenja gubitaka, ukoliko se klasično zastakljivanje zameni tzv. vakum-staklom, sa boljim britvljenjem pri zatvaranju svih otvora. Merenja u Nemačkoj pokazuju da ako se običnom zidu od opeke doda izolacija, sa vazдушnim međuprostorom koji se formira zidom od fasadne opeke, specifični utrošak za grejanje po 1 m^2 smanjuje se oko $14,8 \text{ l}$ loživog ulja na samo oko $4,2 \text{ l}$. Uračunavši sve energetska utroške za proizvodnju izolacionih i drugih dodatnih materijala, dobijaju se vrednosti $ISP > 7-10$, pri čemu je posebno relevantna činjenica da je korišćenje te mere vrlo dugotrajno (računato je sa 50 godina, ali poznato je da kuće traju i duže). Bez obzira na izvanrednu energetska dohodovnost, ta mera se još uvek malo sprovodi zbog: većih početnih investicija, neadekvatno vrednovane (još uvek jeftine) energije i – zbog tradicionalizma. Međutim, u novije vreme, neke zemlje (u tome prednjači Kanada) uvele su obavezu i normative za termičko opremanje zgrada, što već počinje da daje željene efekte.

Na drugom mestu na listi strateški najvaljanijih, zajednički vrednovanih energetska izvora i mera štednje, prema indeksu ISP , nalaze se hidroelektrane raznih tipova, kod kojih je indeks ISP , po pravilu, veći od 5 . To hidroelektrane ubedljivo stavlja na prvo mesto izvora energije, sa gledišta dugoročnih strateških prioriteta. One su znatno ispred svih drugih obnovljivih izvora, od kojih neki, često apostrofirani kao "energetska budućnost" sveta (npr. solarne elektrane, elektrane na vetar) imaju

indeks *ISP* nešto veći od 1, što znači da se sa gledišta bilansa unete i dobijene energije, jedva mogu da svrstaju u klasu obnovljivih energetske resursa. Samo naizgled paradoksalno, ali potpuno tačno, jer su ti izvori energije veliki potrošači materijala, odnosno energije, po jedinici proizvedene energije.

Elektrane koje troše neobnovljive primarne resurse (ugalj, gas, tečna goriva, itd.) imaju indeks *ISP* < 1. Naravno, to ne znači da takve izvore energije ne treba graditi, jer se bez njih ne mogu zatvoriti energetske bilansi u najvećem broju zemalja. Međutim, indeks *ISP* kvantificira jednu logičnu činjenicu da je jedina razumna dugoročna politika jedne zemlje – da se najpre forsira korišćenje onih izvora energije i onih mera štednje čiji je indeks *ISP* najveći, *kako bi se što više usporio utrošak neobnovljivih primarnih energenata*. Iz tog ugla treba razmatrati i logičan zahtev da se forsira izgradnja hidroelektrana, onih koje nasumnjivo spadaju u kategoriju ekonomski iskoristivog potencijala, jer se njima usporava trošenje fosilnih goriva.

3. NEKI NAJČEŠĆE RAZMATRANI IZVORI OBNOVLJIVE ENERGIJE

U nastavku će se analizirati realne mogućnosti korišćenja i energetske dohodovnosti nekih najčešće apostrofiranih obnovljivih izvora energije, onih koji se neargumentovano, ali veoma optimistički ističu kao energetska budućnost čovečanstva. Zbog brojnosti takvih izvora, taj prikaz će biti dat u dva nastavka. U ovom delu se razmatraju energije Sunca, vetra i biomasa.

3.1. Energija Sunčevog zračenja

Korišćenje energije Sunca je najdrevniji način korišćenja energije uopšte, te kao takav nije sporan, bar kada se radi o neposrednoj konverziji u toplotu, bilo korišćenjem zakonitosti solarne arhitekture, bilo kada se radi o grejanju vode, u okviru tzv. male energetike, ili energije "nižih temperatura", kojom se štedi energija preuzeta iz EES. Taj vid korišćenja sunčeve energije treba stimulisati merama državne politike (fiskalne i organizacione mere). Sporno je euforično, ali neargumentovano insistiranje na konverziji solarne energije u električnu energiju, u okviru velikih postrojenja ("visokih temperatura"), što će ovde biti razmotreno iz ugla energetske dohodovnosti. (Koliko je duboka strateška zabluda o mogućnostima korišćenja sunčeve energije za proizvodnju električne energije, autor se uverio tokom diskusija o nekim projektima HE, kada su neki ugledni intelektualci tvrdili da Jugoslavija može sve svoje elektroenergetske potrebe da zadovolji korišćenjem samo energije Sunca i vetra!).

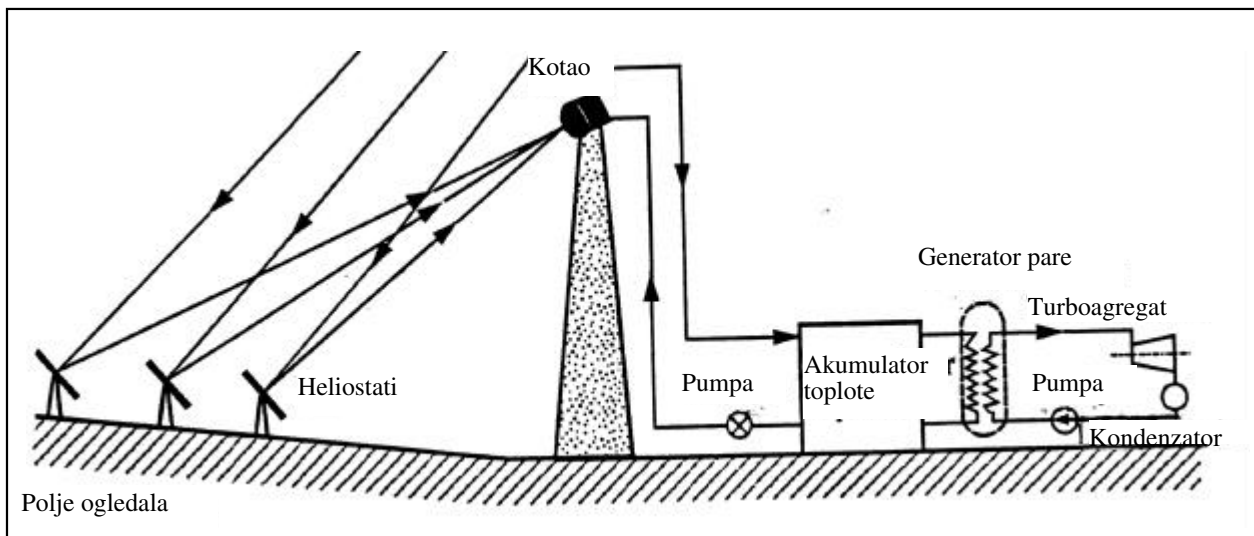
Energija Sunca koja dopire do Zemlje je impresivna, i iznosi oko $1 \cdot 10^9$ TWh/god. To je oko 15

puta više od energije u ukupnim svetskim zalihama uglja. Reklo bi se, na osnovu tih cifara, da bi ta energija mogla da bude glavna energija budućnosti.

Postoji niz problema koji to jako otežavaju. Prvi je taj što je zračenje Sunca veoma rasut energetske snazi od oko 230 W/m^2 , uz veliku fluktuaciju. Zato su za koncentraciju te energije, radi konverzije u električnu energiju, potrebni vrlo prostrani, veliki uređaji, za koje se moraju utrošiti velike količine energije, bilo u fazi izgradnje takvih uređaja – ugradnjom materijala za čiju su proizvodnju utrošene velike količine energije, u fazi njihovog održavanja, bilo sa stanovišta zauzimanja prostora, koji takođe predstavlja energetske kategoriju. Naime, površine na kojima su smešteni solarni uređaji ne mogu se koristiti za proizvodnju bioenergije. Drugi veliki problem je dnevna, sezonska, godišnja i stohastička (meteorološka) promenljivost sunčane energije, uz nepovoljnu asinhronost, tako da je energija Sunca najmanja zimi, upravo kada je najpotrebnija. Treća teškoća su tehnološki problemi konverzije sunčeve energije i još uvek dosta niski koeficijenti korisnosti uređaja.

Za konverziju sunčeve energije u električnu energiju postoje dva pristupa. Prvi je *posredna konverzija*: sunčeva energija → koncentracija toplotne energije na radni medij → stvaranje pare → mehanička energija u parnoj turbini → električna energija. Drugi pristup je *neposredna konverzija*, preko fotonaponskih ćelija.

Posredna konverzija u solarnoj elektrani (SE) podrazumeva koncentraciju sunčeve energije na kolektor toplote, primenom ogledala, kako bi se zagrejao radni medij u njemu. Ukoliko se na taj način postiže temperatura niža od $100 \text{ }^\circ\text{C}$, tada se u izmenjivaču toplote koristi freon, koji isparava i pokreće turbinu. Ukoliko se koncentracijom toplote postižu znatno veće temperature, tada se u izmenjivaču toplote predaje toplota vodi, koja se pretvara u paru – koja pokreće parnu turbinu. Postoje dva sistema SE: (1) za manje elektrane – DCS – *Distributed Collectors System*, kod koga radni medij teče kroz cevi oko kojih su postavljena parabolična ogledala, koja fokusiraju zrake na cev, prenoseći na taj način toplotu na radni medij; (2) za veće elektrane – CRS – *Central Receiver System*, sa centralnim prijemnikom, na koga se ogledalima prenosi celokupna energija. Šema takve solarne elektrane, sa centralnim prijemnikom (CRS), prikazana je na slici 1. Takvu SE odlikuje centralni visok stub (viši od 100 m), na kome se nalazi kotao – kolektor toplote. Oko stuba su raspoređena ogledala (heliostati), čiji se položaj stalno kompjuterski koriguje, tako da bez obzira na promenu položaja Sunca na nebeskom svodu tokom dana, uvek reflektuju sunčeve



Slika 1. Solarna elektrana sa centralnim prijemnikom (CRS)

zrake na kolektor na vrhu tornja. Zagrejan medij (mineralna ulja, tekući natrijum) dovodi se preko akumulatora toplote do razmenjivača, u kome se generiše para, koja pokreće parnu turbinu.

Na tim principima je realizovano više eksperimentalnih SE. Na Pirinejima, Francuska, u radu je SE tipa CRS, snage 2,4 MW, sa tornjem visokim 109 m. Najveća CRS elektrana u svetu je SE "Solar one", u Kaliforniji, snage 10 MW. Prema podacima iz literature, ta SE ima 1,500 000 ogledala (!), koja fokusiraju sunčeve zrake na kolektor na vrhu tornja visokog preko 100 m, kroz koje struji sintetičko ulje, koje u izmenjivaču toplote zagreva vodu i stvara paru. No, interesantan je podatak vezan za održavanje: 20 ekipa od po 20 ljudi, radeći noću, neprekidno čisti ogledala, kako bi SE mogla nesmetano da radi. I još jedan, veoma bitan podatak: troškovi izgradnje te SE, snage 10 MW, iznosili su 142,000 000 USD, što daje specifične investicije od 14,2 USD/W. To je oko 15 puta skuplje od klasičnih elektrana. No, imajući u vidu pogonska ograničenja zbog promenljivosti i diskontinuiteta u dotoku sunčeve energije, efektivna snaga je nekoliko puta manja od instalisane – vršne, što SE čini više desetina puta skupljom od klasične.

Razmotrimo ključno energetska pitanje: u kojoj meri je energija solarne elektrane zbilja – obnovljiva? Naizgled neozbiljno pitanje, ali samo za one koji računaju samo sa neto energijom koju SE proizvodi, prenebregavajući ogromne količine energije koje se moraju nepovratno utrošiti za dobijanje materijala koji su ugrađeni u objekat i uređaje elektrane. Ako se analizira suština – zbog čega su SE tako skupe, dolazi se do zaključka da nisu u pitanju "dečje bolesti" razvoja novih tehnologija, već je u pitanju konceptijski problem kome nema

leka – solarne elektrane su neverovatni "gutači" materijala, za čiju su proizvodnju potrebne ogromne količine energija. Već su navedene cifre o vrtočlavom broju ogledala. Baterije ogledala se nalaze na ozbiljnim čeličnim konstrukcijama, koje treba valjano fundirati, svaka od njih ima svoje uređaje za pokretanje, tu je i džinovski stub sa kolektorom, koji je svojevrsni konstruktorski podvig. Prema podacima iz studija (EDF, Francuska, 1988), za proizvodnju energije u iznosu od 1 megavat godina na godinu ($1\text{MWgodina} / \text{godina} = 8,76 \text{ GWh/god}$) u najracionalnijem vidu konverzije sunčeve energije, primenom sunčanih kolektora za zagrevanje vode, potrebno je utrošiti 185 t čelika, 31 t stakla i plastike, 8 t aluminijuma, oko 6 t bakra, itd. U slučaju SE sa ogledalima (CRS) treba računati sa 20 do 30 puta većim specifičnim utroškom ključnih materijala (čelik, beton) no u slučaju TE.

Ukoliko se sračuna energija koja se mora utrošiti za dobijanje energetski vrlo "skupih" materijala ugrađenih u jednu SE (čelik, beton, staklo, plastika, aluminijum, izolacioni materijali), može se izračunati da je vreme vraćanja energije (θ_v) kod takvih elektrana ne manje od 15 godina! Podatak izuzetno važan za strateška razmišljanja: elektrana čiji fizički vek sigurno nije duži od 20-25 godina (niko još nije izračunao koliko godina mogu da traju ogledala, a koliko uređaji koji ih neprekidno pokreću), bar 15 godina bi "otplaćivala" energiju koja je samo utrošena za njenu gradnju, da bi tek nakon toga počela neto energetska proizvodnju. I taman kada započne stvarno "novu" proizvodnju, dolazi vreme da se rashoduje, ili da se menjaju vitalni uređaji, za koje je potrebno utrošiti novu energiju! A gde su energetski troškovi održavanja, koje niko nije realno izmerio? Da se ne zaboravi ključna

stvar: solarna elektrana mora da bude "dublirana" sa odgovarajućom klasičnom elektranom, čiji je rad neizbežan noću i kada je vreme oblačno. Znači, pomenuti energetske troškovi za izgradnju SE su dodatni, pored onih koji su neizbežni za klasičnu elektranu koja je "dublirana". Da li se onda može govoriti o obnovljivoj i ekološki čistoj energiji, kada se zna uz koliko se veliku ekološku i energetske destrukciju dobijaju gvožđe, aluminijum, cement, staklo, plastika, razni izolacioni materijali koji se ugrađuju u solarnu elektranu? Govoriti o obnovljivoj, ekološki čistoj energiji solarne elektrane velika je strateška zabluda, u skladu sa motom ovog članka.

Mora se uzeti u obzir još jedan problem – profesor. Prema istoj studiji (EDF, 1988), za jednu SE od 100 MW vršne snage (čije je vreme korišćenja kraće od 5 % sa krive trajanja) bilo bi potrebno oko 20 000 ogledalnih grupa, površine od po 45 m², svaka sa uređajem za automatsko pomeranje ogledala, kako bi se i pored menjanja položaja Sunca zraci uvek reflektovali neposredno na kolektor na vrhu tornja, koji bi bio visok oko 300 m. Ogledala bi bila raspoređena na površini od preko 4 km². Ukoliko se takva elektrana ne gradi u pustinji, već na nekom produktivnom prostoru, mora se uzeti u obzir i to trajno zauzimanje prostora, na kome nije moguća bilo kakva produkcija bioenergije (ratarske kulture, šume). Izuzetno složen je i problem održavanja, što su pokazale sve do sada izgrađene eksperimentalne SE. Ako je SE u pustinji, ogledala su stalno ugrožena istaložavanjem vrlo sitnog peska, koji radikalno smanjuje refleksiju sunčevih zraka, a time i stepen efektivnosti SE, a ako je na nekoj planinskoj visoravni, i leti i zimi se ogledala neprekidno moraju čistiti, zimi od snega,inja, leda. A učinak? Veoma skroman, što se može ilustrovati eksperimentalnom SE na Krimu. Njena vršna snaga je 5,6 MW, temperatura pare 250 °C, pritisak 40 bara, neto površina ogledala je preko 40 000 m² proizvodnja – samo oko 250 000 kWh/god, što ukazuje na veoma nisku iskoristivost instalisane snage. Ako je tačan podatak koji je autor dobio naknadno, da je sa tom SE zaposednuta površina od oko 200 000 m², dobija se vrlo interesantan zaključak o "energetskoj dohodovnosti angažovanog prostora": u solarnoj elektrani se po 1 m² angažovane površine dobija oko 1,25 kWh/m² godišnje električne energije, dok bi se u slučaju da se na toj istoj površini intenzivno (plantažno) gaje šumske kulture, dobijalo oko 2,5 kWh/m² godišnje energije biomase (godišnji priraštaj drvne mase, koja može da se eksploatiše i koristi za gorivo!). Autor se ne usuđuje da eksplicitira zaključak, ali on je nedvojbjen, sadržan u već citiranom Marphyjevom zakonu: najteže se primećuju – stateške zablude.

Neposredna konverzija sunčeve u električnu energiju obavlja se u fotonaponskim ćelijama, koje predstavljaju noviju tehnologiju, zasnovanu na poluprovodnicima. Ne ulazeći u fizikalno razjašnjenje funkcionisanja poluprovodnika, jer to nije predmet ovog razmatranja, rezimiramo najsazetije. Vrlo tanke pločice kristala silicijuma sa primesom arsena, na odgovarajući način prevučene izuzetno tankim "filmom" bora, izloženi zračenju Sunca ponašaju se kao poluprovodnički spoj. Čestice svetlosti, fotoni, imaju dovoljno energije da atomima silicijuma, na koje naleću, izbijaju elektrone. Javlja se složen fotoelektrični proces, čiji je rezultat da se na jednoj strani poluprovodničkog spoja stvara višak negativnog, a na drugoj višak pozitivnog naboja, usled čega na priključnicama poteče struja. Sve izgleda čisto i – izgledno za korišćenje. Međutim, praksu korišćenja silicijumskih fotonaponskih ćelija prati više vrlo ozbiljnih problema. Prvi je – niska efikasnost uređaja, sa k.k.d. koji je sada oko 0,15. Drugi problem je veoma niska energetska dohodovnost fotonaponskih ćelija. Njihova izrada zahteva specifično veliki utrošak "energetski najskupljih" materijala (aluminijuma, bakra, silicijuma, itd), tako da je vreme vraćanja uložene energije oko – 20 godina! Niko ne zna tačno koliko godina bi takvi uređaji mogli da rade, ali je procena da je to vreme kraće od vremena za koje se može vratiti energija koja je u njih uložena. Znači, ukoliko se korektno analiziraju količine unete energije (energije utrošene za proizvodnju fotonaponskih ćelija) i proizvedene energije, dolazi se do zaključka da se o solarnim ćelijama ne može govoriti kao o obnovljivom izvoru energije, već o svojevrsnom energetskom "pretvaraču" neobnovljive energije, koji u njega uloženu energiju kasnije samo delimično vraća, koristeći za to energiju Sunca. Zato taj pretvarački uređaj ima smisla koristiti samo tamo gde je to jedini način za snabdevanje električnom energijom nekih izolovanih, važnih i skupih uređaja. Tako se solarne ćelije sada upravo i koriste: za snabdevanje energijom kosmičkih brodova i stanica, geostacionarnih satelita, udaljenih automatskih meteoroloških stanica, itd.

Fotonaponske ćelije se proizvode tokom poslednjih decenija, zbog rešavanja energetskih problema kosmičkih programa, te se njihova cena smanjivala i sada se stabilizovala na oko 10 USD/W i smatra se da će tu i ostati. Ako se ima u vidu da se radi o vršnoj snazi, onaj u vedro sunčano podne, efektivna specifična cena je nekoliko desetina puta veća nego kod konvencionalne elektrane. Tu ekonomsku neodrživost pokazala je i pompezno najavljivana fotonaponska sunčana elektrana (FSE) kod Madrida, snage 100 kW, koja je prema podacima iz štampe koštala oko 5,5 miliona USD! Specifične investicije su oko 55 USD/W vršne sna-

ge, ili, uzimajući u obzir periode osunčenja, oko 160 USD/W. Znači, ne samo energetska, već i finansijska katastrofa!

U atributima "besplatna i čista", koji sasvim neodmereno prate glorifikaciju solarne energije, videli smo da je atribut "besplatna" daleko od istine. Kako stoji stvar sa atributom "čista"? I to je velika, strateška zabluda neobaveštenih ljudi. Treba podsetiti na dve ključne činjenice: (a) za izgradnju solarnih elektrana troši se desetine puta više materijala i ulazne energije no kod klasičnih elektrana; (b) zbog neraspoloživosti SE u dužim intervalima, solarne elektrane moraju da budu "dublirane" sa klasičnim elektranama. Imajući u vidu i vreme vraćanja energije, koje je gotovo ravno amortizacionom periodu solarnih elektrana, analitički je jasno da bi se njihovim masovnijim građenjem samo povećao destruktivni pritisak na okolinu: u sferi eksploatacije ruda metala i nemetala, u sferi proizvodnje neophodnih materijala u vrlo "prljavim" industrijama (čelik, aluminijum, staklo, cement), u sferi korišćenja obnovljivih energenata, ali i u sferi devastacije prostora, jer su solarne elektrane veliki "potrošači" prostora. Ko to ne veruje, neka pogleda na jednu prelepu padinu na planini Tari, kompletno zaposednutu šumom čeličnih nosača, cevi i solarnih tabli, i sve to da bi se jednom omanjem hotelu obezbedila topla voda – u sunčanim razdobljima! Pri čemu se taj hotel nije "skinuo" sa EES, već je cela ta glomazna, ružna i energetska skupa instalacija, koja predstavlja vizuelno zagađenje, dublirana kompletnim klasičnim grejnim električnim sistemom – kada nema sunca. Da je napravljena valjana energetska i ekološka analiza, pokazalo bi se da je taj uređaj, u stvari, pravi energetska rasipnik! Znači, nažalost, solarne elektrane baš i nisu spektakularno obnovljiv izvor energije, niti je ta energija ekološki čista. Tačnije, ona jeste neposredno ekološki čista, ali su veoma prljave tehnologije kojima se obezbeđuju ogromne količine materijala potrebnih za izradu solarnih uređaja. A građenje velikih solarnih uređaja troši i ekološki devastira prostor.

3.2. Energija vetra

Kinetička energija vetra, transformisana u mehaničku energiju za pogon mlinova ili za pumpanje vode, korišćena je od drevnih vremena. I sada se snaga vetra logično koristi za pumpanje vode iz bunara u rezervoare, odakle se razvodi prema mestima potrošnje. U ovom veku snaga vetra je korišćena i za proizvodnju električne energije, ali prevashodno na malim postrojenjima, snage do 2 kW, kojima su obezbeđivane najnužnije potrebe usamljenih farmi i drugih objekata (opet - tzv. "mala energetika", koja nije sporna). Pošto se u novije vreme vetrenjače – eolske elektrane (EE) od strane određenih krugova sve više najavljuju kao spektakularni

izvor za proizvodnju obnovljive energije u "velikoj energetici", razmotrimo bazne principe i probleme tog vida konverzije energije.

Bruto snaga vetra (P_v) iznosi: $P_v = \rho \cdot V \cdot v^2 / 2$ (W), gde su: ρ – gustina vazduha, oko 1,25 kg/m³ blizu površine zemlje, V – zapremina vazduha koji struji kroz površinu A , brzinom v : $V = A \cdot v$, te je

$$P_v = \rho \cdot A \cdot v^3 / 2 \quad [\text{W}] \quad (10)$$

tako da se bruto snaga vetra može predstaviti relacijom

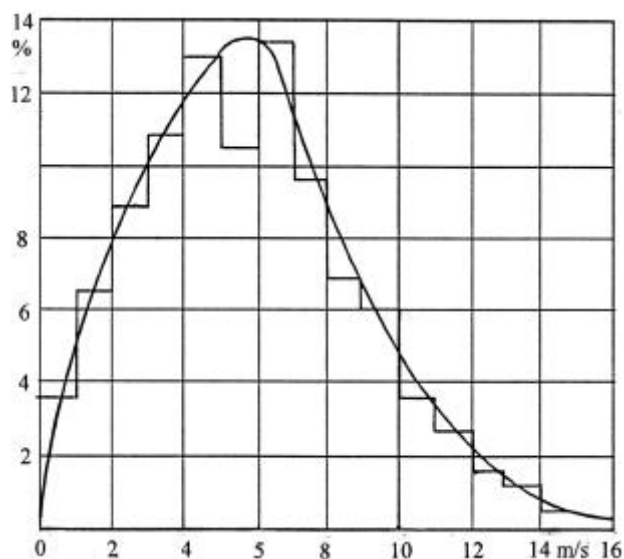
$$P_v = 0,625 \cdot A \cdot v^3 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (11)$$

Od te bruto snage može se iskoristiti samo ona kinetička energija koja odgovara razlici brzine vetra ispred i iza krila vazdušne turbine, pri čemu se može pokazati da je najveća snaga ukoliko je razlika brzina iza turbine (v_2) i ispred turbine (v_1): $v_2/v_1 = 1/3$. Ako se to uzme u obzir, i ako se uvedu i realni koeficijenti korisnog dejstva vetrenjače, koji iznosi prosečno oko 0,65, i generatora, koji iznosi oko 0,8, dobija se električna snaga agregata vetrenjače

$$P_{el} = 0,193 \cdot A \cdot v^3 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (12)$$

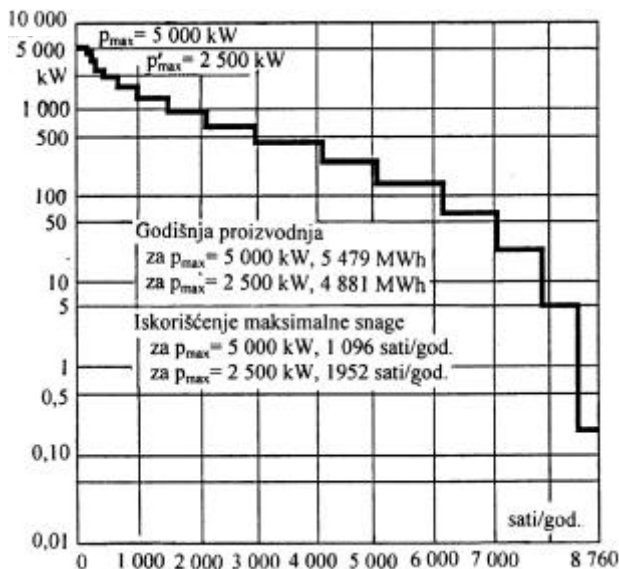
Znači, u jednoj vetrenjači se u električnu snagu može transformisati samo oko 31% od bruto kinetičke snage vetra. Ukoliko se ta snaga prikaže ne preko površine A , već preko očiglednije veličine, prečnika krila vetrenjače D (m), dobija se izraz za električnu snagu vetrenjače:

$$P_{el} = 0,152 \cdot D^2 \cdot v^3 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (13)$$



Slika 2. Tipična kriva frekvencije brzine vetra

Kao što je poznato, ključni problem je velika promenljivost brzine vetra, koja se menja od nule, do preko 30 m/s, ali vrlo retko javljanja i trajanja. Ona se definiše krivama frekvencije (primer na slici 2). Zbog tako velike promenljivosti brzine vetra, iskorišćenje instalisane snage je vrlo malo, što se ilustruje sledećim primerom. Za područje na kome su brzine vetra definisane krivom frekvencije (2), i za prečnik krila $D = 100$ m, maksimalna snaga vetrenjače od oko 5 MW, koja odgovara brzini od 15 m/s, ostvarivala bi se samo 130 sati godišnje (samo 1,5 % vremena!), dok bi se u 50 % vremena razvijala snaga od samo 250 kW (samo 5 % od maksimalne snage!), ili manje od toga, čak i samo oko 0,2 kW. Kriva trajanja ostvarene električne snage, za vetrenjaču sa prečnikom krila $D = 100$ m (neophodno veoma visoko i robusno toranjsko postrojenje!), prikazuje se na slici 3.



Slika 3. Kriva trajanja snage vetrenjače ($D = 100$ m, kriva učestalosti iz slike 2)

Fluktuacije brzine vetra imaju velike praktične reperkusije: uključivanje elektrana na vetar u EES uopšte ne smanjuje instalisanu snagu drugih elektrana, već se svodi na štednju goriva u termoelektanama. Zbog toga se smatra da udeo elektrana sa vazдушnim turbinama ne sme da pređe 6÷8 % instalisane snage u EES, jer bi u protivnom bilo vrlo teško njihovo uklapanje u sistem.

U više zemalja razmatrana je mogućnost masovnijeg građenja eolskih elektrana (EE). Najveće eksperimentalne EE u SAD (Goodnoe Hills) imaju $D = 100$ m, snagu 2,5 MW. Na području Great Plains u SAD bila je planirana gradnja 50 000 EE, na tornjevima visine 300 m, sa elisama $D = 65$ m, in-

stalisanu snage od po 3,5 MW (pri $v = 17$ m/s), sa očekivanom proizvodnjom 8,5 GWh. U pogonu je na hiljade malih EE (snage oko 2÷25 kW), koje snabdevaju usamljene farme, često u "ostrvskom" radu, sa punjenjem akumulatora za slučaj kada nema vetra. U Holandiji je u blizini Lelistada puštena u rad zasad najveća EE, u kompleksu od 35 jedinica, ukupne snage 10,5 MW, koja daje energiju za jedno manje naselje, koje je, naravno, povezano i sa EES.

Međutim, u novije vreme vidljivo opada početni entuzijazam za građenje EE. Razlog? Niska energetska dohodovnost, i velika cena energije. To se može pokazati na sledećem primeru. Jedna dosta reklamirana komercijalna jedinica instalisane snage 25 kW koštala je 25 000 USD, odnosno, 1 USD/W, što je, na prvi pogled, na nivou drugih elektrana. Međutim, čak i na najvetrovitijim mestima Teksasa takva elektrana, u više od 50 % slučajeva, radi sa snagom oko 15 puta manjom od instalisane (to se vidi i na slici 3), te je po tom pokazatelju bar 15 puta skuplja od klasične. Pored toga, ona ne smanjuje potrebu za korišćenjem konvencionalnih izvora energije, tako da se mora investirati i u njih, kao da u EES ne postoje elektrane na vetar. Drugi razlog je još ubedljiviji. Specifični utrošak materijala za elektrane na vetar je mnogostruko veći no u slučaju klasične elektrane. Tako je utrošak čelika po jedinici proizvedene energije u elektrani na vetar oko 140 puta veći nego u slučaju termoelektane, uz znatno veći utrošak i ostalih materijala: betona, bakra, plastike. Kako se za sve te materijale troši energija, potrebno je sračunati vreme vraćanja energije. Takav račun je vrlo nepovoljan za elektrane na vetar. Okvirna računica pokazuje (korišćeni su podaci o utrošcima materijala iz studije EDF-a, 1988), da je vreme vraćanja energije koja je uložena u elektranu na vetar – oko 15 godina! Ukoliko se imaju u vidu i troškovi održavanja, koji takođe odnose energiju koja se mora uneti iz drugih izvora), a da je vek trajanja takve elektrane oko 20 godina, proizilazi da je njen neto energetski učinak veoma mali. I napokon, ekološki aspekti. Ljudi su skloni da EE porede sa prelepim vetrenjačama u Holandiji, koje ukrašavaju pejzaž i sporim okretanjem platenih krila unose dinamizam u prostor. Sa pravim savremenim EE, na visokim tornjevima i sa pravim vazдушnim turbinama, stvar ni izdaleka ne stoji tako romantično. Prava EE stvara buku od 100÷120 dB, izazvanu turbulencijom u zoni turbine, tako da nisu nimalo prijatan sused. Tim pre, što se dobrim delom radi i o frekvencijama iz niskog dela spektra, koje su veoma opasne za nervni sistem. Ako su smeštene u divljini – ta buka trajno otera divljač, koja ima znatno osjetljivija čula od čoveka. Znači, manje EE svakako će se graditi i dalje, posebno za podmirivanje potreba usamljenih potrošača (uda-

ljenih farmi, izolovanih malih naselja i vojnih objekata), ali se zbog njihove niske energetske dohodovnosti ne može očekivati da se njima izvrši značajnija supstitucija primarne energije.

3.3. Energija korišćenja biomasa

Postoji više načina konverzije energije biomasa u korisne oblike energije: (a) neposredno sagoravanje, (b) digestija – prerada otpadaka životinjskog i biljnog porekla u biogas, kao zamena za zemni gas, (c) prerada biomasa u alkohol (etanol), kao zamena za benzin, (d) proizvodnja biljnih ulja kao zamena za dizel. Prva dva načina konverzije su tradicionalna, dok se druga dva tek u novije vreme uvode u upotrebu, uz dosta oprečnih sudova o svrishodnosti takvih zahvata.

Korišćenjem biomasa podmirivane su od pametiveka energetske potrebe pojedinih domaćinstava. Na takav način i sada se koriste za ogrev drvo ili biljni otpaci, dok se stočne izlučevine koriste za stvaranje biogasa u malim digestorima (u Aziji, posebno u Kini i Indiji, ima na milione digestora, uglavnom na seoskim posedima). Tako dobijen biogas može da podmiruje energetske potrebe domaćinstava, a koristi se i za pokretanje poljoprivrednih mašina. Znači, biomase se koriste u tzv. *maloj energetici*, što je sasvim logično, te se ovde neće razmatrati.

Međutim, u novije vreme se dosta govori o korišćenju biomasa u tzv. *velikoj energetici*, bilo za realizaciju većih elektrana na biogas, bilo za masovnu proizvodnju alkohola – etanola (zamena za benzin), bilo za proizvodnju biljnih ulja (zamena za naftu). Primena biomasa u te svrhe mora se podvrći vrlo ozbiljnoj analizi, pre svega sa stanovišta strateške energetske logike. Takva primena je tehnološki jednostavna, ali se postavljaju sledeća pitanja: (a) ima li smisla praviti velika centralizovana postrojenja za energetske iskorišćenje biomasa, u okviru većih proizvodnih jedinica, (b) da li je energetske svrshodno sakupljanje biljnih otpadaka, sa gledišta baznih principa održavanja ekosistema zahvaljujući kruženju materija u njemu, (c) ima li smisla proizvoditi biogas u okviru većih postrojenja, za koja bi se skupljala i transportovala biomasa sa većih prostora, (d) napokon, ima li smisla u energente pretvarati – ljudsku ili stočnu hranu? Ukoliko se uradi ozbiljnija analiza energetske dohodovnosti, odgovori na sva ta pitanja su – negativni!

Veličina proizvodnih jedinica za korišćenje biomasa mora se posmatrati kroz prizmu utroška energije koja je neophodna za koncentraciju biomase na mestu korišćenja. Biljni otpaci (kukuruzovina, slama) imaju malu specifičnu energetske vrednost i zbog toga je besmisleno njihovo prevoženje na veća rastojanja, radi korišćenja u većim termoenergetskim jedinicama. Više bi se utrošilo

nafta na rad traktora i mašina za sakupljanje i prevoz tih otpadaka, no što bi se od njih dobilo energije u elektrani. Uostalom, upravo iz tih razloga mnogo kaloričniji lignit se ne transportuje na veća rastojanja, već se sagoreva u termoelektranama, koje se uvek grade u blizini rudnika.

Sakupljanje otpadnih biomasa mora se posmatrati kroz prizmu izuzetno važnog održavanja proizvodnog potencijala i pedološkog stanja zemljišta. Kao što je poznato, za razliku od energije koja "protiče" kroz ekosistem, *materija – kruži u ekosistemu*. To se posebno odnosi na makro i mikro elemente, koji predstavljaju osnovne nutrijente u procesu biljne proizvodnje. Odnosenje svih biljnih otpadaka sa polja, čak i kada bi to bilo energetski logično (a nije!), dovelo bi do ubrzanijeg siromašenja zemljišta makro i mikro elementima, koji bi morali da budu nadoknađivani pojačanim unošenjem veštačkih đubriva, za čiju se proizvodnju troše izuzetno velike količine energije. S druge strane, biljni otpaci koji se razlažu na poljima, imaju svoju ulogu i sa gledišta održavanja povoljne fizičke strukture zemljišta, što je vrlo bitno sa gledišta poljoprivredne proizvodnje. Može se pokazati da bi radikalno korišćenje biljnih otpadaka upravo na energetskom planu bilo potpuno pogrešna strategija, koja bi imala dva nepovoljna ishoda: (a) dovela bi do osiromašenja zemljišta i kvarenja njegove fizičke strukture, a time i do pada njegove proizvodnje, koja ima energetske ekvivalent, (b) zahtevala bi znatno veći unos veštačkih đubriva, za čiju se proizvodnju troše velike količine energije. Dugoročnije gledano, siromašenje poljoprivrednog zemljišta nelogično je upravo sa energetske stanovišta: više se energije gubi no što se dobija.

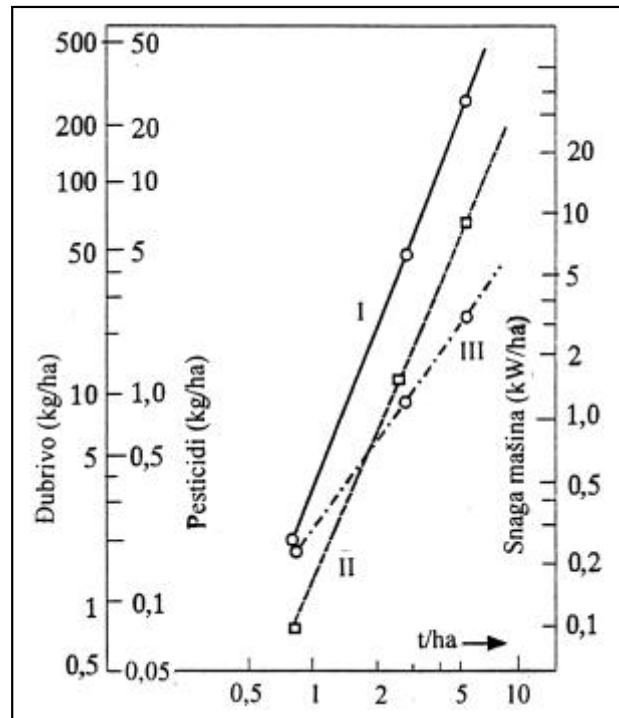
Ima li smisla hranu pretvarati u energiju – suštinski je energetske, ali i etičko pitanje. Proizvodnja etanola i ulja, kojima se delimično može obaviti zamena benzina ili dizela, svodi se na korišćenje energetske najproduktivnijih biljaka – šećerne trske, slatkog sirka, kukuruza, krompira, uljane repice, manioke - koje predstavljaju osnovne sirovine za proizvodnju ljudske hrane, neposredno, ili posredno, preko stočne hrane. I za čiju se proizvodnju troši neobnovljiva energija, pre svega nafta, za pogon poljoprivrednih mašina, kao i gas i električna energija, za proizvodnju veštačkih đubriva i za destilaciju alkohola.

Taj problem se mora razmotriti sa gledišta energetske bilansa. Šećerna trska, koja je energetske najefikasnija biljka, iskorišćava u procesu fotosinteze samo oko 1,4 % sunčeve energije. Iz nje se dobija šećer, koji je sve deficitarnija ljudska hrana. Zbog velike rasutosti sunčeve energije i malog energetske učinka čak i najproduktivnijih biljaka, preradom šećera u etanol dobija se poražavajuće nepovoljan ukupni energetske učinak. Prosečna gustina obnovljive energije koja se može dobiti iz bi-

omase najintenzivnije gajenih šuma (godišnji prirast oko 2÷2,5 %, što iznosi oko 6÷8 m³/ha, pa i 10 m³/ha u intenzivno gajenim šumama ogrevnog drveta) iznosi oko 2 kWh/m² godišnje. Slično je i u slučaju najintenzivnije obrađivanih poljoprivrednih površina, kod kojih se dobijaju poljoprivredni proizvodi čiji je energetska ekvivalentnost oko 1,5÷2 kWh/m² godišnje. Pretvorena u prosečnu snagu, čak i najintenzivnija poljoprivredna proizvodnja iznosi samo oko 0,2 MW/km² godišnje.

Radi očiglednog dokaza energetske nelogičnosti korišćenja biljne proizvodnje za konverziju u tečno gorivo, navode se sledeći bilansni pokazatelji. Ako bi čovečanstvo htelo da izvrši supstituciju energija koju je trošilo pre nekoliko godina (oko 300 kvada, 1 Quad = 293 TWh) energijom biomasa, trebalo bi da ima tri puta veće poljoprivredne površine no što ih ima na planeti Zemlji, i da ih isključivo koristi samo za proizvodnju sirovina za preradu u energiju!

Energetska besmislica strateške orijentacije da se bioenergija masovno pretvara u druge energetske vidove (pre svega, u zamene za derivate nafte – etanol i biljna ulja), dobija pravu konotaciju tek kada se napravi energetska bilans. Povećanje poljoprivredne proizvodnje, radi ublažavanja problema gladi, čovečanstvo je rešavalo – sve većim unošenjem energije u proizvodnju. Početkom ovog veka, u ekstenzivnoj poljoprivredi, čovečanstvo je u proseku za dobijanje jednog džula hrane trošilo oko jedan džul energije. Sada se u proseku troši 10 J energije radi dobijanja 1 J hrane (se tendencijom daljeg pogoršavanja tog odnosa), što rečito govori da je poljoprivreda jedan od najvećih potrošača energije. *Stalno povećanje specifičnog unosa energije u poljoprivrednu proizvodnju – to je tajna "zelene revolucije"*, kojom je u drugoj polovini XX veka donekle ublažen problem hrane i gladi u svetu. To važi za sve poljoprivredne kulture, pa i kulture iz kojih se može dobijati energija. To se očigledno vidi na slici 4, na kojoj je prikazana zavisnost prinosa žitarica (Odum, 1977) od primene veštačkih đubriva, pesticida i utrošene specifične snage mašina. Zapaža se jedan veoma idikativan podatak: da bi se udvostručio prinos, potrebno je za nekoliko puta povećati unošenje energije, preko đubriva, pesticida i potrebne snage poljoprivrednih mašina. Zbog toga je naivno, ali i opasno mišljenje da će se borba za hranu dobiti samo genetskim inženjerstvom. Zaboravlja se na ogromne količine energije koje se moraju stalno unositi u poljoprivrednu proizvodnju iz systemske okoline, neposredno, preko rada mašina, ili posredno, preko đubriva i ostalih unetih materija, radi podrške tih nestabilnih, genetski "dopingovanih" agrocenoza, koje mogu da daju visoke prinose samo u "energetskom blagostanju".



Slika 4. Zavisnost prinosa žitarica od primene đubriva (I), snage mašina (II) i pesticida (III)

Energetska "glad" pri proizvodnji hrane vidi se iz sledećeg bilansa. Za 1t žita sada se troši preko 1 700 kWh energije, od čega oko 450 kWh za pogon mašina, oko 250 kWh za proizvodnju tih mašina, oko 510 kWh za proizvodnju azotnih đubriva (ogromni "gutač" energije!), itd. Analizirajmo sada energetska (ne)logičnost proizvodnje etanola kao zamene za pogonsko gorivo. Iz 1t šećerne trske, energetska najrentabilnije kulture, može se dobiti oko 100 kg šećera, a od te količine šećera dobija se samo oko 50 l etanola, pogodnog za gorivo. Bilans je energetska poražavajući: za proizvodnju se utroši ne manje od 1 500 kWh energenata – najvećim delom iz neobnovljivih izvora, pre svega – nafte, dok je energetska vrednost tog goriva samo oko 700 kWh! Čista energetska besmislica, sa gledišta bilansa energije unete u proizvodnju i dobijene na izlazu iz čitavog proizvodnog procesa konverzije bioenergije u tečno gorivo.

Zato se može nedvojbeno zaključiti u vezi korišćenja bioenergenata. (a) Pretvarati dragocenu hranu u neki tečni ili bilo kakav drugi energent – nerazumno je upravo sa energetske stanovišta, jer se znatno više neobnovljive energije mora uneti u proizvodnju, no što se može dobiti od proizvedenog alkohola ili ulja. Strateški gledano, problem se može rezimirati potpuno suprotno: *ne treba proizvoditi energiju na račun proizvodnje hrane, već obrnuto, potrebno je obezbediti energiju da bi mogla da se proizvodi hrana!* (b) Upotreba biomasa za energetske svrhe ima smisla samo na nivou tzv. male

energetike, na nivou domaćinstava, ili manjih grupa potrošača. Realizacija velikih postrojenja, za koja je potrebno sakupljati biomase na širim prostorima i transportovati ih do centralnog postrojenja – nema smisla zbog velikog utroška energije za sakupljanje i transport. (c) Sa sakupljanjem biljnih otpadaka sa njiva treba biti vrlo obazriv, zbog osiromašenja zemljišta, jer se time radikalno narušava dragocen proces kruženja materija u ekosistemu, čime se uništava proizvodni potencijal zemljišta, koji mora da bude kompenziran unošenjem nutrijenata (a time i energije!) sa strane. (d) Pri korišćenju bioenergije treba ići na što manji broj energetskih transformacija. Konverzija na relaciji: *biomase* → *biogas* → *električna energija*, ima smisla samo na mestima gde je, iz nekih drugih razloga, koncentrisana velika količina otpadnih organskih materija (velike stočne farme, postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, u kojima se proces prečišćavanja mulja preostalog u procesu prečišćavanja mora završiti u digestorima, u kojima se kao nusprodukt stvara i biogas, koji se može iskoristiti za proizvodnju električne energije, itd).

4. ZAKLJUČAK

U analize domena iskoristivosti obnovljivih izvora energije moraju se uvesti objektivni pokazatelji, koji će bilansirati sve energije koje se utroše i/ili izgube u procesu izrade proizvodnih uređaja, kao i tokom korišćenja energetskih objekata, s jedne strane, i energetskih prihoda koji se ostvare tokom eksploatacije, sa druge strane. Uvedena su tri pokazatelja: (1) vreme vraćanja primarne energije utrošene za građenje postrojenja (θ_v), (2) vreme vraćanja energije za izgradnju i održavanje postrojenja (θ_1), (3) indeks strateškog prioriteta izvora energije i/ili investicionih mera štednje (ISP). U radu su analizirana tri najčešće korišćena izvora obnovljive energije: energija Sunčevog zračenja, energije vetra i energija korišćenja biomasa. Analizom tih izvora energije, uz primenu uvedenih pokazatelja, pokazuje se da je njihova primena neosporno korisna u tzv. "maloj energetici", na nivou domaćinstava i manjih grupa potrošača, dok je primena u tzv. "velikoj energetici" (ili, energetici "visokih temperatura") veoma

dubiozna, zbog velikih utrošaka energije za proizvodnju i eksploataciju postrojenja za konverziju u električnu energiju. U tom svetlu treba gledati i na preporuku EU da se postepeno povećava udeo obnovljive energije u energetskim bilansima: to povećanje treba prevashodno ostvarivati korišćenjem energetski racionalnih uređaja, kojima se ostvaruje supstitucija energije koju potrošači preuzimaju iz velikih sistema.

U drugom delu ovog članka, u narednom broju časopisa, razmatraće se ostali obnovljivi izvori energije i daće se detaljniji zaključci o strateškim pravcima korišćenja.

5. LITERATURA

- [1] Bartelnus, P.: ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, RSC., London, 1986.
- [2] Daniels, F.: DIRECT USE OF THE SUN'S ENERGY, Ballantine Books, NY, 1988.
- [3] Dorf, R.C.: THE ENERGY FACTBOOK, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [4] EDF, BULLETIN N° 4, 1988.
- [5] Gulliver, J.S.: HYDROPOWER ENGINEERING HANDBOOK, McGraw-Hill, 1991.
- [6] Đorđević, B.: VODOPRIVREDNI SISTEMI, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [7] Djordjevic, B.: CYBERNETICS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT, WRP, Fort Collins, 1993.
- [8] Đorđević, B.: HIDROENERGETIKA JUGOSLAVIJE – STANJE I PRAVCI DALJEG RAZVOJA, *Energija*, 1998.
- [9] Lambert, M.: FUTURE SOURCES OF ENERGY, Hove, 1986.
- [10] Odum, E.P.: FUNDAMENTALS OF ECOLOGY, W.B.Saunders Co., London, 1977.
- [11] Paar, V.: ENERGETSKA KRIZA, Školska knjiga, Zagreb, 1984.
- [12] Požar, H.: OSNOVE ENERGETIKE, I i II, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [13] Ristić, M.: OPŠTA ENERGETIKA, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- [14] Stojić, P.: HIDROENERGETIKA, Građevinski fakultet, Split, 1995.
- [15] Udovičić, B.: ELEKTROENERGETIKA, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [16] Watson, D.: ENERGY CONSERVATION THROUGH BUILDING DESIGN, McGraw-Hill, 1989.

Veselin Ilić,
Milenko Đurić, Aleksandar Čukarić

Testiranje algoritma za detekciju kratkih spojeva u sekundaru monofaznih energetskih transformatora pomoću laboratorijskih snimaka kvarova

Originalni naučni rad
UDK: 621.3.04;621.3.064.1

Rezime:

U ovom radu su prikazani rezultati testiranja numeričkog algoritma za detekciju kratkih spojeva u sekundaru monofaznog transformatora, opisanog u referenci [1], pomoću laboratorijskih snimaka električnih kvarova. Na konkretnom primjeru obavljena su mjerenja na fizičkom modelu monofaznog transformatora sa snimljenim strujnim i naponskim signalima u laboratorijskim uslovima. Eksperimentalna mjerenja u realnom vremenu, na fizičkom modelu monofaznog transformatora, izvedena su u Visokonaponskoj laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i tom prilikom je potvrđena efikasnost predloženog algoritma [1]. Cilj istraživanja na razvoju numeričkih algoritama za digitalne zaštite energetskih transformatora, koji obuhvataju otpor električnog luka na mjestu kvara, je bio da se dođe do bržih, tačnijih i pouzdanijih algoritama u odnosu na postojeće. Da se u tome, za sada, jednim dijelom uspješno, potvrđuju rezultati eksperimenata, koji su prezentirani u ovom radu.

Ključne riječi: zaštita transformatora, laboratorijski kvar preko električnog luka, transformator

Abstract:

TESTING OF ALGORITHM FOR SHORT CIRCUIT DETECTION IN MONOPHASE POWER TRANSFORMER SECONDARY BY MEANS OF LABORATORY RECORDS OF FAULTS

This paper shows the testing results of numerical algorithm for short circuit detection in monophas power transformer secondary by means of laboratory records of faults. Measurements were carried out on the specific example of a physical model of monophas transformer with recorded current and voltage signals under laboratory conditions. Experimental measurements in real time, on a physical model of monophas transformer, were carried out at the High-voltage Laboratory of the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade, whereby conforming the efficiency of the proposed algorithm [1]. The purpose of research in the sphere of development of numerical algorithms for digital protection of power transformers, including electric arc resistance at the place of fault, was to get to faster, more accurate and more reliable algorithms compared to the existing ones. That, at present, the experiment results presented in this paper, are successfully presented in one part.

Key words: transformer protection, laboratory fault through electric arc, transformer

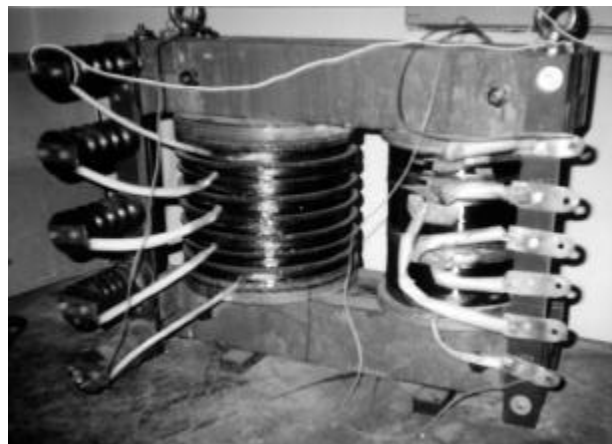
Mr Veselin Ilić, dipl. ing. el. – Elektroprivreda Crne Gore A.D., "Elektroprenos" TS 220/110/35 kV/kV/kV, 84205 Mojkovac
Prof. dr Milenko Đurić – Elektrotehnički fakultet, 11000 Beograd, Bulevar revolucije 73
Mr Aleksandar Čukarić – Elektrotehnički fakultet, 38000 Priština

1. UVOD

Intenzivan razvoj mikroprocesorske tehnologije i njena praktična primjena u elektroenergetici dali su podstrek za istraživanja u oblasti razvoja numeričkih algoritama u relejnoj zaštiti EES-a. Da bi numerički (digitalni) algoritmi ušli u komercijalnu primjenu, neophodno je efikasnost predloženih metoda potvrditi, osim testiranjima kompjuterskim simulacijama kvarova i testiranjima pomoću laboratorijski snimljenih signala u realnom vremenu, a po mogućnosti i testiranjima u realnom sistemu.

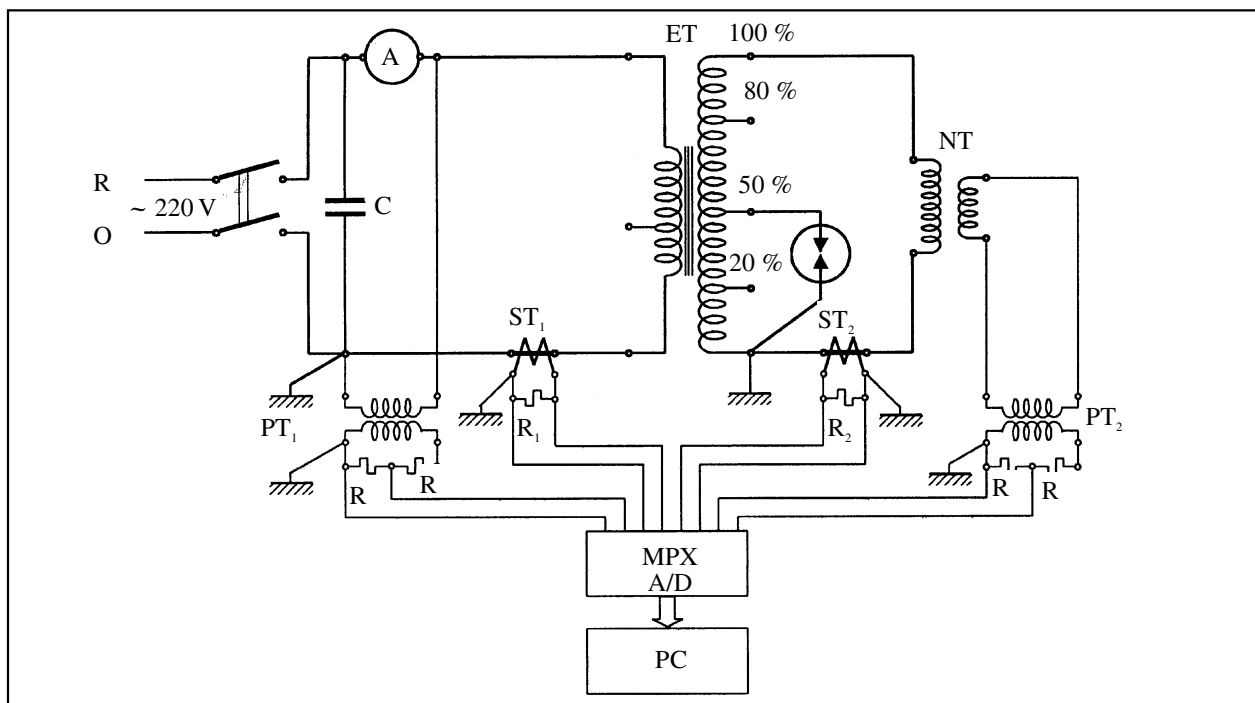
U ovom radu su prikazani realizacija i rezultati testa pomoću strujnih i naponskih signala snimljenih u laboratorijskim uslovima. Snimanja u laboratoriji su obavljena na fizičkom modelu monofaznog transformatora: $S_n = 100 \text{ VA}$, $U_{1n}/U_{2n} = 220/5 \text{ V/V}$, $R_1 = 0,132 \Omega$, $R_2 = 153 \Omega$, $L_1 = 0,025 \text{ H}$, $L_2 = 16,342 \text{ H}$ i $u_k = 3,45 \%$ – slika 1. Električni luk je formiran na visokonaponskoj strani (u sekundarnom namotaju) transformatora između gvozdjenih elektroda, kako u vazduhu, tako i u trafo ulju, uz pomoć posude, prikazane na slici 1.

Šema veza za snimanje struja i napona za različite režime rada monofaznog transformatora (puštanje u rad transformatora, normalni režim rada i prelazni procesi tokom kvarova u sekundarnom namotaju), prikazana je na slici 2.



Slika 1. Fotografija fizičkog modela monofaznog transformatora

Kao što se vidi sa slika 1 i 2, na sekundarnom namotaju transformatora urađeni su izvodi na $0,2 N_2$; $0,5 N_2$ i $0,8 N_2$ navojaka. Na osnovu izloženog u referenci [1] napravljen je softver za zaštitu od kratkih spojeva u sekundarnom namotaju monofaznog transformatora. Naponi $u_1(t)$ i $u_2(t)$, struje $i_1(t)$ i $i_2(t)$ digitalizovani su sa laboratorijskim test kolom, koje sadrži sistem za akviziciju podataka i analogno-digitalni A/D konvertor, smeštene na istoj kartici koja je postavljena na ekspanzioni port PC računara. Pri mjerenju je korišćena A/D kartica



NT – naponski transformator 6/0,1 kV/kV; PT₁ – pomoćni transformator 220/3 V/V; PT₂ – pomoćni transformator 220/9 V/V; ST₁ – strujni transformator 18/26; ST₂ – strujni transformator 90/12; ET – energetski transformator 220(380)/6 000(10 000) V/V; R – otpornik 100 Ω; R₁ – etalon otpornik 0,5 Ω; R₂ – etalon otpornik 10 Ω; C – kondenzator 2 μF, 2 kV

Slika 2. - Laboratorijska šema veze

rezolucije 12 bita sa 16 nesimetričnih i 8 diferencijalnih ulaznih kanala. Ulazni signali mogli su da budu samo naponi najvećeg opsega ± 10 V. Vrijeme konverzije ovog A/D konvertora je manje od 28 μ s po kanalu. Brzina uzorkovanja se može regulisati, a pri eksperimentalnom mjerenju rađeno je sa 50 odbiraka u jednoj periodi osnovne učestanosti.

Strujni šantovi su etalon otpornici R_1 i R_2 sa čijih krajeva su uzeti strujni signali proporcionalni strujama primara i sekundara šticećenog monofaznog transformatora ET. Primjenom pomoćnog transformatora PT_1 i omskog djelitelja napona R-R signal napona sa primarne strane šticećenog transformatora ET uveden je u A/D konvertor. Pomoću naponskog transformatora NT, pomoćnog transformatora PT_2 i omskog djelitelja napona R-R signal napona, sa sekundarne strane šticećenog transformatora ET, uveden je u A/D konvertor.

2. TESTIRANJE ALGORITMA POMOĆU LABORATORIJSKIH SNIMAKA KVAROVA

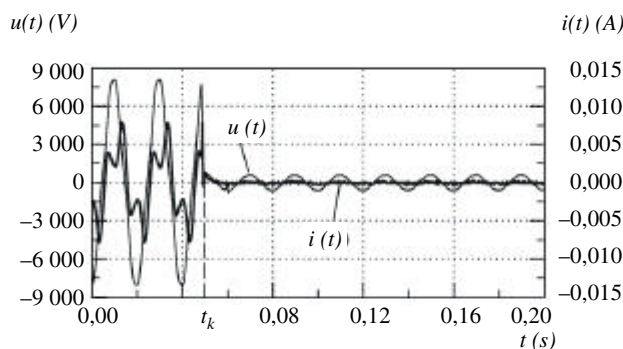
Da bi se potvrdila mogućnost primjene ovog algoritma i njegova konvergencija za vrijeme prelaznog procesa tokom kvara, korišćen je fizički model monofaznog transformatora, a snimanje strujnih i naponskih signala obavljeno je u Visokonaponskoj laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Algoritam koristi osnovne parametre (omske otpore i induktivnosti namotaja primara i sekundara) i prenosni odnos (njegovu recipročnu vrijednost - m_{21}) transformatora, kao i izmjerene vrijednosti napona i struja sa primarne i sekundarne strane. Zapamćene datoteke (fajlove) snimljenih signala bili su osnova za kompjutersku provjeru, te uz primjenu optimizacione metode minimizacije srednjeg kvadratnog odstupanja, izračunavani su nepoznati parametri modela [1]: relativni položaj mjesta kvara na sekundaru i amplituda napona luka. Iz cijelog "paketa" laboratorijskih testova, u ovom radu su prikazani samo neki rezultati:

1. Metalni kvar na mjestu $\beta = 0,5$ - slika 4.
2. Metalni kvar na mjestu $\beta = 0,8$ - slika 6.
3. Kvar sa električnim lukom u vazduhu na mjestu $\beta = 0,5$ - slika 8.
4. Kvar sa električnim lukom u vazduhu na mjestu $\beta = 0,8$ - slika 10.
5. Kvar sa električnim lukom u ulju na mjestu $\beta = 0,5$ - slika 12.
6. Kvar sa električnim lukom u ulju na mjestu $\beta = 0,8$ - slika 14.

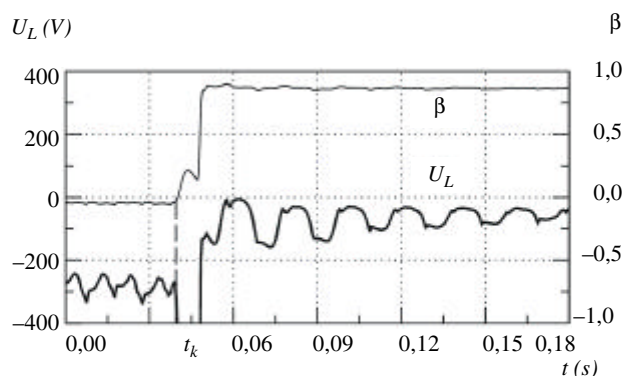
Za trenutak nastanka kvara uzet je proizvoljan trenutak t_k . Transformator je prije nastanka kvara bio opterećen jedino sa mjernim naponskim transformatorom NT - slika 2, što je blizu režima pra-

znog hoda (struja $i_2(t)$ je mala, te je i vremenska konstanta njene jednosmjerne komponente zanemarljiva). Napon i struja sekundara, snimljenih u laboratorijskim uslovima za različite vrste i mjesta kvarova na sekundarnom namotaju, dati su na slikama: 3, 5, 7, 9, 11 i 13.

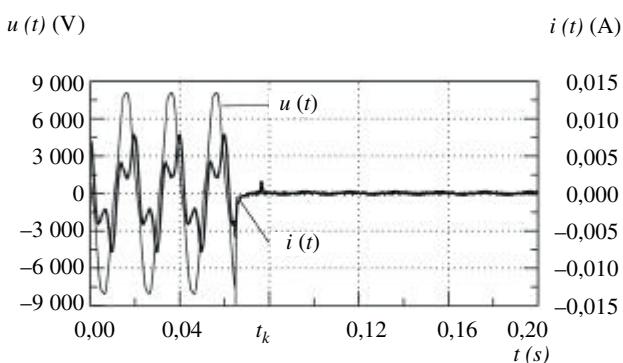
Izlazi algoritma, tj. estimirane vrijednosti nepoznatih parametara, dati su na slikama: 4, 6, 8, 10, 12 i 14.



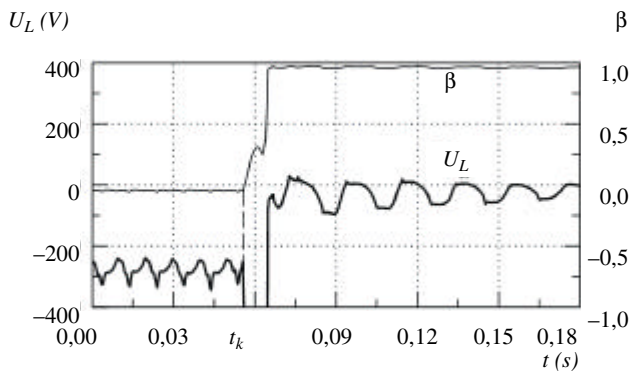
Slika 3. Laboratorijski snimljeni napon i struja u sekundaru pri metalnom kratkom spoju na $\beta = 0,5$



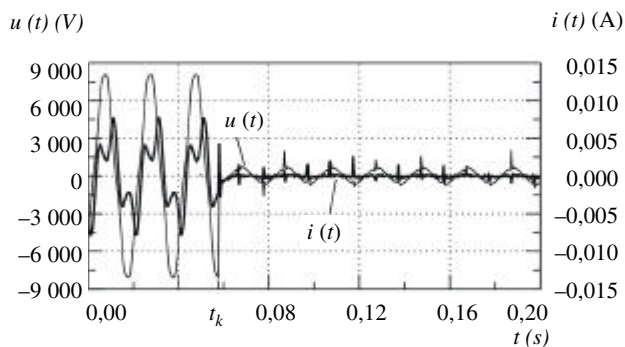
Slika 4. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za metalni kvar na $\beta = 0,5$, dobijeni pomoću algoritma baziranog na metodi najmanjih kvadrata



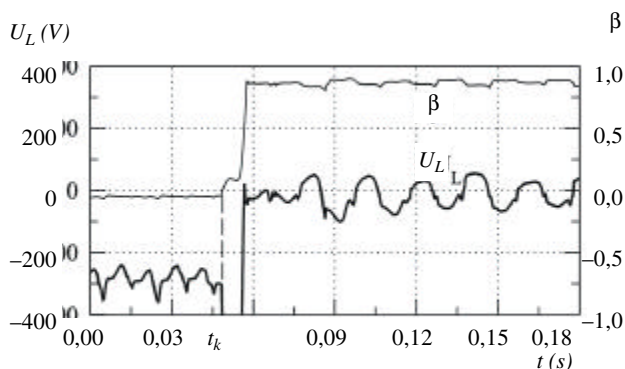
Slika 5. Laboratorijski snimljeni napon i struja u sekundaru pri metalnom kratkom spoju na $\beta = 0,8$



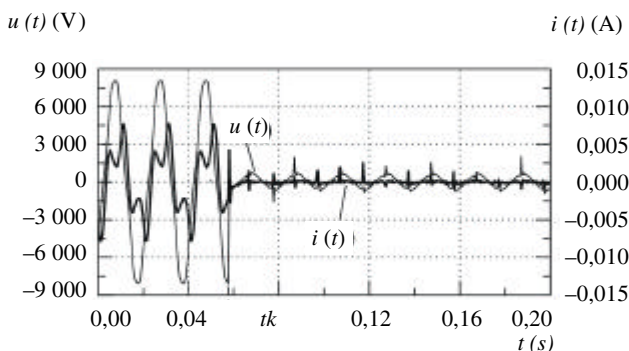
Slika 6. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za metalni kvar na $\beta = 0,8$, dobijeni pomoću algoritma baziranog na metodi najmanjih kvadrata



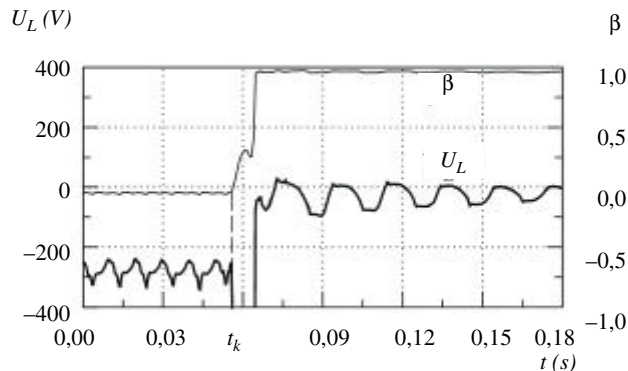
Slika 7. Laboratorijski snimljeni napon i struja u sekundaru pri kvaru sa električnim lukom u vazduhu na $\beta = 0,5$



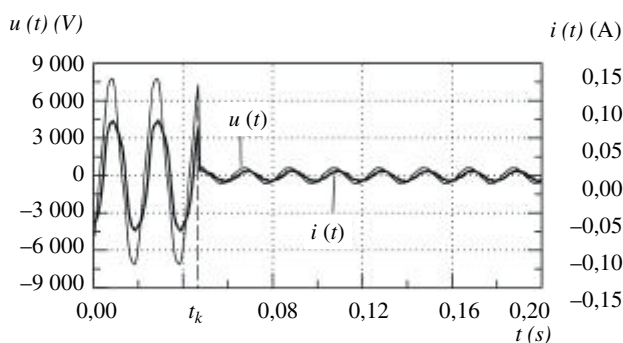
Slika 8. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u vazduhu na $\beta = 0,5$, dobijeni pomoću algoritma baziranog na metodi najmanjih kvadrata



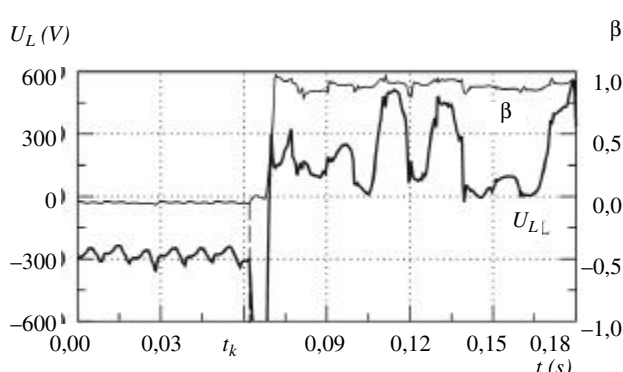
Slika 9. Laboratorijski snimljeni napon i struja u sekundaru pri kvaru sa električnim lukom u vazduhu na $\beta = 0,8$



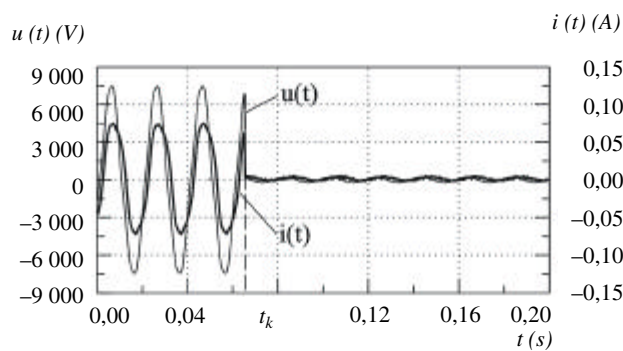
Slika 10. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u vazduhu na $\beta = 0,8$, dobijeni pomoću



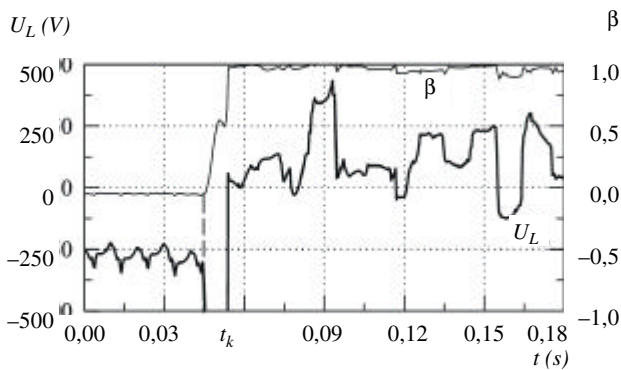
Slika 11. Laboratorijski snimljeni napon i struja u sekundaru pri kvaru sa električnim lukom u ulju na $\beta = 0,5$



Slika 12. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u ulju na $\beta = 0,5$, dobijeni pomoću algoritma baziranog na metodi najmanjih kvadrata



Slika 13. Laboratorijski snimljeni napon i struja u sekundaru pri kvaru sa električnim lukom u ulju na $\beta = 0,8$



Slika 14. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lucni kvar u ulju na $\beta = 0,8$, dobijeni pomoću algoritma baziranog na metodi najmanjih kvadrata

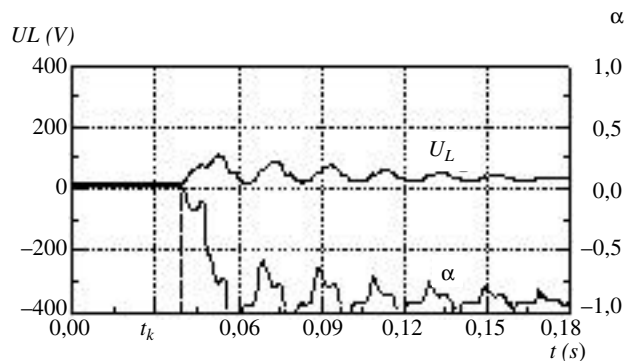
Prikazani rezultati dobijeni su korišćenjem prozora podataka dužine $T_{dw} = 10$ ms sa 25 odbiraka u prozoru. Drugim riječima, frekvencija odabiranja je bila 2,5 kHz.

Iz estimiranih parametara laboratorijskih testova, prikazanih na slikama: 4, 6, 8, 10, 12 i 14, te uz primenu metode najmanje kvadratne greške (kada je transformator tretiran kao da je linearan; treba imati u vidu da permeabilnost gvožđa zavisi od jačine magnetnog polja, a fluksevi rasipanja po navojku svih namotaja se razlikuju, jer su navojci međusobno različiti i magnetno polje realnog namotaja nije homogeno) može se zaključiti da numerički algoritam za detekciju kvarova na sekundaru monofaznog transformatora, opisan u referenci [1], nije precizno estimirao mjesto kvara β . Međutim, činjenica je da ovaj algoritam za sve kvarove, pa i za kvarove opisane u ovom radu, daje rezultate za β u intervalu: $0 < \beta \leq 1$, te da će ovaj nepoznati parametar modela, kao najbitniji za detekciju električnih kvarova u sekundarnom namotaju, dati nalog za isključenje transformatora. Što se tiče amplitude napona luka U_L , estimirane vrijednosti ovog parametra su nestabilne, kao posljedica nelinearnosti transformatora (uticaj viših harmonika). Isto tako, numerički algoritam, opisan u [1] zadovoljava u pogledu brzine konvergencije (10 ms) i neosetljiv je na prisustvo jednosmjerne komponente u struji $i_l(t)$ (čija vremenska promjena nije data zbog obilnosti referata), što znači da ova komponenta nije produžila vrijeme isključenja transformatora iz pogona.

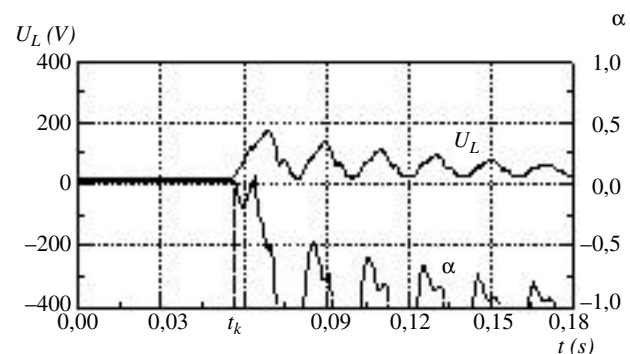
Postavlja se pitanje: šta "vidi" numerički algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru [1] pri pojavi električnih kvarova na sekundaru? Na slikama 15, 16, 17, 18, 19 i 20 date su izračunate vrijednosti mjesto kvara α i U_L , koji se odnose na algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru, za sve kvarove navedene u ovom radu (počev od stavke 1 zaključno sa stavkom 6). Svi dobijeni rezultati pokazuju da je, pri kvarovima u sekundar-

nom namotaju, relativni položaj mjesta kvara na primaru uvijek bio $\alpha < 0$, što potvrđuje da kvar nije na primaru, već da je na sekundaru. Znači, numerički algoritmi, opisani u [1], su selektivni.

Poznato je da se za zaštitu energetskih transformatora još uvijek koristi elektromehanička ili elektronski stabilisana diferencijalna zaštita koja koristi harmonijsku blokadu kao prevenciju isključenja pri uključenju transformatora (energizacija transformatora, koju prati pojava velike udarne struje magnećenja).

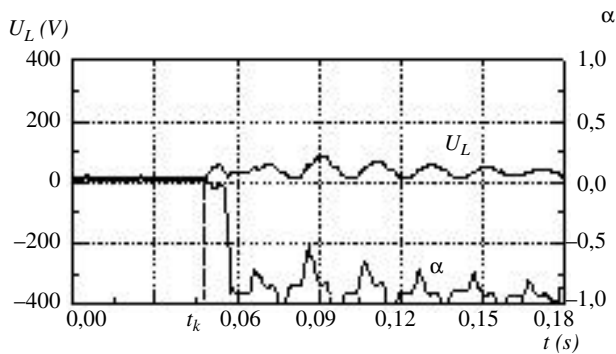


Slika 15. Estimirane vrijednosti α i U_L u laboratorijskom testu, koje "vidi" algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru za metalni kvar na sekundaru – $\beta = 0,5$, dobijene pomoću metode najmanjih kvadrata

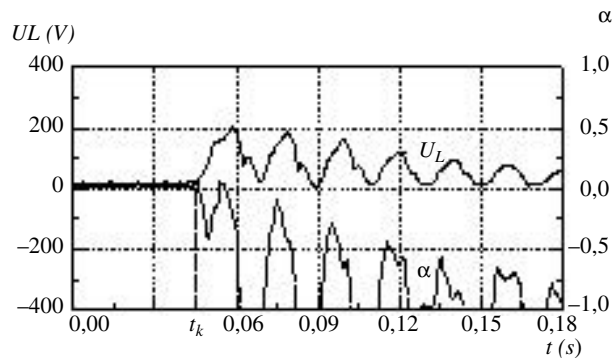


Slika 16. Estimirane vrijednosti α i U_L u laboratorijskom testu, koje "vidi" algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru za metalni kvar na sekundaru – $\beta = 0,8$, dobijene pomoću metode najmanjih kvadrata

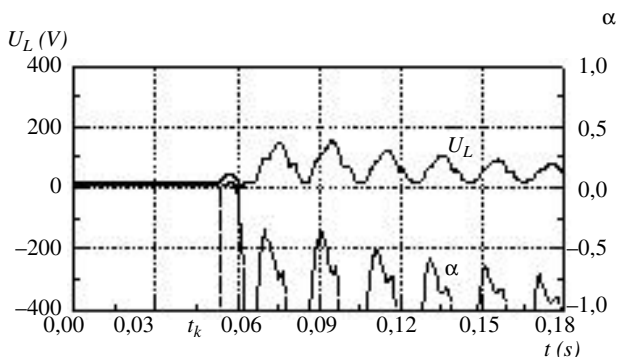
Kako je u radu dat jedan nov pristup detekcije električnih kvarova u monofaznim transformatorima, valjanost algoritama, opisanih u [1], morala se provjeriti i za režim puštanja transformatora u prazan hod. Na slici 21 dati su napon i struja primara, pri puštanju u rad transformatora, snimljenih u laboratorijskim uslovima. Izlazi algoritama za ovaj režim dati su na slikama 22 i 23. Prepoznatljivo je, sa ovih slika, da parametri α i β , pri puštanju transformatora u režim praznog hoda, osciluju oko $\alpha = 0$, i $\beta = 0$, što ukazuje na to da je postignuta prevencija isključenja pri uključenju transformatora na mrežu.



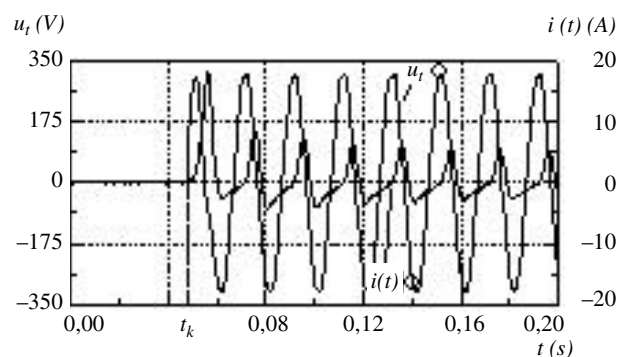
Slika 17. Estimirane vrijednosti α i U_L u laboratorijskom testu, koje „vidi” algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru za lučni kvar u vazduhu na sekundaru - $\beta = 0,5$, dobijene pomoću metode najmanjih kvadrata



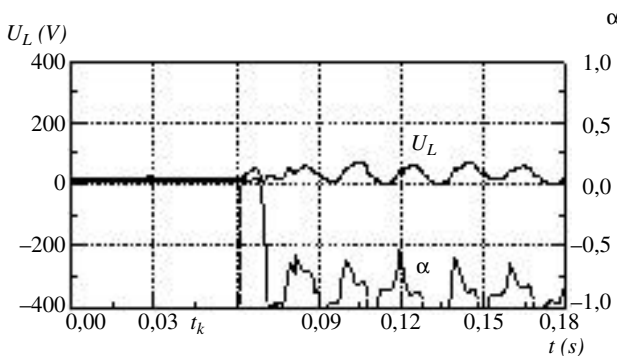
Slika 20. Estimirane vrijednosti α i U_L u laboratorijskom testu, koje „vidi” algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru za lučni kvar u ulju na sekundaru - $\beta = 0,8$, dobijene pomoću metode najmanjih kvadrata



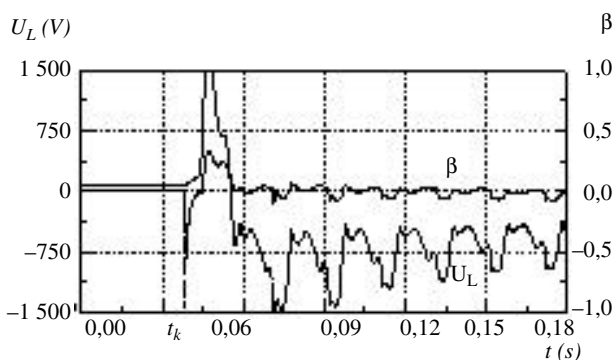
Slika 18. Estimirane vrijednosti α i U_L u laboratorijskom testu, koje „vidi” algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru za lučni kvar u vazduhu na sekundaru - $\beta = 0,8$, dobijene pomoću metode najmanjih kvadrata



Slika 21. Laboratorijski snimljeni napon i struja na primaru pri puštanju transformatora u režim praznog hoda



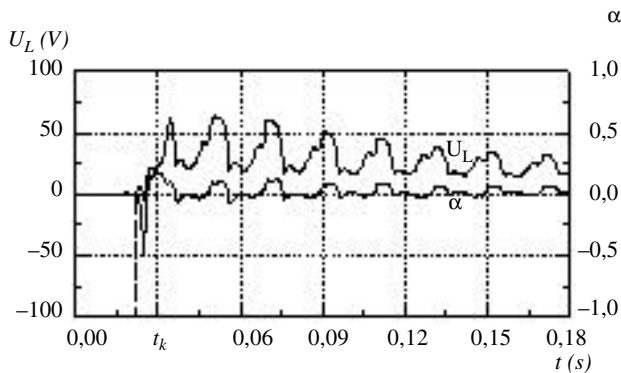
Slika 19. Estimirane vrijednosti α i U_L u laboratorijskom testu, koje „vidi” algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru za lučni kvar u ulju na sekundaru - $\beta = 0,5$, dobijene pomoću metode najmanjih kvadrata



Slika 22. Estimirane vrijednosti β i U_L u laboratorijskom testu, koje „vidi” algoritam za detekciju kratkih spojeva na sekundaru pri puštanju transformatora u režim praznog hoda

Svi dobijeni rezultati su nedvosmisleno ukazali da su autori rada morali dalja istraživanja usmjeriti na otkrivanju uzroka netačnosti estimirane vrijednosti parametra β . Pokazalo se da na dobijene rezultate nemaju značajan uticaj omske otpornosti

namotaja. Dominantan uticaj na tačnost algoritma, opisanog u referenci [1] ima reaktansa (induktansa) rasipanja dijela namotaja koji nije pogođen kvarom - $L_{2(1-\beta)}$. Naime, autori su tražili jednostavnije matematičke relacije, iz algoritma opisa-



Slika 23. Estimirane vrijednosti α i U_L , u laboratorijskom testu, koje „vidi“ algoritam za detekciju kratkih spojeva na primaru pri puštanju transformatora u režim praznog hoda

nog u [1], koje će uvažiti činjenicu da je $R_2 \approx 0$ i $i_2 \approx 0$. Tako se pošlo od relacija (37) i (41) [1]. Iz relacije (37), uz $R_2 \approx 0$, dobijeno je:

$$L_{\mu} \frac{di_2}{dt} = -\frac{u_2}{m_{21}^2} - \frac{L_2}{m_{21}^2} \frac{di_2}{dt} - \frac{L_2}{m_{21}^3} \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

a iz relacije (43), uz $i_2 \approx 0$, struja luka ima oblik:

$$i_L = \frac{i_1}{\beta m_{21}} \quad (2)$$

Zamjenom relacija (1) i (2) u relaciju (38) [1] slijedi:

$$-\frac{L_2}{m_{21}} \frac{di_1}{dt} = u_L - \beta u_2 - \frac{\beta L_2}{m_{21}} \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

U radu [1], za linearni transformator uzeto je $L_{2L} = \beta \cdot L_2$. Ako umjesto $\beta \cdot L_2$ stavimo L_{2L} , i tako odstupimo od koncepta linearnosti, relacija (3) dobija oblik:

$$-\frac{(L_2 - L_{2L})}{m_{21}} \frac{di_1}{dt} = u_L - \beta u_2 \quad (4)$$

Sa slike 5 (u radu [1]) jasno je da važi:

$$L_{2(1-\beta)} = L_2 - L_{2L} \quad (5)$$

Da bi odredili analitički izraz funkcije $L_{2(1-\beta)} = f(\beta)$, relacija (4), stavljajući za metalne kvarove $u_L = 0$, je prevedena u kompleksni domen, odnosno napisana je preko efektivnih vrijednosti:

$$L_{2(1-\beta)} = \frac{m_{21} \beta U_2}{\omega I_1} = \frac{m_{21} U_{2mjer.}}{\omega I_{1mjer.}} \quad (6)$$

Kako smo u laboratorijskim uslovima snimili signale u_2 i i_1 , to smo iz stacionarnog stanja metalnih kratkih spojeva, za svako β , očitali $U_{2mjer.} = \beta \cdot U_2$ i $I_{1mjer.}$. Tako dobijeni podaci su dati u tabeli 1.

Tabela 1.

β	0,2	0,5	0,8
$\beta \cdot U_2$ (V)	1 365,17	603,8	156,93
$I_{1mjer.}$ (A)	16,751	17,506	18,373
$L_{2(1-\beta)}$ (H)	6,574 19	2,779 64	0,689 01

Na osnovu tabelarnih podataka dobijene su tri tačke, sa koordinatama (β ; $L_{2(1-\beta)}$), i kroz njih je "provučena" parabola oblika:

$$L_{2(1-\beta)} = a\beta^2 + b\beta + c \quad (7)$$

Jednačina te parabole je:

$$L_{2(1-\beta)} = 9,468 2\beta^2 - 19,276 8\beta + 10,050 8 \quad (8)$$

S obzirom na to da je u radu [1] odstranjen „offset“ signala, u odnosu na normalni režim rada, to je ipak uočena izvjesna nesimetrija napona u_2 , kako u toku prelaznog procesa, tako i u toku stacionarnog kratkog spoja. Ove greške na A/D kartici, pa samim tim i izvjesno "osipanje" podataka u signalu u_2 (raspolagali smo sa manje skromnom opremom, zbog ekonomskih poteškoća) dozvolile su da jednačinu parabole (8) translatorno pomjerimo u pravcu ($-L_{2(1-\beta)}$) ose, i tako dobijemo konačnu parabolu:

$$L_{2(1-\beta)} = 8,968 2\beta^2 - 18,776 8\beta + 9,550 8 \quad (9)$$

Treba naglasiti da član $\frac{L_{2(1-\beta)}}{m_{21}} \frac{di_1}{dt}$, u jednačini (4), ima prirodu elektromotorne sile, koja se indukuje u dijelu namotaja sekundara koji nije pogođen kvarom.

Sa jednačinom (7) "ušlo" se u jednačinu (4):

$$-\frac{(a\beta^2 + b\beta + c)}{m_{21}} \frac{di_1}{dt} = u_L - \beta u_2 \quad (10)$$

Sređivanjem relacije (10) i uzorkovanjem napona u_2 i struje i_1 u konačnom obliku se dobila nelinearna jednačina po nepoznatim parametrima modela β i U_L .

Posebna klasa algoritma za obradu signala, za razliku od metode najmanjih kvadrata, koji ispunjava traženi zahtjev izračunavanja nepoznatih parametara procesiranog signala iz nelinearne jednačine (10) bazirana je na Newton-Raphsonovoj metodi [2]. U opštem slučaju, osnovna poteškoća kod primjene ovog algoritma sastoji se u izboru početnog rješenja β_0 i U_{L0} , a sa kojim se obezbjeđuje konvergencija iterativnog procesa. Međutim, kako je relativni položaj mjesta kvara na sekundaru $0 < \beta \leq 1$ a za metalne kvarove $U_L = 0$, to se za startovanje Newton-Raphsonovog algoritma za početno rješenje, u prvom prozoru podataka uzelo

$\beta_0 = 0,5$ i $U_{L0} = 0$, koji su obezbijedili konvergenciju iterativnog postupka.

Uzimajući N naponskih i $N+2$ strujnih uzoraka, te izračunavajući izvode struja kao u [1], za n -ti uzorak jednačinu (10) možemo napisati u kraćoj formi:

$$U_L S_n + \beta u_{p1n} + \beta^2 u_{p2n} + u_n = 0 \quad (11)$$

Nelinearna jednačina (11) može se napisati u obliku:

$$F(U_L, \beta) = U_L S_n + \beta u_{p1n} + \beta^2 u_{p2n} + u_n = 0 \quad (12)$$

Funkcija $F(U_L, \beta)$ u okolini početnog pretpostavljenog rješenja U_{L0} i β_0 može se razviti u Tejlorov red, nakon čega se dobija:

$$F(U_L, \beta) = \varepsilon_n = F(U_{L0}, \beta_0) + S_n \Delta U_L + \begin{pmatrix} \mathbf{6447448} \\ u_{p1n} + 2\beta_0 u_{p2n} \end{pmatrix} \Delta \beta \quad (13)$$

Jednačina (13) se može napisati N puta, odnosno u matricnoj formi kao:

$$[\varepsilon] = [S] \Delta U_L + [U_p] \Delta \beta + [F(U_{L0}, \beta_0)] \quad (14)$$

gdje su:

ε – vektor grešaka koji obuhvata greške mjerenja odbiraka $u(t)$ i $i(t)$ kao i greške modelovanja električnog luka i transformatora;

ΔU_L i $\Delta \beta$ – priraštaji promjenljivih u odnosu na pretpostavljena rješenja U_{L0} i β_0 .

Pomoću izraza (14) može se formirati kriterijumska funkcija:

$$\Phi(\Delta U_L, \Delta \beta) = [\varepsilon]^T [\varepsilon] = \{ [S]^T \Delta U_L + [U_p]^T \Delta \beta + [F(U_{L0}, \beta_0)] \} \cdot \{ [S] \Delta U_L + [U_p] \Delta \beta + [F(U_{L0}, \beta_0)] \} \quad (15)$$

Sređivanje relacije (15) i izjednačavanjem parcijalnih izvoda kriterijumske funkcije sa nulom, kako po ΔU_L tako i po $\Delta \beta$ (minimiziranjem vektora greške ε) dobijaju se dvije jednačine sa dvije nepoznate. Rješenje te dvije jednačine, primjenom elementarne matematike, daje nepoznate priraštaje napona luka i mjesta kvara:

$$\Delta U_L = \frac{C \cdot D - B \cdot E}{A \cdot C - B \cdot B}; \quad \Delta \beta = \frac{A \cdot E - B \cdot D}{A \cdot C - B \cdot B} \quad (16)$$

gdje su:

$$A = [S]^T [S] = \sum_{n=1}^N \left[\operatorname{sgn} \left(\frac{i_{1n}}{m_{21}} \right) \right]^2 \quad (17)$$

$$B = [S]^T [U_p] = \sum_{n=1}^N \left[\operatorname{sgn} \left(\frac{i_{1n}}{m_{21}} \right) \right] \cdot [-u_{2n} + L'_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)}) + 2\beta_0 L''_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})] \quad (18)$$

$$C = [U_p]^T [U_p] = \sum_{n=1}^N [-u_{2n} + L'_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)}) + 2\beta_0 L''_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})]^2 \quad (19)$$

$$D = [S]^T [U] = \sum_{n=1}^N \left[\operatorname{sgn} \left(\frac{i_{1n}}{m_{21}} \right) \right] \cdot \{-U_{L0} \left[\operatorname{sgn} \left(\frac{i_{1n}}{m_{21}} \right) \right] - \beta_0 [-u_{2n} + L'_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})] - \beta_0^2 L''_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)}) - L_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})\} \quad (20)$$

$$E = [U_p]^T [U] = \sum_{n=1}^N [-u_{2n} + L'_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)}) + 2\beta_0 L''_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})] \cdot \{-U_{L0} \left[\operatorname{sgn} \left(\frac{i_{1n}}{m_{21}} \right) \right] - \beta_0 [-u_{2n} + L'_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})] - \beta_0^2 L''_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)}) - L_2 (i_{1(n+1)} - i_{1(n-1)})\} \quad (21)$$

$$L'_2 = \frac{b}{m_{21} 2T}; \quad L''_2 = \frac{a}{m_{21} 2T}; \quad L_2 = \frac{c}{m_{21} 2T} \quad (22)$$

Koristeći rezultate u relacijama (16) vršila se popravka pretpostavljenog polaznog rješenja dodajući im izračunate priraštaje, odnosno:

$$U_L = U_{L0} + \Delta U_L \quad (23)$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta \beta \quad (24)$$

odakle slijedi poznati iterativni postupak, definisan relacijama:

$$U_L^{j+1} = U_L^j + \Delta U_L^j \quad (25)$$

$$\beta^{j+1} = \beta^j + \Delta \beta^j \quad (26)$$

gdje su: $j = 0, 1, 2, \dots, I$ i I maksimalan broj iteracija u procesu izračunavanja U_L i β .

Iterativni postupak (25) i (26) zaustavlja se kada se postigne tražena tačnost (recimo: $\epsilon_{\Delta U_L} = 10^{-4}$ i $\epsilon_{\Delta\beta} = 10^{-4}$), gdje je kao kriterijum tačnosti uzeto:

$$|\Delta U_L^j| \leq \epsilon_{\Delta U_L} \quad (27)$$

$$|\Delta\beta^j| \leq \epsilon_{\Delta\beta} \quad (28)$$

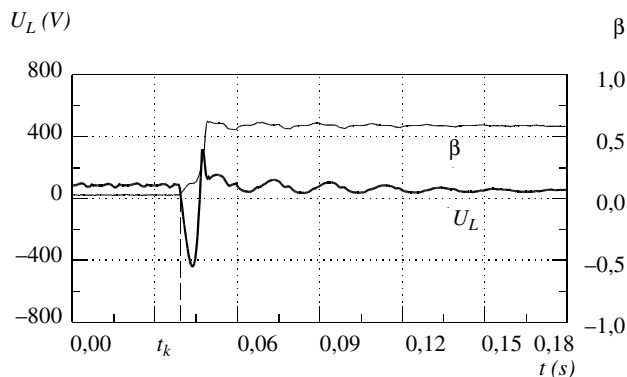
Predloženi algoritam, zasnovan na Newton-Raphsonovoj metodi je unaprijeđena varijanta algoritma koji je razvijen u referenci [1]. Numerički algoritam baziran na Newton-Raphsonovoj metodi testiran je pomoću snimljenih signala napona i struja prikazanih na slikama: 3, 5, 7, 9, 11 i 13.

Izlazi ovog algoritma dati su na slikama: 24, 25, 26, 27, 28 i 29. Prikazani rezultati dobijeni su korišćenjem prozora podataka dužine $T_{dw} = 10$ ms sa 25 odbiraka u prozoru (frekvencija odabiranja je iznosila 2,5 kHz) i početnog rješenja u prvom prozoru podataka $\beta_0 = 0,5$ i $U_{L0} = 0$, koji su obezbijedili konvergenciju iterativnog postupka. Može se uočiti da je i ovaj algoritam veoma brz, odnosno da konvergira posle 10 ms, te se može preporučiti za primjenu u digitalnoj relejnoj zaštiti monofaznih energetskih transformatora. Postoji izvjesna greška kod procjene β za slučaj laboratorijskih kvarova na 0,5 N₂ i 0,8 N₂ navojaka sekundara - slika 25, 26, 27, 28 i 29, ali ona je daleko manja od greške koju unosi algoritam baziran na metodi najmanjih kvadrata (linearni transformator).

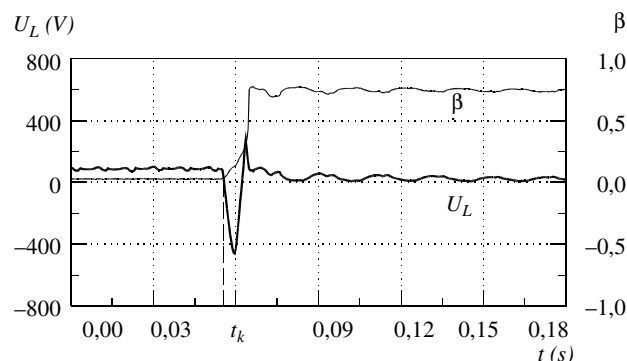
Ovi rezultati su dobijeni kao nastavak istraživanja autora na detekciji kvarova sa električnim lukom unutar monofaznih transformatora. Izloženi test rezultati predstavljaju još jedan značajan korak za naredna istraživanja na realnim modelima, kako na monofaznoj tako i na trofaznoj jedinici.

3. ZAKLJUČAK

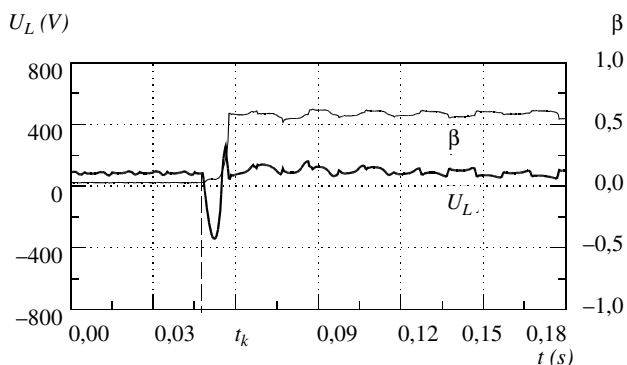
U ovom radu prikazani su eksperimentalni rezultati testiranja numeričkog algoritma za detekciju kratkih spojeva na sekundarnom namotaju monofaznog transformatora pomoću laboratorijskih snimaka kvarova sa lukom u vazduhu, u trafo ulju, kao i kvarova bez luka (metalnih kvarova). Treba naglasiti da je algoritam [1] zasnovan na metodi najmanje kvadratne greške, a monofazni transformator je tretiran kao linearno kolo kao i da je fizički model monofaznog transformatora urađen kao netipična električna mašina s obzirom na rasipne induktanse i nekvalitetne limove magnetnog kola. To je bio i razlog, između ostalog za nepreciznosti u estimaciji mjesta kvara i nestabilnih vrijednosti amplitude napona luka. Predloženi korigovani algoritam je unaprijeđena varijanta algoritma koji je razvijen u refe-



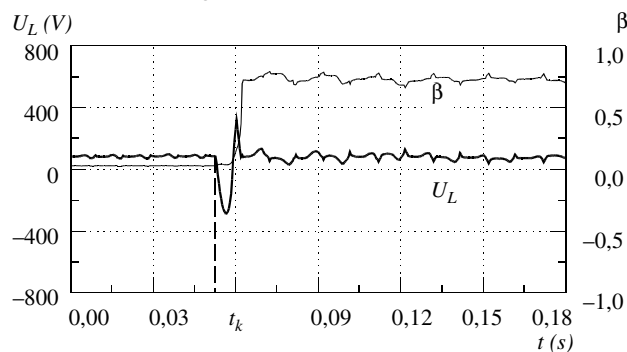
Slika 24. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za metalni kvar na $\beta = 0,5$, dobijeni algoritmom baziranom na Newton-Raphsonovoj metodi



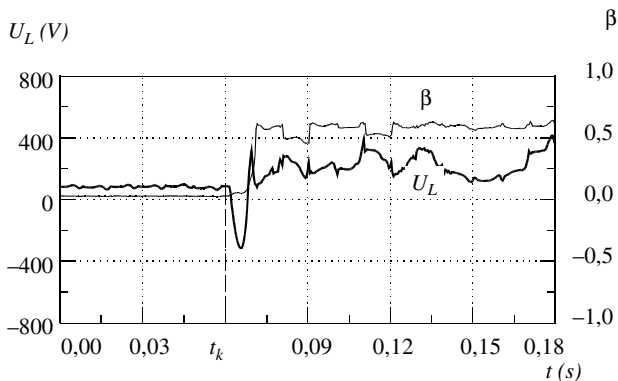
Slika 25. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za metalni kvar na $\beta = 0,8$, dobijeni algoritmom baziranom na Newton-Raphsonovoj metodi



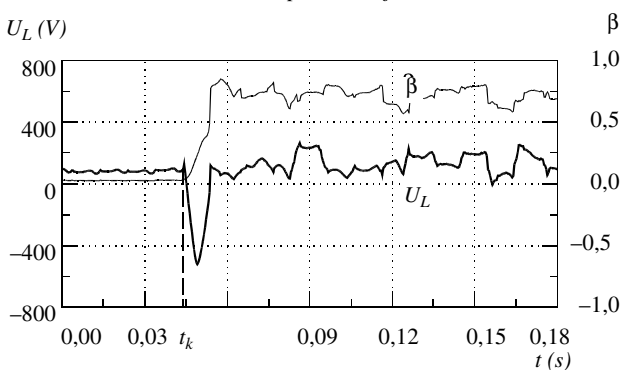
Slika 26. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u vazduhu na $\beta = 0,5$, dobijeni algoritmom baziranom na



Slika 27. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u vazduhu na $\beta = 0,8$, dobijeni algoritmom baziranom na Newton-Raphsonovoj metodi



Slika 28. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u ulju na $\beta = 0,5$, dobijeni algoritmom baziranom na Newton-Raphsonovoj metodi



Slika 29. Estimirani parametri β i U_L u laboratorijskom testu za lučni kvar u ulju na $\beta = 0,8$, dobijeni algoritmom baziranom na Newton-Raphsonovoj metodi

renci [1] a baziran je na Newton-Raphsonovoj metodi. Utvrđena je i nelinearna zavisnost induktanse rasipanja od mjesta kvara u sekundarnom namotaju. U radu je izvršeno poređenje rezultata estimacije nepoznatih parametara modela β i U_L predloženog algoritma, zasnovanog na Newton-Raphsonovoj metodi, sa algoritmom opisanog u referenci [1]. Pokazano je da Newton-Raphsonova metoda daje

tačniju procjenu mjesta kvara na sekundaru od metode najmanjih kvadrata. Algoritam baziran na Newton-Raphsonovoj metodi je temeljno testiran posredstvom stvarnih signala napona i struja snimljenih sa primarne i sekundarne strane monofaznog transformatora u laboratorijskim uslovima. Potvrđena je njegova zadovoljavajuća brzina, tačnost i konvergencija (10 ms).

Autori ovog rada usmjerili su svoje aktivnosti da u okviru sledeće etape istraživanja otklone nepreciznosti u estimaciji nepoznatih parametara modela, opisanog u [1], i tako dobiju bolje i za praksu prihvatljivije rezultate.

4. LITERATURA

- [1] M. Đurić, V. Ilić, DETEKCIJA ZEMLJOSPOJA SA ELEKTRIČNIM LUKOM U MONOFAZNIM ENERGETSKIM TRANSFORMATORIMA, Elektropriroda, br. 3, 1999.
- [2] M. Đurić, TEHNIKA ZAŠTITE U ELEKTROENERGETICI, ETF, Beograd, 1997.

Rad je primljen u uredništvo 25. 07. 2001. godine

Proračuni simetričnih trofaznih struja kvara u elektrodistributivnim i prenosnim mrežama na konzumu JP „Elektrodistribucija Beograd”

Stručni rad

UDK: 621.316;621.3.014; 621.3.025.3

Rezime:

Radom se iznosi raspodela proračunima dobijenih vrednosti subtranzijentnih simetričnih trofaznih struja kratkih spojeva u svim elektrodistributivnim i prenosnim mrežama na konzumu JP "Elektrodistribucije Beograd" za 2000. i 2020. godinu. Prikazane raspodele su rađene za slučaj tzv. metalnog zemljospoja, tj. sa prelaznom impedansom na mestu kvara $Z_k = 0\Omega$. Ova vrsta proračuna je oduvek bila sastavni deo dugoročnih planskih programa za izgradnju svih mreža na konzumu JP "Elektrodistribucija Beograd".

U drugom delu rada, za beogradske uslove, dolazi se do „dozvoljenih dužina” nadzemnih vodova 110 kV, 35 kV, 10 kV i 0,4 kV u odnosu na podešenost klasične relejne zaštite u izvornim trafostanicama (za mrežu 0,4 kV u odnosu na dimenzionisanost osigurača na izvodima 0,4 kV). Pri tome su određene i maksimalne vrednosti prelaznog otpora na mestu kvara u funkciji od dužine vodova koje može da obuhvati podešenost relejne zaštite.

Na taj način su definisani uslovi koje treba ispuniti još u fazi dugoročnog planiranja razvoja elektrodistributivne mreže da bi se načinom izgradnje mreža (izborom naponskih nivoa mreža i pojedinačne dužine svih vodova), kao i dinamikom izgradnje izvornih trafostanica svih napona – omogućilo dovoljno pouzdano registrovanje struja kvara, selektivno delovanje zaštitnih uređaja i isključenje elementa u kvaru sa maksimalnim redukovanjem obima kvara.

Ključne reči: kablovske i nadzemne mreže, subtranzijentne trofazne struje kratkih spojeva

Abstract:

CALCULATIONS OF SYMMETRICAL THREE-POLE FAULTY CURRENT IN POWER DISTRIBUTION AND TRANSMISSION NETWORKS SUPPLIED BY „JP ELEKTRODISTRIBUCIJA BEOGRAD”

The paper deals with distribution of calculated values of subtransient symmetrical three-pole short circuit currents in all power distribution and transmission networks supplied by „JP Elektrodistribucija Beograd” (JP EDB) for the years 2000 and 2020. The shown distributions were performed for cases of so-called metal earth fault, that is with transient impedance at the place of fault $Z = 0\Omega$. This kind of calculation has always been a constituent part of long-term scheduling programmes for construction of all networks supplied by „JP EDB”.

The other part of the paper, for Belgrade terms, gives the „permitted lengths” of 110 kV, 35 kV, 10 kV and 0,4 kV overhead lines in relation to the adjustment of conventional relay protection in the source transformer substations (for 0,4 kV network related to the dimensioning fuses at 0,4 kV outgoing lines). Maximum values of transient resistance at the faulty place have thereby been determined, in function of the length of lines which may be included by the adjustment of relay protection.

Conditions to be fulfilled from the very phase of long-term planning of the power distribution network development have thus been defined, in order to enable, by means of network construction (selection of voltage levels of networks and individual length of lines), as well as by scheduling the source transformer substations of all voltage levels, sufficiently reliable recording of fault currents, selective effects of relay protection and disconnection of faulty element, with maximum reduction of fault scope.

Key words: cable and overhead networks, subtransient three-pole short-circuit currents

1. UVOD

Beogradski elektroenergetski čvor, sa mrežama 110 kV i 35 kV, počeo je da se izgrađuje oko 1953. godine sa prvom transformatorskom stanicom (TS) 110/35 kV/kV (Beograd II) i nizom TS 35/10 kV/kV. Već oko 1960. godine u pogonu je i prva TS 220/110 kV/kV (Beograd III) a oko 1970. godine i prva TS 400/220 kV/kV (Beograd VIII). Intenzivan razvoj potrošnje električne energije i snage nametnuo je izgradnju prve TS sa direktnom transformacijom 110/10 kV/kV oko 1970. godine, da bi posle 1975. godine bila obustavljena ne samo dalja izgradnja kablovske mreže 35 kV na gradskom delu konzuma, već i nadzemne mreže 35 kV na prigradskom i vangradskom delu konzuma.

Svakako da su na ovako intenzivan razvoj mreža najznačajnije uticali dotadašnji trendovi razvoja potrošnje električne energije i snage kao i s tim u skladu prognoze daljeg rasta do 2000. godine. Međutim, već posle 1980. godine ustaljuje se razvoj konzuma do nivoa daljeg linearnog rasta, sa godišnjim priraštajima vršnog opterećenja od 35 MW do 50 MW. U tim uslovima, naročito posle 1990. godine uvidele su se »slabe strane odluka« donešenih oko 1970. godine da se na područjima sa malim površinskim gustinama opterećenja obustavi dalja izgradnja TS 110/35 kV/kV i nadzemnih mreža 35 kV, i u mrežu se uvode tzv. »iznuđena rešenja« sa tronaponskim TS 110/35/10 kV/kV/kV u većim naseljima na prigradskom i vangradskom delu konzuma.

Naime, kako su pokazale analize iz perioda od 1985. do 1990. godine, sa novim TS 110/10 kV/kV na gradskom a naročito na prigradskom i vangradskom delu konzuma, omogućava se racionalno napajanje potrošača na njihovom konzumu u radijusu dejstva do najviše 4-5 km, odnosno na površini od 50 km² do 70 km²; kako su ove TS izgrađivane sa dva energetska transformatora snage 31,5 MVA ili 40 MVA, to je bilo očigledno da na područjima sa značajno manjim površinskim gustinama opterećenja nisu mogli biti postignuti ne samo optimalni tehnoekonomske efekti sa ovim TS, već se pokazalo da regulacija napona i svi eksploatacioni troškovi prevazilaze uslove koje nameću TS 110/10 kV/kV velikih snaga. Zato se posle 1990. godine na vangradskom konzumu JP EDB izgrađuju tronaponske TS 110/35/10 kV/kV/kV, a i prva TS

110/10 kV/kV na ovom delu konzuma je rekonstruisana i „pretvorena“ u TS 110/35/10 kV/ /kV/kV – naravno, radi boljeg iskorišćenja TS i povećanja njenog dometa. Ove TS danas napajaju potrošače na površini od 250 do 400 km² sa stopostotnom sigurnošću u transformaciji 110/35/10 kV/kV/kV i mreži 35 kV. Na ovaj način je omogućena i dalja izgradnja TS 35/10 kV/kV u manjim naseljima ili grupama manjih naselja sa cca 3 000 – 5 000 stanovnika i prognoziranim specifičnim opterećenjem (opterećenjem po stanovniku) do 2 000 W/st.

Ovim radom će biti iznešeno nekoliko relacija kojima se opisuje stanje svih prenosnih i elektro-distributivnih mreža na konzumu JP EDB u 2000. godini (sa osvrtom i na stanje mreže u 2020. godini) samo sa jednog aspekta – iz ugla proračunima dobijenih vrednosti struja kratkih spojeva u svim mrežama. Prikazuju se raspodele proračunima dobijenih vrednosti struja kvara sa ciljem da se dođe do opštih zaključaka za sve elektrodistributivne mreže u Srbiji, naravno s obzirom na uslove koje treba ispuniti u perspektivi da se na svim naponskim nivoima mreža omogući i ograničenje maksimalnih vrednosti struja kvara, a i dovoljno pouzdano registrovanje malih vrednosti struja kvara, selektivno delovanje zaštitnih uređaja i isključenje elementa u kvaru sa maksimalnim redukovanjem obima ispada.

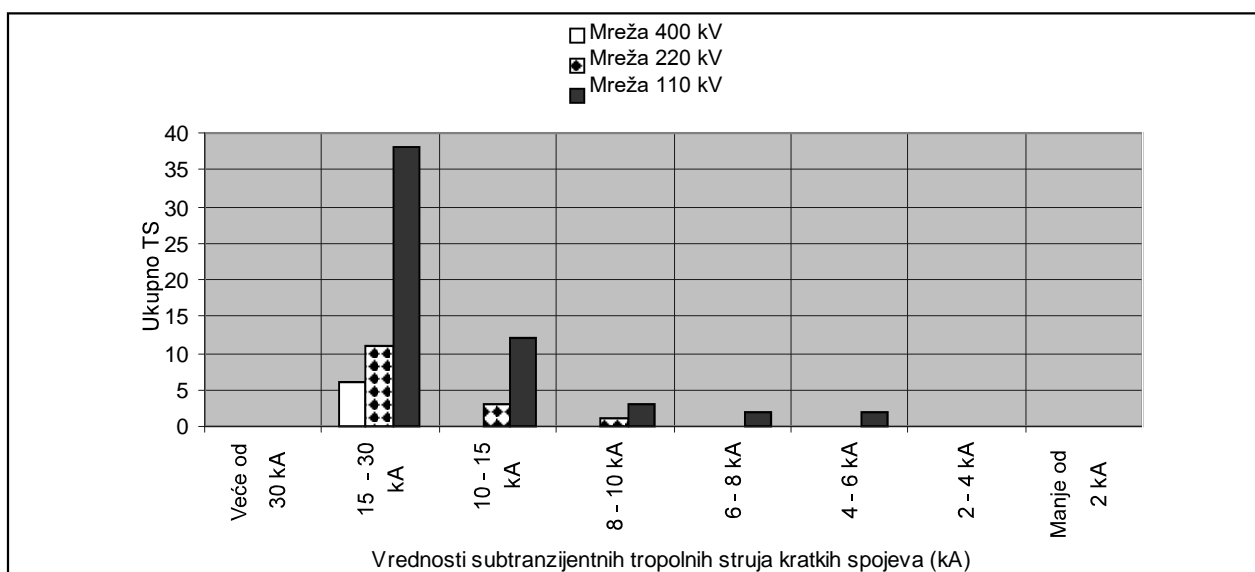
2. RASPODELE PRORAČUNATIH VREDNOSTI SIMETRIČNIH TROPOLNIH STRUJA KVARA U SVIM PROIZVODNO-PRENSNIM I ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA NA KONZUMU JP EDB

Praksa je u „Elektrodistribuciji Beograd“ da se povremeno proverava stanje svih mreža i sa aspekta „podnošenja“ maksimalnih perspektivnih struja kvara a isto tako i sa aspekta dovoljno pouzdanog registrovanja minimalnih postojećih struja kvara; Na taj način se najstrože definišu uslovi koje treba ispuniti i kroz izbor karakteristika elemenata mreža kao i kroz optimalnu dinamiku izgradnje mreže na svim naponskim nivoima i geografskim mikroregionima. Svakako da su u dosadašnjim periodima ove studijske analize nametale i tako značajne odluke kao što je i izbor naponskih nivoa mreža za perspektivno napajanje ne samo područja sa velikim i ume-

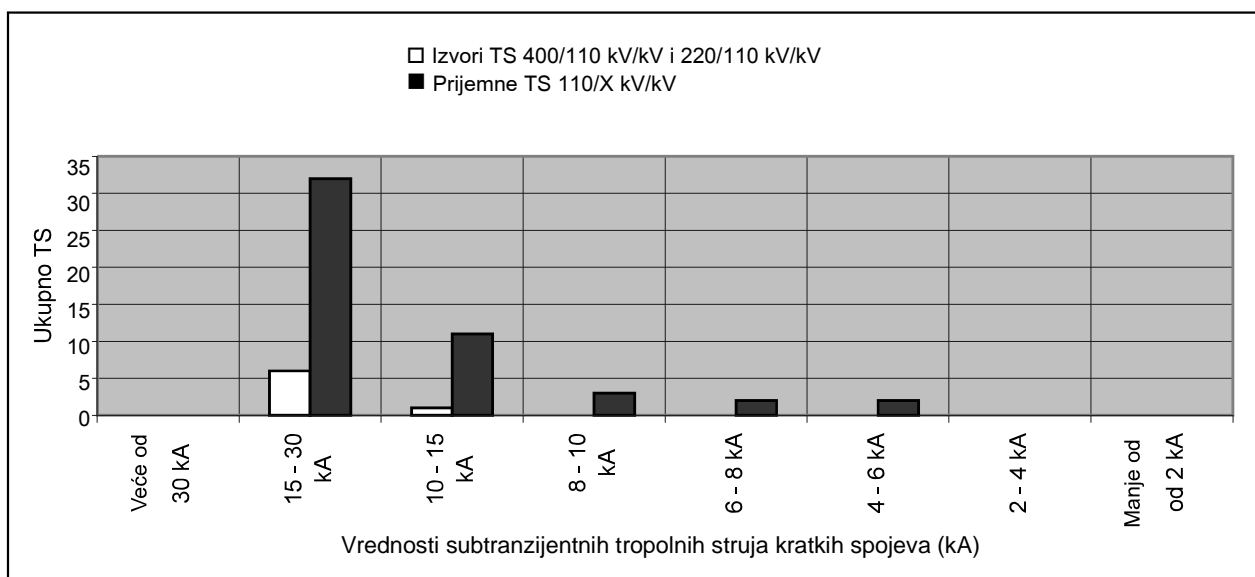
renim, već i područja sa malim i izuzetno malim površinskim gustinama opterećenja potrošača.

Proračuni simetričnih troležnih struja kvara sa stanjem svih mreža u 2000. godini su pokazali sve dobre strane dosadašnjeg načina izgradnje mreža na gradskom, prigradskom i vangradskom delu konzuma. Naime, kako to kazuju priloženi dijagrami na slici 1-5, raspodele subtranzijentnih troležnih struja kratkih spojeva u mrežama 400 kV, 220 kV, 110 kV, 35 kV i 10 kV na konzumu JP EDB su pokazale da su svi elementi mreža dobro dimenzionisani sa aspekta podnošenja maksimalnih vrednosti struja kvara u 2000. i 2020. godini, a isto tako dovoljno dobro dimenzionisani i sa aspekta regi-

stovanja minimalnih vrednosti struja kvara. Perspektivni objekti u proizvodno-prenosnim mrežama do 2020. godine, sigurno će biti sa uticajem na povećanje vrednosti subtranzijentnih troležnih struja kratkih spojeva i u mrežama na konzumu JP EDB, ali će se, svakako, izborom karakteristika elemenata mreža, omogućiti dalja eksploatacija svih elektrodistributivnih mreža sa sadašnjim performansama svih elemenata. Međutim, u visokonaponskim mrežama Srbije itekako treba proveriti postojeće stanje i uslove koji će biti nametnuti elektrodistributivnim mrežama, naravno s obzirom na perspektivne proizvodno-prenosne objekte i njihov uticaj na vrednosti struja kratkih spojeva.



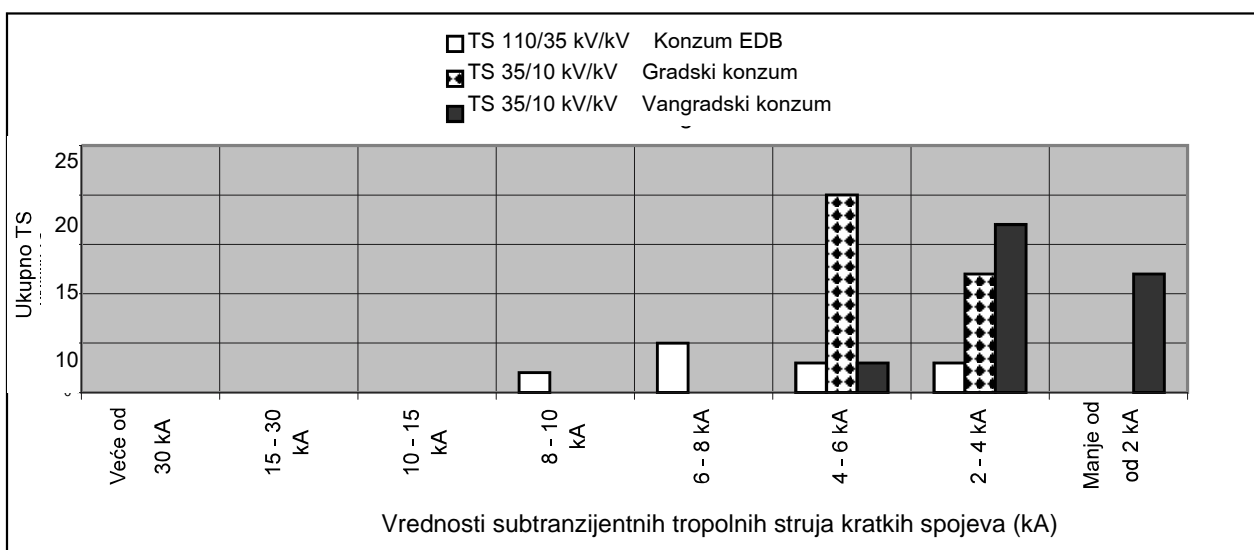
Slika 1. Histogram subtranzijentnih troležnih struja kratkih spojeva u mrežama 400 kV, 220 kV i 110 kV koje će napajati konzum EDB u 2020. godini (u postojećim i perspektivnim TS)



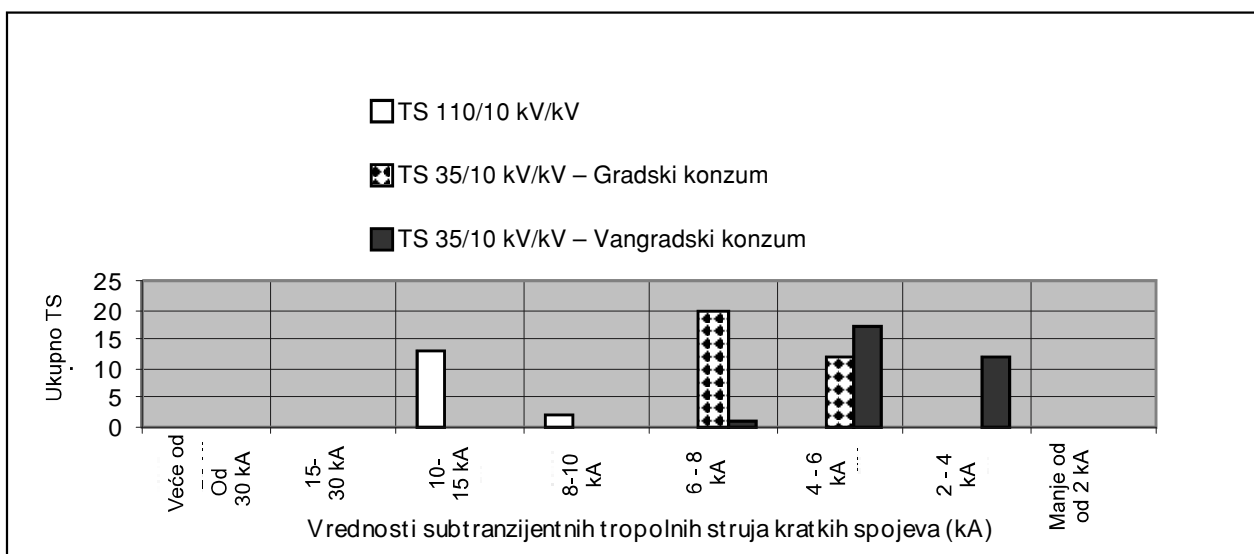
Slika 2. Histogram subtranzijentnih troležnih struja kratkih spojeva u mreži 110 kV na konzumu EDB u 2020. godini

U uslovima beogradskog elektroenergetskog čvora, sa pripadajućim elektrodistributivnim mrežama, do 2020. godine se može očekivati neznatno povećanje vrednosti struja kvara, s obzirom da se predviđa izgradnja samo termoelektrane Kolubara B te TS 400/110 kV/kV Beograd XX, Srem i Železnik (Beograd II). U tim uslovima, u JP EDB se čak optimiziraju vrednosti napona kratkog spoja energetskih transformatora - u smislu smanjenja reaktanse transformatora 110/10 kV/kV čak i na područjima sa ekstremnim vrednostima struja kratkih spojeva u mrežama 400 kV i 220 kV. Nasuprot tome, na područjima sa izuzetno dugačkim mrežama 35 kV i 10 kV, predviđa se dalja izgradnja mreže 35 kV sa TS 110/35/10 kV/kV/kV i 35/10 kV/kV – kako bi se već u bližoj perspektivi sanirala sva

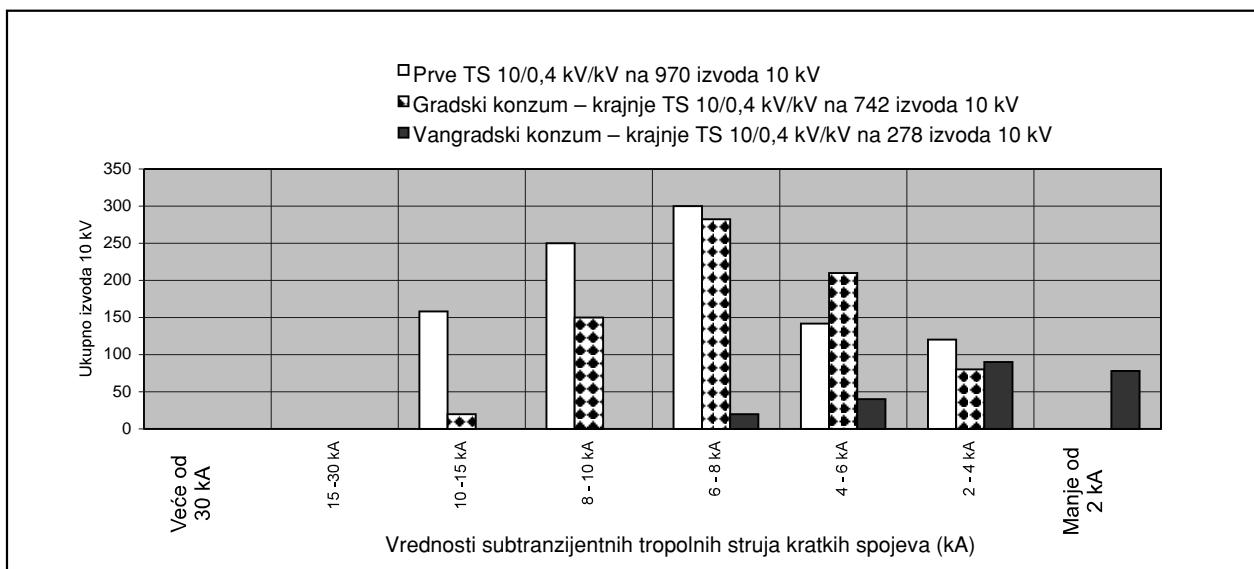
područja na kojima su simetrične trolpolne struje kvara manje od 2 kA. Za sada u JP EDB ne postoje ciljane vrednosti za opseg u kome mogu da se kreću simetrične trolpolne struje kvara u mrežama, ali se na osnovu predložene dinamike izgradnje mreže može pretpostaviti da će do 2020. godine skoro biti „eliminirana” sva područja sa trolpolnim strujama kvara u sredjenaponskim mrežama koje su manje od 3 kA. Interesantno je napomenuti da to nameću uslovi koje postavlja, pre svega, regulacija napona u mrežama, a tek onda uslovi koje nameću troškovi pouzdanosti napajanja potrošača; proračuni struja kratkih spojeva u mrežama, u beogradskim uslovima, su tako reći invarijantni – što nije slučaj i sa mrežama u elektroenergetskom sistemu Srbije.



Slika 3. Histogram subtransijentnih trolpolnih struja kratkih spojeva u mreži 35 kV na konzumu EDB u 2000. godini



Slika 4. Histogram subtransijentnih trolpolnih struja kratkih spojeva na sabirnicama 10 kV u TS 110/10 kV/kV i 35/10 kV/kV na konzumu EDB u 2000. godini



Slika 5. Histogram subtransijentnih trofaznih struja kratkih spojeva u prvim i krajnjim TS 10/0,4 kV/kV na 970 izvoda 10 kV na konzumu EDB u 2000. godini

Minimalne vrednosti podešenosti relejne zaštite u mrežama 35 kV i 10 kV nametnute su prelaznim režimima kod uključanja transformatora 35/10 kV/kV, odnosno 10/0,4 kV/kV, kada se javljaju i desetostruke vrednosti nadzemnih struja transformatora.

Treba napomenuti i to da su u svim elektro-distributivnim mrežama vrednosti subtransijentnih, tranzijentnih i ustaljenih komponenti struja kvara bezmalo identične.

S obzirom na to da su kablovski vodovi 110 kV, 35 kV, 10 kV i 0,4 kV na konzumu JP EDB zna-

Tabela 1.

Tropolne simetrične struje kvara u funkciji od dužine nadzemnih vodova tipskih preseka

Nadzemni vod 110 kV		Nadzemni vod 35 kV		Nadzemni vod 10 kV		Nadzemni vod 0,4 kV	
Dužina voda AIČ 3x240mm ² (km)	Struja troleznog kratkog spoja (kA)	Dužina voda AIČ 3x70 mm ² (km)	Struja troleznog kratkog spoja (kA)	Dužina voda AIČ 3x70 mm ² (km)	Struja troleznog kratkog spoja (kA)	Dužina voda AIČ 3x50 mm ² (m)	Struja troleznog kratkog spoja (kA)
0	13,75	0	4,92	0	7,47	0	4,60
5	8,40	2	4,15	1	4,96	200	1,60
10	7,66	4	3,42	2	3,59	400	0,97
15	6,26	6	3,05	3	2,78	600	0,68
20	5,30	8	2,66	4	2,26	800	0,53
25	4,57	10	2,37	5	1,90	1 000	0,42
30	4,03	12	2,12	6	1,67		
35	3,60	14	1,91	7	1,44		
40	3,26	16	1,75	8	1,29		
45	2,97	18	1,61	9	1,16		
50	2,73	20	1,49	10	1,06		
60	2,35	25	1,25	12	0,90		
70	2,07	30	1,08	14	0,78		
80	1,84	35	0,95	16	0,69		
90	1,66	40	0,85	18	0,62		

Tabela 2.

Maksimalna otpornost na mestu kvara obuhvaćena podešenošću relejne zaštite

Mreža 35 kV		Mreža 10 kV		Mreža 0,4 kV	
Dužina dalekovoda AlČ 3x70 mm ² (km)	max R _k obuhvaćeno sa zaštitom od 1 600 A	Dužina dalekovoda AlČ 3x70 mm ² (km)	Max R _x obuhvaćeno sa zaštitom od 1 600 A	Dužina Voda AlČ 3x50 mm ² (m)	max R _k obuhvaćeno sa zaštitom od 250 A
0	max 13,0 Ω	0	max 3,90 Ω	0	max 0,96 Ω
2	max 11,8 Ω	1	max 3,40 Ω	200	max 0,88 Ω
10	max 6,70 Ω	5	max 0,93 Ω	400	max 0,80 Ω
20	-	10	-	600	max 0,70 Ω
30	-	20	-	800	max 0,60 Ω
40	-	-	-	1 000	max 0,50 Ω

čajno, većih preseka, manje reaktanse, te i neuporedivo kraći od nadzemnih vodova, zbog čega po pravilu nisu kritični sa aspekta registrovanja minimalnih struja kvara klasičnom relejnom zaštitom, ovde će nadalje nešto više pažnje biti poklonjeno proračunima trolnih struja kratkih spojeva u nadzemnim mrežama.

Radi očiglednog uvida u uticaj dužine nadzemnih elektrodistributivnih mreža 110 kV, 35 kV, 10 kV i 0,4 kV na vrednosti simetričnih trolnih struja kvara na kraju radijalnih vodova, ovde su u priloženoj tabeli 1 prikazane proračunate vrednosti struja kvara pri najčešćim vrednostima ulazne impedanse za adekvatnu mrežu, odnosno za adekvatne struje kvara na sabirnicama napojne TS (pri dužini adekvatnog voda od 0 km).

Očigledno je da kod izrade dugoročnih planskih programa treba voditi računa o tome da za minimalnu vrednost subtranzijentne trolne struje kvara od 2 kA nadzemni vodovi 110 kV ne bi trebalo da budu duži od cca 70 km, nadzemni vodovi 35 kV od 12 km, nadzemni vodovi 10 kV od 5 km, a za simetričnu trolnu struju kvara od 500 A nadzemni vodovi 0,4 kV ne bi trebalo da budu duži od 500 m (naravno, tipskih preseka). Na taj način bi svi trolni simetrični kvarovi na kraju vodova bili isključeni bez vremenskog zatezanja i obim kvara bi bio maksimalno redukovan. Naravno, pri tome je računato da je prelazna otpornost na mestu kvara jednaka nuli, što se ima pri tzv. metalnom zemljospoju.

3. MAKSIMALNE VREDNOSTI PRELAZNOG OTPORA NA MESTU KVARA U FUNKCIJI OD DUŽINE VODOVA I PODEŠENOSTI ZAŠTITNIH UREĐAJA

Do sada iznešene raspodele proračunima dobijenih vrednosti subtranzijentnih trolnih sime-

tričnih struja kratkih spojeva su rađene za slučaj da prelazna impedansa na mestu kvara ima vrednost $Z_k = 0 \Omega$ (tzv. „metalni zemljospoj“). Međutim, prelazna impedansa može da postoji, pa je itekako korisno sagledati njene maksimalne vrednosti koje mogu da budu obuhvaćene podešenošću zaštitnih uređaja (relejnomo zaštitom). Naime, u svim srednjenaponskim elektrodistributivnim mrežama na konzumu JP EDB zaštita od trolnog kratkog spoja je podešena na vrednost od 1 600 A (na relejima IR 10 u relejnoj kombinaciji RI 4) bez vremenskog zatezanja, te se, na osnovu izraza:

$$I_{3z} = \frac{1,1U_{fr}}{\sqrt{(R_d + R_k) + X_d^2}} = 1,6,$$

odnosno

$$R_k = \sqrt{\left(\frac{1,1U_{fr}}{1,6}\right)^2 - X_d^2 - R_d}$$

može odrediti maksimalna vrednost prelazne otpornosti na mestu kvara R_k koja može biti obuhvaćena podešenošću relejne zaštite u napojnoj TS; Kako su ukupne otpornosti i reaktanse direktnog redosleda od napojne TS (sa parametrima napojnog transformatora i ulaznom rednom impedansom mreže) do mesta kvara to će ovde biti izračunate maksimalne vrednosti u funkciji od dužine radijalnih nadzemnih vodova do mesta kvara; kod kablovskih mreža maksimalne vrednosti R_k su veće s obzirom da su impedanse kablovskih vodova značajno manje.

Ispitivanja u realnim uslovima [5] su pokazala da impedansa električnog luka u vazduhu može da ima vrednost i do nekoliko Ω (vrednost otpora luka zavisi od struje kvara i dužine luka), što, svakako, u pojedinim slučajevima ne bi dovelo do adekvatnog

delovanja zaštitnih uređaja. Takve vrednosti prelaznog otpora na dugačkim vodovima 35 kV i 10 kV ne bi implicirale delovanje relejne zaštite sa trenutnim dejstvom (bez vremenskog zatezanja), ali bi, svakako, kvar bio isključen zaštitom od međufaznih kratkih spojeva (u mrežama na konzumu JP EDB ova zaštita je podešena na vrednost od cca 400 A na relejima u relejnoj kombinaciji RI 4, sa vremenskim zatezanjem od cca 0,5 – 1 sec.). Međutim, u ovim uslovima postiže se značajno veće razaranje elementa u kvaru.

Prema tome, kako kazuje i tabela 2, u elektrodistributivnim mrežama maksimalne dužine nadzemnih vodova 35 kV, 10 kV i 0,4 kV trebalo bi da budu još i manje - kako bi se stvorilo dovoljno prostora za pravilno reagovanje relejne zaštite i postizanje pune selektivnosti u njenom delovanju, naravno, i za slučaj kad prelazna otpornost na mestu kvara postoji.

4. ZAKLJUČAK

Radom su iznešene raspodele proračunima dobijenih vrednosti subtranzijentnih simetričnih trolnih struja kratkih spojeva u proizvodno-prenosnim i elektrodistributivnim mrežama na konzumu JP EDB za 2000. i 2020. godinu. Sprovedeni proračuni navode na zaključak da će u elektroenergetskom sistemu Beograda svi elementi mreža zadovoljiti u pogledu „izdržljivosti” na maksimalne vrednosti ovih struja sve do 2020. godine, ali i da na područjima na kojima su ove struje manje od 2 kA treba preduzeti sve mere sa izgradnjom adekvatnih izvora. Na taj način će se omogućiti dovoljno pouzdano registovanje simetričnih trolnih struja kvara, selektivno delovanje zaštitnih uređaja i maksimalno redukovanje razaranja elementa u kvaru.

U drugom delu rada su iznešeni zaključci o maksimalnim dužinama elektrodistributivnih vodova do kojih su isti štice opsegom podešenosti relejne zaštite u mreži EDB; takođe su date i vrednosti maksimalnih vrednosti prelazne otpornosti na mestu

kvara koje mogu da budu obuhvaćene zonom osetljivosti relejne zaštite, pri tome u funkciji od dužine srednjenaponskih i niskonaponskih vodova. Zaključuje se da mreže na konzumu JP EDB nisu toliko kritične – s obzirom na postojeće dužine vodova i podešenost zaštite, ali da aspekti regulacije napona i valorizacija troškova pouzdanosti impliciraju potrebu da se nastavi sa daljom izgradnjom i dugoročnim saniranjem svih ruralnih mreža.

Studije kratkih spojeva su oduvek bile sastavni deo svih dugoročnih konceptijskih planskih programa za izgradnju mreža na konzumu JP EDB, ali bi trebalo da budu i u sklopu izrade srednjoročnih planova – radi angažovanja većeg broja službi i stručnjaka na ovom polju. Jedino na taj način može da se postigne nediskutabilnost kod usvajanja predloženih rešenja vezanih za izgradnju mreža, i, naravno, i njenu optimalnu eksploataciju.

9. LITERATURA

- [1] Dr. S. Despotović, dipl.el.ing. OSNOVI ANALIZE ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA knjiga, ZJE, Beograd 1962.
- [2] Jovan Nahman, STRUJE KRATKIH SPOJEVA I NJIHOVO PREKIDANJE 1973, knjiga ETF Univerziteta u Beogradu
- [3] Dr Gojko Muždeka, dipl.el.ing., dr Jovan Štarkelj, dipl.el.ing. ZBIRKA ZADATAKA IZ PRENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE 1972, knjiga ETF Univerziteta u Beogradu
- [4] Branka Ribar-Brajić, dipl.el.ing. STRUJE KRATKIH SPOJEVA U PROIZVODNO-PRENSNIM MREŽAMA SRBIJE ZA 2020. GODINU Studija, 1999.
- [5] V. V. Terzija, H.J.Koglin NOVI PRISTUP IZRAČUNAVANJA ELEKTRIČNE OTPORNOSTI DUGOG LUKA U SLOBODNOM VAZDUHU Časopis „Elektrodistribucija”, 2001.
- [6] Tomislav Milanov, dipl.el.ing. KARAKTERISTIKE ELEKTRODISTRIBUTIVNIH MREŽA NA RURALNIM PODRUČJIMA JUKO CIRED, I savetovanje, Zlatibor, 1998, R.6.06
- [7] Jovan Nahman, UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA Naučna knjiga, Beograd, 1980.

Rad je primljen u uredništvo 11. 09. 2001. godine

Stanje istraženosti i ocena aktiviranja rezervi uglja ležišta "Melnica"

Stručni rad
UDK: 553.94; 622.1

Rezime:

Podzemna eksploatacija uglja predstavlja specifičnu privrednu delatnost koju karakteriše stalno ulaganje u pripremu otkopnih kapaciteta. U pojedinim aktivnim ležištima uglja u kojima se vrši podzemna eksploatacija, rezerve uglja su pred iscrpljenjem, tako da se dovodi u pitanje ostvarenje ciljnog godišnjeg kapaciteta bez aktiviranja nekog novog ležišta.

Na osnovu izvedenih istražnih radova u ležištu uglja "Melnica" procenjuje se da je ležište perspektivno za aktiviranje u eksploatacionom smislu te se ovim radom obrađuje stanje istraženosti i daje ocena bilansnosti utvrđenih rezervi.

Ključne reči: ugalj, kvalitet uglja, podzemna eksploatacija

Abstract:

STATUS OF PERFORMED RESEARCH WORK AND ESTIMATE OF ACTIVATION OF COAL DEPOSITS OF MELNICA

Underground coal mining represents a specific industrial activity which is characterized by continual investment in preparation of mining facilities. In some active coal deposits with underground mines, coal reserves are almost exhausted, so that realization of the planned annual capacity is very uncertain without activating some new deposit.

On the basis of performed research work in the „Melnica” coal deposit, according to estimates, the deposit has potential for mining.

This paper, therefore, deals with the status of carried out research work and estimates the balance of established reserves.

Key words: coal, coal quality, underground mining

1. UVOD

Energetska pozicija uglja kao osnovnog domaćeg resursa i otežani uslovi obezbeđenja uvoznih, tečnih i gasovitih energenata, zahtevi tržišta, raspoložive rezerve i rudarska tradicija upućuju na potrebu bržeg razvoja rudnika sa podzemnom eksplo-

atacijom u aktivnim ležištima i etapnog otvaranja novih rudnika.

Rudnicima JP za PEU pripada sav sirovinski potencijal uglja Republike Srbije koji gravitira sistemu podzemne eksploatacije i to kako u aktivnim ležištima, tako i u ležištima gde nije vršena eksploatacija ili je obustavljena, a da rezerve uglja nisu is-

crpljene. Elaborirane rezerve uglja u aktivnim ležištima A+B+C₁ kategorije iznose cca 290. miliona tona, pri čemu je učešće rezervi A+B kategorije oko 50 %. Sa druge strane rezerve uglja koje gravitiraju postojećim jamskim otvorima iznose oko 89 miliona tona, te se može govoriti o malom stepenu otvorenosti. Kod ovoga treba naglasiti da su rezerve uglja A+B kategorije u veličini do 1 milion tona elaborirane kod pet jama (Avramica, Jarando, Tadenje, Pasuljanske Livade i Senjski Rudnik), a do 1,5 miliona tona kod dve jame (Jasenovac i Istočno polje-Bogovina).

Sadašnji kapacitet aktivnih rudnika u normalnim prilikama sa postojećim otvorima je 750-800 000 tku/god. Kompleksnim sagledavanjima mogućnosti razvoja rudnika, pretočenim u investicione programe, ocenjeno je da se godišnji kapacitet proizvodnje iz podzemne eksploatacije podigne na nivo od oko 1,5 miliona tona.

Dokumentima "Strategija razvoja energetike SR Jugoslavije do 2020. godine sa vizijom do 2050. godine" i "Prostorni plan Republike Srbije" predviđeno je da se pored postojećih proizvodnih kapaciteta sa većim rezervama uglja (Soko, Rembas, Štavalj, Lubnica), ima izvršiti otvaranje novih proizvodnih kapaciteta, paralelno sa obustavljanjem eksploatacionih radova u nekim ležištima čije su rezerve uglja pred iscrpljenjem.

U ovom radu daje se pregled istraženosti i oce- na aktiviranja rezervi uglja u ležištu "Melnica" u cilju njegovog ponovnog aktiviranja.

2. OSNOVNI PODACI O LEŽIŠTU

Ležište mrkog uglja "Melnica" nalazi se u sli- vu reke Mlave u sklopu prostranog Mlavskopetro- vačkog neogenog basena, koji se na severu, prema Požarevcu, nastavlja na Kostolački, a prema jugu na Despotovački ugljonosni basen.

Melničko ležište nalazi se u istočnom delu ba- sena na oko desetak kilometara severoistočno od Petrovca na Mlavi. Glavne saobraćajnice kojima je ležište povezano sa industrijskim centrima su put I reda Požarevac-Petrovac-Žagubica-Bor i put II reda Petrovac-Kučevo, koji delom prolazi preko sa- mog ležišta, i to njegovog jugoistočnog dela. Od železničke pruge Požarevac-Kučevo-Majdanpek ležište je udaljeno oko 15 km vazдушnom linijom u pravcu juga. Na eksploatacionom prostoru ležišta nalazi se manji broj građevinskih objekata (seoskih domaćinstava) nepravilno raspoređenih po celom ležištu. Jedini od značajnijih objekata je put Petro- vac-Kučevo koji ide preko jugoistočnog dela leži- šta.

Prvi eksploatacioni radovi na području ležišta "Melnica" započeli su 1892. godine, ali ne postoje podaci koliko su dugo trajali.

Druga faza eksploatacije vezana je za II svet- ski rat kada i prestaje njegovim završetkom. Eks- ploatacija uglja ponovo se obnavlja 1949. i traje do 1953. godine kada se obustavlja, da bi se obnovila u periodu 1959-1964. godine kada je definitivno obustavljena. Svi pokušaji eksploatacije na ovom prostoru vezani su za izdanačke zone u obodnom delu istočnog krila i nisu imali većeg zamaha iako je potencijal ležišta to dozvoljavao od samog po- četka. Međutim, i nakon zatvaranja rudnika "Mel- nica" nastavljeno je sa daljim radovima istraživa- nja, kako bi se što detaljnije upoznali prirodno-ge- ološki uslovi.

3. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA

U geološki sastav ležišta "Melnica" ulaze sle- deći stratigrafski članovi (slika 1):

- donji i srednji miocen ("melnička serija"),
- srednji miocen-helvet (crvena serija) i
- gornji miocen-sarmat.

Produktivna serija je predstavljena glinovi- to-peskovitim i laporovito-krečnjačkim sedimenti- ma sa jednim složenim ugljenim slojem. Podina ugljenog sloja predstavljena je raznobojnim glina- ma, ugljevitim glinama, peskovitim glinama i gli- novitim peščarima.

Jalovina u ugljenom sloju (gline, ugljevite gli- ne, laporac) je zastupljena u većem broju tanjih proslojaka debljine od nekoliko cm, pa i više dese- tina, koji se smenjuju sa ugljem, a raspoređeni su u donjem delu sloja.

Debljina ugljenog sloja je promenljiva, pri če- mu je bušenjem najmanja debljina utvrđena 1,5 m, a maksimalna 15 m uključujući i jalove proslojke.

Krovina ugljenog sloja je uglavnom laporovi- to-krečnjačkog sastava, a mestimično, pretežno u višim delovima, pešarskog i tufuznog sastava. Ne- posrednu krovinu ugljenog sloja čini beli laporovi- ti krečnjak.

Osnovna struktura ležišta je uslovljena pri- marnim uslovima stvaranja ugljene supstance. Mo- noklina struktura koja egzistira u pličim, obodnim delovima ležišta, usled uzdizanja paleoreljefa pre- lazi u složenu sinklinalnu formu, odnosno u dve lo- kalne sinklinalne formirajući južno i severno ugljo- nosno polje. Istražnim radovima, bušenjem, utvr- đeni su lokalni diskontinuiteti, a što se može de- taljno definisati rudarskim radovima.

Padni ugao sloja se menja, pri čemu je u obod- nim zonama 30-40 °, da bi se sa dubinom smanji- vao i pri dnu depresije je horizontalan.

STAROST		LITOLOŠKI STUB	Debljina	LITOLOŠKI OPIS	
MEOGEN	MIOCEN	SARMAT M ₃	< 200	PESKOVI I GLINE SA KRUPNOZRNIM ŠLJUNKOM I SA SLOJEM LIGNITA OD 1 m	
		HELVET M ₂	40-120	GRUBI SEDIMENTNI KONGLOMERATIČNO-ANGLOMERATIČNOG TIP (permski crveni pešćar, kvarciti, škriljci, nezaobljeni).	
		DONJI I SREDNJI MIOCEN (1, 2)	40-140	MELNIČKA SERIJA PRODUKTIVNI DEO POVLATNI DEO	Naslage tufova i tufita, tufitskih laporaca mikrobreča. Čvrsti slojeviti laporci ređe krečnjaci (mestimično peškoviti i tufozni, sa pojavama uglja u gornjem delu)
					Produktivna serija: ugalj do 12 m u jednom ili dva sloja sa proslojcima jalovine. U podini zelene šriljave gline koje prelaze u zeleno mrki glinoviti pešćar
PALEOZOIK			< 100	Šareni nedovoljno zaobljeni šljunkovi promenljive granulacije, vezane mrkim ili zelenkastim alevritima sa čestim sočivima peskova.	
		perm (P)		PERMSKI CRVENI PEŠĆAR GORNJE KARBONSKI KLASIČNI SEDIMENTNI SILURSKI KRISTALASTI SKRILJCI I KVARCITI.	
		Gornji karbon (C ₂)			
		Silur (S)			

Slika 1. Litološki stub ležišta „Melnica“

4. REZERVE I KVALITET UGLJA

Rezerve uglja ležišta "Melnica" overene od strane nadležnog državnog organa, na dan 30. 06. 1984. godine iznosile su 29 921 669 tona.

Prema ovom elaboratu osnovni parametri kvaliteta iznose: vlaga 27,86 %, pepeo 24,24 %, sumpor (sagoriv) 2,14 % i DTE 12 858 kJ/kg.

Novim istražnim radovima izvedenim nakon 1984. godine ostvareni su uslovi za delimičnu pre-kategorizaciju rezervi iz nižih u više kategorije, s obzirom na povećanu gustinu bušotina i ostvareno proširenje produktivnog prostora.

Kao minimalna eksploatabilna debljina ugljenog sloja usvojena je debljina od 2,5 m, tako da su

Tabela 1.

Rezerve uglja u geološkom bloku I (računate na ekvidistanci od po 50 m)

BLOK	Ekvidistanca $l_n \pm l_n + 50$ (m)	Površina (m ²)	Srednja debljina h_{st} (m)	Zapremina (m ³)	Zapreminska masa (t/m ³)	Geološke rezerve (t)
I	0 - 50	83 450	7,60	634 220	1,2	761 060
	0 + 50	129 470	8,10	1 048 707	1,2	1 258 450
	50 + 100	163 720	6,20	1 015 064	1,2	1 218 070
	100 + 150	162 220	6,90	1 119 318	1,2	1 343 180
	150 + 200	111 160	4,60	511 336	1,2	613 600
	200 + 250	105 720	6,70	708 324	1,2	849 990
UKUPNO BLOK I						6 044 350

Tabela 2.

Rezerve uglja u geološkom bloku II

BLOK	Ekvidistanca $l_n \pm l_n + 50$ (m)	Površina (m ²)	Srednja debljina h_{st} (m)	Zapremina (m ³)	Zapreminska masa (t/m ³)	Geološke rezerve (t)
II	rased ± 0	76 970	10,20	785 094	1,2	942 110
	0 - 50	243 970	7,70	1 878 569	1,2	2 254 280
	- 50 - 100	520 100	10,10	5 253 010	1,2	6 303 610
	- 100 - 130	838 320	8,90	7 461 048	1,2	8 953 260
UKUPNO BLOK II						18 453 260

Tabela 3.

Rezerve uglja u geološkom bloku III

BLOK	Ekvidistanca $l_n \pm l_n + 50$ (m)	Površina (m ²)	Srednja debljina h_{st} (m)	Zapremina (m ³)	Zapreminska masa (t/m ³)	Geološke rezerve (t)
III	rased ± 0	36 040	3,50	126 140	1,2	151 368
	0 + 50	149 592	2,45	366 500	1,2	439 800
	50 + 100	141 234	4,40	621 430	1,2	745 716
	100 + 150	54 010	4,40	220 044	1,2	264 050
	150 + 200	26 024	4,40	114 505	1,2	137 406
	200 + 250	5 415	4,40	23 826	1,2	28 590
UKUPNO BLOK III						1 766 930

Tabela 4.

Rezerve uglja u geološkom bloku IV

BLOK	Ekvidistanca $l_n \pm l_n + 50$ (m)	Površina (m ²)	Srednja debljina h_{st} (m)	Zapremina (m ³)	Zapreminska masa (t/m ³)	Geološke rezerve (t)
IV	granica - 0	401 660	5,70	2 289 462	1,2	2 747 350
	50 - 100	403 341	9,30	3 751 146	1,2	4 501 370
UKUPNO BLOK IV						7 248 720

rezerve uglja sa manjom debljinom računate kao vanbilansne. Novi proračun rezervi rađen je po geološkim blokovima i prema istom ukupne bilansne rezerve iznose 33 513 260 tona (tabele 1-5).

Tabela 5.
Ukupne rezerve uglja ležišta "Melnica"

Geološki blok	Geološke rezerve A + B + C ₁
I	6 044 350
II	18 453 260
III	1 766 930
IV	7 248 720
UKUPNO	33 513 260

Pored ovih rezervi, procenjene su rezerve C₂ kategorije u neokonturenom zapadnom i severozapadnom delu ležišta u veličini od cca 10 miliona tona.

Po svom petrografskom sastavu ugalj se sastoji iz doplerita i humusnog dela, kao glavnih sastojaka, a zatim ksilita, dok fuzinit gotovo izostaje. Osnovni sastojci se smenjuju u vidu traka i proslojaka te otuda ugalj ima trakastu teksturu. Od mineralnih primesa najčešći su pirit i glina. Boja uglja je mrka do zatvoreno mrka, a ogreb uglja je mrk. Struktura uglja je složena-delom pločasta i vlaknasta, a delom zrnasta.

Sadržaj vlage u uglju se kreće od 11,74-39,40 %, ali uglavnom između 25-35 %. Zapremninska masa uglja dobivena u sklopu tehničkih analiza iznosila je 1,09-1,39 t/m³ (srednja vrednost 1,25 t/m³), dok je pri određivanju fizičko-mehaničkih svojstava iznosila 1,16-1,39 t/m³ (srednja vrednost 1,29).

Srednji sadržaj pepela je 23,10 % i to: za severno polje 25,72 % i za južno polje 22,60 %.

Procenat ukupnog sumpora kod uglja sa dostavnom vlagom kreće se od 1,30-4,93 %. Srednji sadržaj sagorivog sumpora je 0,72-4,39 %, sadržaj sumpora u pepelu 0,26-0,70 %, te najveći deo sumpora učestvuje u procesu sagorevanja.

C-fix u uglju sa dostavnom vlagom iznosi od 12,94 do 32,49 %. Odnos sagorljivih prema isparljivim materijama iznosi 1:0,59.

Donja toplotna vrednost uglja sa dostavnom vlagom kreće se u granicama 7 890-18 248 kJ/kg, pri čemu srednja vrednost za celo ležište iznosi 11 637 kJ/kg (severno polje 11 170 kJ/kg i južno polje 12520 kJ/kg).

Ugalj bez vlage i pepela ima donji toplotni efekat od 23 800-26 880 kJ/kg (srednja vrednost

25 840 kJ/kg). Analize pepela su pokazale sledeći sadržaj:

Tabela 5a.

SiO ₂	-	30,42	do	59,10 %
Fe ₂ O ₃	-	4,20	do	19,20 %
Al ₂ O ₃	-	12,55	do	33,21 %
CaO	-	3,90	do	16,96 %
MgO	-	0,42	do	7,92 %
SO ₃	-	2,03	do	15,64 %
P ₂ O ₅	-	0,06	do	0,46 %
TiO ₂	-	0,28	do	1,63 %
Na ₂ O	-	0,20	do	1,35 %
K ₂ O	-	0,51	do	3,14 %

Reakcija je izrazito do slabo bazna. Analiza topljivosti pepela urađena u oksidacionoj atmosferi pokazala je sledeće:

- početak sinterovanja 860 ° - 1 080 °
- tačka omekšavanja 990 ° - 1 240 °
- tačka polulopte 1 200 ° - 1 400 °
- tačka razlivanja 1 255 ° - 1 410 °

U okviru tehničko-hemijskih analiza utvrđeno je da je ugalj u ležištu "Melnica" bitumenozan, s obzirom na to da sadrži organsku supstancu (kerogen) iz koje se putem suve destilacije izdvaja sirovo ulje. Sadržaj sirovog ulja određen putem švelnih analiza na uzorcima uglja iz tri bušotine, iznosio je 4,33 %, 2,89 % i 5,6 %, te ovaj ugalj predstavlja vrlo interesantnu mineralnu sirovinu.

5. EKSPLOATAACIONI USLOVI

U ovoj analizi pod eksploatacionim uslovima obuhvaćene su:

- hidrogeološke karakteristike ležišta;
- inženjersko-geološke karakteristike;
- samozapaljivost uglja;
- gasonosnost;

Hidrogeološke karakteristike ležišta "Melnica", bez obzira na veći broj istražnih bušotina, ne mogu se jasno definisati, već se samo na osnovu nekih pojava podzemnih voda na istražnim bušotinama i na osnovu litološkog sastava i tektonskog sklopa ležišta može uopšteno govoriti o pojedinim hidrogeološkim pojavama i parametrima. Na osnovu sprovedenih istraživanja da se zaključiti da se na području ležišta mogu javiti izdani formirane u okviru stenskih masa sa intergranularnom poroznošću i izdani sa pukotinskom poroznošću. Po svom hidrauličkom mehanizmu, ove izdani mogu biti sa slobodnim nivoom, subarterskog ili arteriskog karaktera. U pogledu formiranja izdani, najinteresantniji su sedimenti sarmatske i crvene seri-

je, dok je moćna produktivna serija izgrađena od laporaca, laporovitih glina i uglja u podini, kao i podinski paleozojski sedimenti u svom primarnom razviću predstavljaju hidrogeološke izolatore. U okviru sedimenata crvene, a naročito sarmatske serije, javljaju se i hidrogeološki kolektori i hidrogeološki izolatori podzemnih voda. Sa stanovišta hidrogeoloških svojstava, ovo ležište praktično bi bilo idealno za izvođenje rudarskih radova, bez obzira na debljinu vodonosnih slojeva i izdani, da nije došlo do sekundarnih tektonskih pokreta i stvaranja raseda i pukotina koje mogu bitno uticati na hi-

drogeološke karakteristike i ukupnu ovodnjenost ležišta.

Fizičko-mehanička svojstva uglja su ispitivana na većem broju uzoraka (tabela 6), dok su prateće stene istraživane u vrlo skromnom obimu. Neposredna i osnovna podina, s obzirom na to da je čini glinoviti materijal sa izrazitim plastičnim svojstvima, predstavljaće složenu radnu sredinu pri radovima eksploatacije. Sa stanovišta izrade rudarskih prostorija, stene neposredne krovine predstavljaju znatno povoljniju radnu sredinu.

Tabela 6.

Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih osobina uglja

Redni broj	Oznaka bušotine	Naziv i vrednost parametra								
		γ_1 (t/m ³)	W (%)	δ_c (daN/cm ²)	δ_i (daN/cm ²)	C (daN/cm ²)	φ (°)	E (daN/cm ²)	(N/cm)	(N/cm ²)
1.	$\pi B-1$ 694 228,80-229,00	1,25	5,600	65,51	5,20	10,65	56°55'	16 743,00		
2.	229,80-230,00	1,25	50,69	85,14	13,00	18,27	45°21'	12 230,00	1 377,30	606,30
3.	230,80-231,00	1,18	63,81	127,30	8,90	19,61	58°49'	13 260,00		
4.	231,80-232,00	1,27	55,24	62,90	3,70	9,00	61°16'			
5.	232,80-233,00	1,29	57,36	74,50	17,70	19,06	37°49'	20 760,00		
6.	233,80-234,00	1,24	58,24	137,70	9,90	31,47	58°24'	10 000,00		
7.	234,00-235,00	1,22	64,20	63,72	8,10	12,66	49°27'	12 300,00		
8.	235,80-236,00	1,35	51,91							
9.	236,80-237,00	1,16	50,50							
10.	237,80-238,00	1,24	50,39	109,10	6,18	15,36	61°47'	9 400,00		
11.	238,00-239,00	1,73	41,21	2,96						
12.	239,80-240,00	1,47	36,17							
13.	$\pi B-1$ 689 33,50-33,80	1,27	61,83	35,10	2,31	4,36	54°43'	8 200,00		
14.	36,50-36,70	1,21	52,68	151,60	5,80	18,06	66°49'	11 767,00	1 717,40	227,80
15.	40,30-40,60	1,32	58,53	38,90	1,30	4,37	68°22'			
16.	$\pi C-1$ 684 216,45-216,70	1,28	45,06	59,72	2,32	7,16	66°38'		1 463,80	194,10
17.	213,30-220,99	1,20	40,41	92,85	6,01	13,93	60°38'			
18.	$\pi A-1$ 725 143,80-144,00	1,24	47,86	125,60	7,40	17,99	61°15'	9 714,90	1 731,20	229,60
19.	144,80-145,00	1,24	34,04	72,80	5,49	11,58	57°42'	9 396,10		
20.	145,80-146,00	1,21	51,81	153,50	7,30	20,00	64°07'	11 543,40		
21.	146,80-147,00	1,25	40,60	12,21	33,30		63°57'	26 964,10		
22.	147,80-148,00	1,27	49,26	70,80	12,50	16,30	43°46'	7 829,40		
23.	238,00-239,00	1,73	41,21	2,96						

γ_1 - Zapreminska masa
W- Vlažnost

σ_c - Čvrstoća na pritisak
 σ_i - Čvrstoća na istezanje

C – Kohezija
 φ – Ugao unutrašnjeg trenja

E – Modul elastičnosti
F – Sila rezanja

Gasne karakteristike ležišta utvrđivane su pri izvođenju istražnih radova, pri čemu su utvrđene pojave metana koji je isticao ekshalacijom, a na dve bušotine je registrovano izbacivanje gasa pod pritiskom, te se ležište tretira kao metansko.

Ispitivanjem uzoraka uglja u laboratorijskim uslovima utvrđeno je da je sloj sklon ka procesu samozapaljenja, a da je ugljena prašina zapaljiva i eksplozivno opasna.

6. OCENA PERSPEKTIVNOSTI AKTIVIRANJA LEŽIŠTA U PROIZVODNOM SMISLU

Na osnovu postojećeg stepena istraženosti, nesumljivo se može zaključiti da je ovo ležište perspektivno sa stanovišta eksploatacije.

Granice ležišta predisponirane su uslovima stvaranja ugljenog sloja i intenzivno razuđenom tektonikom. Istočna i jugoistočna granica jednim delom je obeležena izdankom ugljenog sloja, a drugim delom je erozionog karaktera. U pravcu severoistoka i jugozapada, gde ugljeni sloj isklinjava, granica je povučena po izolaciji debljine sloja od 2,5 m. U pravcu severozapada i zapada ležište tone i u tom pravcu nije okontureno.

Pored generalne podele na severno i južno polje, ležište je podeljeno i na četiri makrobloka sledećih veličina:

Tabela 6a.

Blok	Površina (km ²)	Dubina zaleganja (m)	Dužina po pružanju (m)
Blok I (severno polje)	0,80	10 - 260	1 000 - 1 200
Blok II (severno polje)	1,80	210 - 370	1 000 - 1 200
Blok III (južno polje)	0,40	40 - 240	700 - 1 000
Blok IV (južno polje)	0,85	220 - 300	700 - 1 000

U bloku I izbušene su 22 istražne bušotine, kojima je utvrđena debljina ugljenog sloja u granicama 4,10-16,30 m, pri čemu je samo u 6 bušotina registrovan sloj homogene građe. U 7 bušotina utvrđen je ugljeni sloj sa više jalovih proslojaka, koji su prostorno koncentrisani u donjem delu sloja, a u ostalih 6 bušotina sloj je praktično podeljen na dva ogranka. Srednja debljina sloja u ovom bloku iznosi 9,5 m, a od toga na čist uglj otpada 7,60 m.

U bloku II sadržaj jalovine u sloju opada, a debljina se najčešće kreće u granicama 6-14 m (srednja vrednost 9,90 m, od čega čist uglj 9,20 m).

Blok III je istražen samo sa 4 bušotine, te se dobijene srednje vrednosti debljine i kvaliteta moraju potvrditi dodatnim istraživanjima.

U bloku IV izmenljivost debljine ugljenog sloja je jače izražena i iznosi 2-13 m, pri čemu je srednja vrednost 8,70 m, a čistog uglja 8,0 m.

Blok II i pored činjenice da najdublje zaleže (210-370 m) prema količini (18 435 260 tona) i koncentrisanosti rezervi uglja, debljini ugljenog sloja ($h_{sr}=9,90$ m) i srednjoj toplotnoj vrednosti od 11 177 kJ/kg, ocenjuje se kao najperspektivniji sa aspekta mogućnosti organizovanja proizvodnje uglja u ležištu. Takođe, s obzirom na to da u ovom bloku nisu utvrđene granice prostiranja sloja, to je velika verovatnoća povećanja rezervi.

Pokazatelji koji su diktirani geološko-tektonskim i genetskim karakteristikama ovog ležišta i manja naseljenost severnog polja, kao važna ekonomska kategorija, doprinosi znatnom poboljšanju njegovih tehno-ekonomskih pokazatelja, u odnosu na istu u južnom polju.

7. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata do sada izvedenih istraženih radova u ležištu "Melnica" može se zaključiti da se radi o značajnom energetskom potencijalu, čije bi aktiviranje doprinelo poboljšanju energetske situacije u Republici Srbiji. Kvantitativne i kvalitativne karakteristike uglja ukazuju na veoma interesantnu sirovinu, posebno što se radi o uglju koji sadrži organsku supstancu (kerogen) što daje veoma dobre predispozicije za dobijanje briketa iz ovog uglja.

Elementi zaleganja ugljenog sloja i druge prirodne karakteristike ukazuju na mogućnost široke primene mehanizacije u tehnološkim fazama izrade rudarskih prostorija, otkopavanja, otpreme iskopine, dopreme repromaterijala i prevoza zaposlenih, a što može imati značajan efekat na ekonomske parametre rada budućeg rudnika.

8. LITERATURA

- [1] Vušović M. i dr: STUDIJA IZVODLJIVOSTI ZA RUDNIK "MELNICA", RI-Beograd, 1994.
- [2] Ignjatović R. i dr: TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MOGUĆNOSTI OSTVARENJA, EKSPLOATACIJE, KONCENTRACIJE I BRIKETIRANJA UGLJA LEŽIŠTA "MELNICA", TF-Bor, 1997.
- [3] ELABORAT O KATEGORIZACIJI I KLASIFIKACIJI REZERVU UGLJA LEŽIŠTA "MELNICA", Ugaljprojekt, 1988.

Budimir Rosić,
Nikola Ćuk, Milan Petrović

Programski sistem za proračun i optimizaciju toplotnih šema termoenergetskih postrojenja

Originalni naučni rad
UDK: 536.8; 621.311.22

Rezime:

U radu je prikazan programski sistem za termodinamički proračun i optimizaciju toplotnih šema termoenergetskih postrojenja opšte konfiguracije. Metodologija je zasnovana na simultanom pristupu rešavanja sistema nelinearnih jednačina pomoću modifikovanog Njutnovog metoda Pauela. Za proračun termodinamičkih veličina stanja vode i vodene pare koristi se novi sistem jednačina prema standardu IAPWS97, dok je za vazduh i produkte sagorevanja razvijen potprogram baziran na sistemu Berovih (1988) jednačina. Mogućnosti programskog sistema **MODELAR** prikazane su na primeru proračuna toplotne šeme parnog bloka 620 MW TENT B u Obrenovcu, i parnog bloka 800 MW TE „Schwarze Pumpe”.

Ključne reči: termodinamički ciklusi, proračun, optimizacija

Abstract:

PROGRAM SYSTEM FOR THERMODYNAMIC DESIGN AND OPTIMIZATION OF THERMAL POWER PLANT

A program system is presented, which makes the thermodynamic design and optimisation of thermal power plants cycles. The solution procedure is based on the Powell's hybrid modification of Newton method for simultaneous solution of the existing non-linear equations for each power plant component. In order that the thermodynamic properties water and steam may be calculated, a sub-program system is used which is based on a Baehr's system of equations. This paper presents some aspects of the program applications in thermodynamic analysis of steam turbine power plants 620 MW TENT B – Obrenovac, and 800 MW „Schwarze Pumpe” Germany.

Key words: thermodynamic cycles, calculation, optimisation

1. UVOD

Proračuni toplotnih šema termoenergetskih postrojenja, njihovo bilansiranje i određivanje ekonomičnosti rada postrojenja primenjuju se u svim fazama životnog veka postrojenja, počev od projektovanja, pa sve do kraja njegove eksploatacije.

Zbog sve strožijih zahteva u pogledu racionalnijeg iskorišćenja izvora energije i širokog spektra zahteva i potreba korisnika termoenergetskih postrojenja za različitim oblicima korisne energije stalno se ulažu naponi za postizanjem termodinamičkih ciklusa sa sve višim stepenom korisnosti.

Mr Budimir Rosić dipl. ing., prof. Nikola Ćuk u penziji, Vanredni profesor Milan Petrović –
Mašinski fakultet, 11000 Beograd, 27. marta 80

To dovodi do značajnog usložavanja toplotne šeme, i do zahteva za visokom tačnošću prilikom termodinamičkih proračuna i analize toplotnih šema termoenergetskih postrojenja. Takođe, izbor najekonomičnije konfiguracije postrojenja je veoma složen i ne zavisi samo od upotrebene tehnologije i karakteristike zahteva potrošača za energijom, već i od različitih ekonomskih parametara, kao što su cena goriva i cena električne energije.

Iz navedenog se jasno može zaključiti da se ovako složeni proračuni i analize ne mogu sprovesti ručno, već da se moraju razviti odgovarajući softverski alati za proračun i optimizaciju toplotnih šema. Brzi razvoj i sve veće mogućnosti računara upravo i omogućava razvoj ovakvih programa. Pored toga, bez obzira na veliki broj mogućih konfiguracija, sve toplotne šeme sastoje se od određenog broja standardnih komponenata (turbine, kompresori, pumpe, zagrejači različitih tipova, itd.). Zbog svega navedenog, razvijaju se programski alati za proračun najrazličitijih toplotnih šema koje se sastoje od komponenata istog tipa. Do sada je razvijeno više ovakvih programa, različitih karakteristika, opsega primene i nivoa proračuna. Stalni razvoj računarske opreme, usavršavanje matematičkog aparata i algoritama za rešavanje različitih problema prilagođenih primeni na računaru, kao i napredak u teorijskom i eksperimentalnom proučavanju postrojenja, pružaju mogućnosti za razvoj sve kvalitetnijih programskih alata ovakve vrste. Na Mašinskom fakultetu u Beogradu Grupa za termoenergetska postrojenja i toplotne turbomašine razvila je univerzalni programski sistem nazvan **MODELAR** za proračun i optimizaciju toplotnih šema termoenergetskih postrojenja opšte konfiguracije.

2. FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA TOPLOTNE ŠEME

Proračunati toplotnu šemu nekog termoenergetskog postrojenja znači odrediti vrednosti masenih protoka i termodinamičkih veličina stanja u svim cevnim vezama između elemenata toplotne šeme. Za svaku komponentu toplotne šeme formira se matematički model, tj. skup nezavisnih jednačina koje opisuju fizičko ponašanje komponente. Navedene jednačine mogu biti:

– Jednačine masenog bilansa $\sum_{i=1}^m \dot{m}_i = 0$;

– Jednačine energetskog bilansa $\sum_{i=1}^m \dot{m}_i h_i + \sum_{i=1}^m P_i + \sum_{i=1}^m \dot{Q}_i = 0$;

– Jednačine bilansa pritiska $\sum_{i=1}^m p_i = 0$;

– Funkcionalne jednačine koje opisuju ponašanje komponente (npr. jednačina ekspanzije u turbini

pomoću unutrašnjeg stepena korisnosti: $(h_{iz} - h_{ul} - \eta_s (h_{iz,s} - h_{ul})) = 0$) i koje služe za određivanje veličina stanja koje su povezane sa ponašanjem nekog elementa;

– Jednačine koje omogućavaju uvođenje u proračun ulaznih parametara, tj. graničnih uslova kao što su parametri sveže i dogrejane pare na ulazu u parnu turbinu, pritisak u kondenzatoru, itd.

Na osnovu tako definisanih komponenti, formira se biblioteka – katalog standardnih elemenata koja se koristi za konfigurisanje najrazličitijih toplotnih šema. U daljem postupku formiranja modela ciklusa iz kataloga se selektuju komponente i spajaju na željeni način strujnim ili energetskim vezama, uz istovremeno kreiranje baze podataka sa kodirano definisanom topografijom toplotne šeme. Za to je pogodno koristiti jedan grafički predprocesor, što dodatno olakšava korišćenje ovakvog programa, kao i brzinu izvršenja proračuna.

Stanje svake tačke cevovoda je definisano zadavanjem masenog protoka, pritiska i entalpije. Ove tri veličine čine **vektor stanja** $z_i = (m_i, h_i, p_i)$ nepoznatih veličina za svaku cevnu vezu, tako da se za ukupni broj cevovoda n_c dobije ukupno $3n_c$ nepoznatih veličina koje je potrebno odrediti. Kod međusobno povezanih komponenti, ove vrednosti su jednake u strujnim vezama između njih. Zato je moguće iskoristiti strukturu tako povezanog sistema komponenata za matematičko modelovanje toplotne šeme. Matematički, to znači formirati sistem nelinearnih jednačina sabiranjem svih raspoloživih jednačina koje opisuju ponašanje komponenata. Rešavanjem tog sistema jednačina dobijaju se maseni protoci, vrednosti termodinamičkih veličina stanja u svim strujnim vezama kao i ukupnog stepena korisnosti ciklusa.

Postoje dva generalna pristupa u rešavanju toplotnih šema termoenergetskih postrojenja, odnosno rešavanja formiranog sistema jednačina. Prvi je **sekvencijalni pristup** (*Sequential approach*), gde proračun toplotne šeme počinje sa pogodnog mesta na toplotnoj šemi (npr. glavni ventil ispred turbine kod parnog bloka) i odvija se dalje u pravcu strujanja radnog fluida, tako da izlaz iz jedne komponente toplotne šeme predstavlja ulaz u narednu komponentu. Drugi je **simultani pristup** (*Simultaneous approach*), gde se postavlja sistem nelinearnih jednačina za sve komponente toplotne šeme postrojenja, koje se rešavaju istovremeno. Osnovni nedostatak prvog pristupa je smanjena fleksibilnost programa, jer se mora definisati redosled proračuna za svaku toplotnu šemu. Zbog složenosti toplotnih šema savremenih postrojenja, sa mnoštvom povratnih strujanja praktično je nemoguće razviti univerzalni programski alat za proračun toplotnih šema opšte konfiguracije, koji bi bio baziran na sekvencijalnom pristupu. Drugi pristup,

zbog istovremenog rešavanja sistema velikog broja nelinearnih jednačina, zahteva veliki memorijski prostor računara kao i definisanje startnog vektora pretpostavljenih vrednosti nepoznatih veličina početka proračuna toplotne šeme. Razvojem računara i razvojem odgovarajućih pretprocesora za definisanje startnog vektora, ovi nedostaci simultanog pristupa su ublaženi tako da je ovaj pristup danas opšte prihvaćen u postupku automatskog rešavanja toplotnih šema od svih autora.

Programski sistem **MODELAR** koji je opisan u ovom radu zasnovan je na simultanom pristupu rešavanja sistema nelinearnih jednačina. Za iteracioni proces rešavanja sistema nelinearnih algebarskih jednačina iskorišćena je modifikovana Njutnova (Newton) metoda Pauela (Powell), koja je opisana u [1, 5, 6]. Primenjena metoda, u poređenju sa ostalim metodama ovoga tipa, poseduje najbolja svojstva konvergencije, i dozvoljava i loše procenjene vrednosti startnog vektora nepoznatih veličina što je pokazano u [1].

3. PRORAČUN TERMODINAMIČKIH VELIČINA STANJA

Da bi se proračun toplotne šeme uspešno sproveo neophodno je tačno i brzo odrediti termodinamičke veličine stanja radne materije koja se u ciklusu pojavljuje. Za proračun termodinamičkih veličina stanja vode i vodene pare, iskorišćen je sistem jednačina prema novom standardu IAPWS-IF97[2]. Sistem se sastoji od grupe jednačina za različite regione i pokriva sledeći opseg veličina stanja: $273,15 \text{ K} \leq T \leq 1\,073,15 \text{ K}$, $p \leq 100 \text{ MPa}$ i $1\,073,15 \text{ K} \leq T \leq 2\,273,15 \text{ K}$, $p \leq 10 \text{ MPa}$. Proračun veličina stanja pomoću sistema jednačina IAPWS-IF97 je tačniji (za čitav red veličina) i brži (4 do 12 puta) u odnosu na prethodno važeći sistem jednačina IFC-67.

Za određivanje termodinamičkih veličina stanja vazduha i produkata sagorevanja razvijena je posebna metodologija bazirana na Berovom (Baehr) (1988.) sistemu jednačina [3,4]. Model sadrži interpolacione polinome za određivanje entalpije i entropije različitih gasova i važe u oblasti temperatura od -50 °C do $2\,250 \text{ °C}$. Sastav produkata sagorevanja se određuje u jednom nezavisnom postupku, u zavisnosti od vrste goriva i uslova sagorevanja. Na osnovu zakona smeše idealnih gasova, određuju se i veličine stanja produkata sagorevanja. Tačnost određivanja termodinamičkih veličina stanja ovako razvijenim algoritmom je znatno veća u odnosu na metode koje jednim analitičkim postupkom pokušavaju da objedine uticaj vrste goriva i uslova sagorevanja na termodinamičke veličine stanja. Primenjena metodologija je veoma pogodna za određivanje termodinamičkih ve-

ličina stanja pri nepotpunom sagorevanju, dodatnom sagorevanju, pri ubrizgavanju vode ili vodene pare u gasnu turbinu, uzimanjem u obzir vlažnosti vazduha.

4. STRUKTURA PROGRAMSKOG SISTEMA MODELAR

Na osnovu definisanog matematičkog modela raspoloživih komponenata, usvojene osnovne koncepcije rešavanja sistema jednačina i razvijene pouzdane i tačne metodologije za proračun termodinamičkih veličina stanja radne materije razvijen je složen programski sistem, čiji je strukturni blok dijagram prikazan na slici 1. Sa slike se mogu videti glavne programske celine programskog sistema **MODELAR** i kao tok proračuna jedne toplotne šeme.

Programski sistem **MODELAR** zadovoljava sledeće zahteve u osnovi primenjene prilikom njegovog razvoja:

- **Velika fleksibilnost:** Može se modelirati i proračunati toplotna šema željene konfiguracije bez ograničenja.
- **Jednostavnost upotrebe:** potrebno je obezbediti samo podatke o toplotnoj šemi dok je redosled zadavanja elemenata i tok proračuna proizvoljan.
- **Modularna struktura:** omogućava jednostavnu promenu i nadgradnju programa.

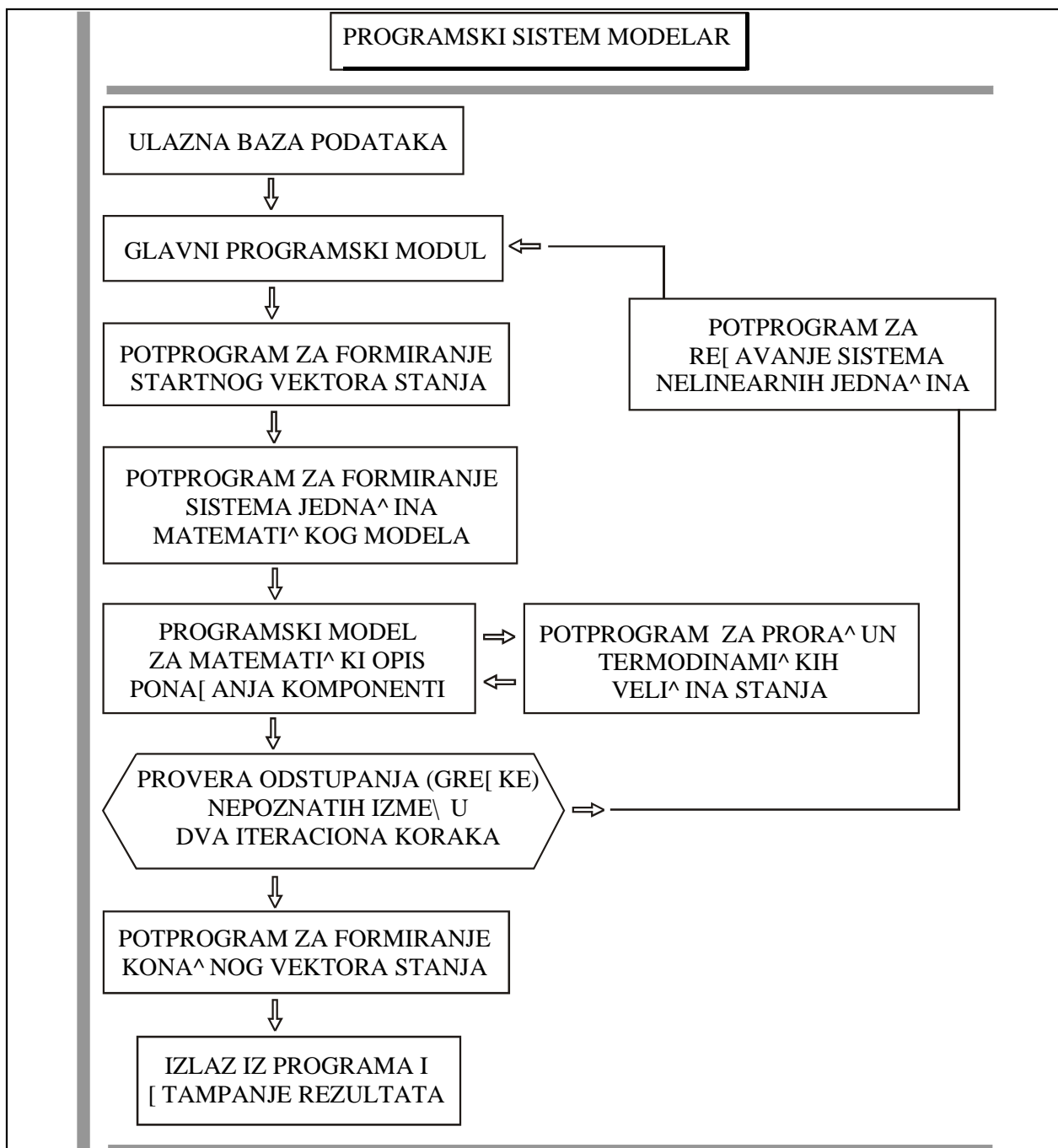
5. PRIKAZ MOGUĆNOSTI PROGRAMSKOG SISTEMA MODELAR

Programski sistem modelar razvijen je za rešavanje toplotnih šema termoenergetskih postrojenja opšte konfiguracije i to:

- **parnih blokova:** najsloženije konfiguracije regenerativnog sistema za zagrevanje glavnog kondenzata i napojne vode, spregnuta proizvodnja električne i toplotne energije;
- **gasnih blokova:** ciklusi sa dogrevanjem, rekupeacijom, međuhlađenjem i ubrizgavanjem vodene pare;
- **kombinovanih postrojenja gasne i parne turbine:** sa ili bez dodatnog sagorevanja u kotlu utilizatoru, sa istim ili različitim gorivom u procesu dodatnog sagorevanja, kotao utilizator sa jednim dva ili tri nivoa pritiska.

Pored navedenog osnovnog proračuna rešavanja toplotne šeme, za navedene tipove toplotnih šema mogu se izvoditi i sledeće analize i proračuni:

- uticaj pojedinih parametara na radne karakteristike postrojenja;
- analize rada postrojenja sa isključenim pojedinih komponentama;
- rad postrojenja sa izmenjenim komponentama postrojenja;
- određivanje optimalnih parametara rada postrojenja;



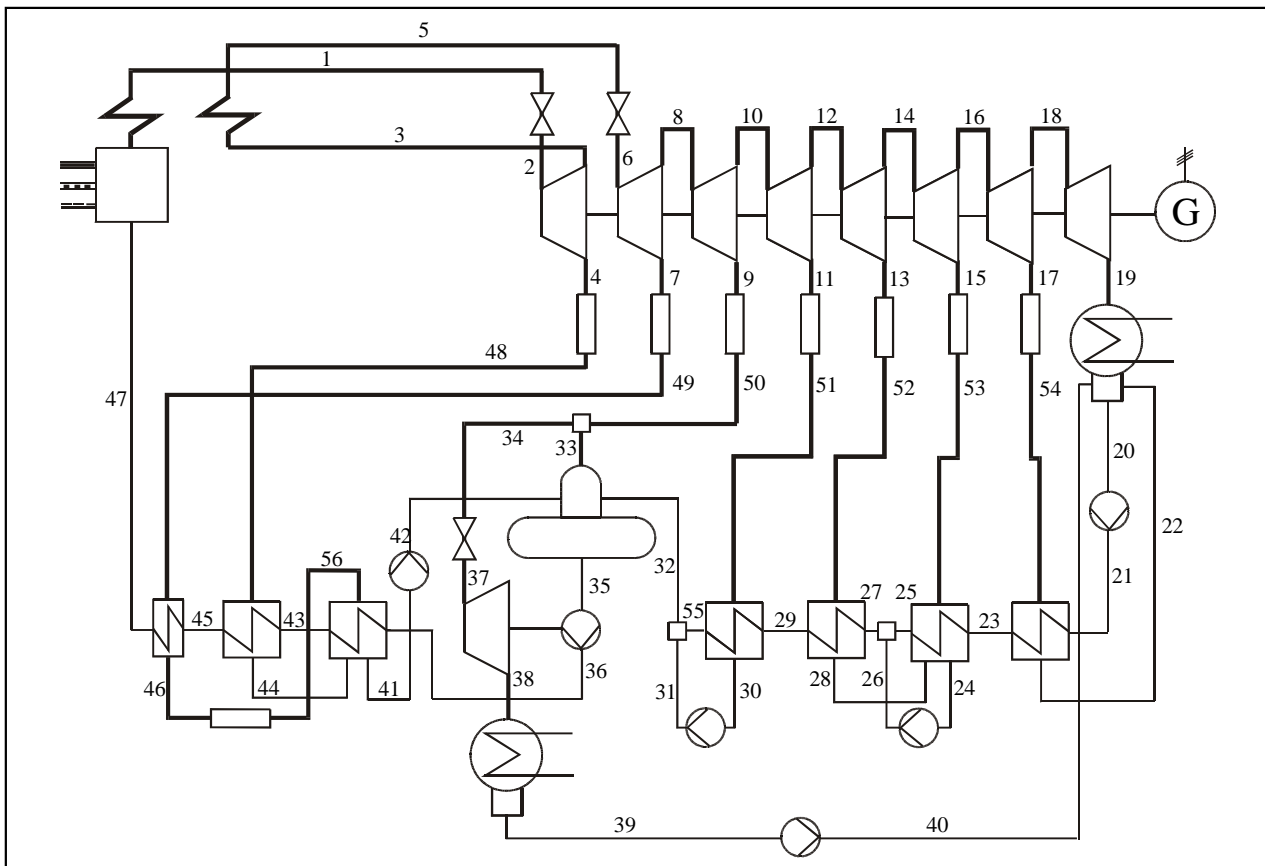
Slika 1. Blok dijagram strukture programskog sistema **MODELAR**

- bilansiranje postrojenja po I i II zakonu termodinamike;
- izbor optimalne konfiguracije postrojenja prema zahtevima korisnika.

U ovom radu prikazane su samo mogućnosti programa u proračunu složenih toplotnih šema savremenih parnih blokova velike snage. U tabeli 1 prikazan je samo deo grafičke biblioteke sa definisanim elementima koji se koriste u izradi modela par-

nog bloka. Na slici 2 prikazan je model toplotne šeme parnog bloka 620 MW TENT B u Obrenovcu, sa definisanim komponentama i obeleženim cevnicima između komponenti, čime se obezbeđuju informacije o topografskoj strukturi modela toplotne (taberla 2.) šeme. Ispod modela šeme prikazan je tabelarno rezultat proračuna toplotne šeme, odnosno vrednosti masenih protoka i termodinamičkih veličina stanja u svakoj cevnoj vezi toplotne šeme. Od-

Grafička oznaka i naziv elementa					
BOILER	STURBINE	VALVE	CONDENSER	REHEATER	DISTRICT_ HEATER
DEAERATOR	PRESSURE_ DROP	TECHNOLOGY_ STEAM	HEATER_TYPE1	STEAM_COOLER	WATER_ RECOVERY
HEATER_TYPE2	TURBO PUMP	SPLITTER	PUMP	MIXER	GENERATOR



Slika 2. Model bloka 620 MW TENT B

**GLAVNA MATRICA
TOPLOTNE SCHEME POSTROJENJA**

CEVNA VEZA	m [kg/s]	h [kJ/kg]	p [bar]	t [°C]	s [kJ/kg]
1	506,70	3 377,5	177,50	535,19	6,3659
2	506,70	3 377,5	172,18	533,02	6,3780
3	468,31	3 037,7	43,570	331,36	6,4558
4	38,390	3 037,7	43,570	331,36	6,4558
5	468,31	3 526,8	39,213	535,61	7,2061
6	468,31	3 526,8	38,821	535,41	7,2103
7	31,290	3 368,5	23,370	456,79	7,2293
8	437,02	3 368,5	23,370	456,80	7,2293
9	41,152	3 148,9	10,630	345,96	7,2605
10	395,87	3 148,9	10,630	345,96	7,2605
11	22,680	2 991,9	5,5100	265,54	7,2861
12	373,19	2 991,9	5,5100	265,54	7,2861
13	20,767	2 808,6	2,2300	170,29	7,3229
14	352,42	2 808,6	2,2300	170,29	7,3229
15	15,111	2 656,1	81000	93,915	7,4013
16	337,31	2 656,1	81000	93,915	7,4013
17	22,135	2 525,2	0,29800	68,944	7,4801
18	315,18	2 525,2	0,29800	68,941	7,4806
19	315,18	2 305,2	0,42 000E-01	29,873	7,6282
20	359,25	124,93	0,42 000E-01	29,862	0,43454
21	359,25	129,14	34,000	30,129	0,43693
22	22,135	188,75	0,28310	45,175	0,64046
23	359,25	273,09	33,660	64,662	0,88785
24	35,878	333,22	0,76950	79,642	1,0703
25	359,25	376,61	33,323	89,342	1,1835
26	35,878	337,37	33,323	239,74	1,3373
27	395,13	373,05	33,323	239,74	1,4061
28	20,767	433,78	2,1207	103,42	1,3458
29	395,13	497,87	32,990	118,03	1,5045
30	22,680	559,69	5,2345	133,06	1,6652
31	22,680	562,57	32,660	133,22	1,6654
32	417,81	633,41	32,660	238,64	1,9120
33	19,211	3 148,9	9,7796	345,20	7,2981
34	21,941	3 148,9	9,7796	345,19	7,2984
35	506,70	758,20	9,7796	178,89	2,1285
36	506,70	790,83	254,00	183,32	2,1432
37	21,941	3 148,9	8,3127	343,81	7,3728
38	21,941	2 387,7	0,56 669E-01	35,142	7,7732
39	21,941	147,14	0,56 669E-01	35,206	0,50748
40	21,941	147,61	2,0000	35,263	0,50825
41	69,680	845,51	21,693	198,42	2,3149
42	69,680	847,30	34,000	198,73	2,3152
43	506,70	928,96	251,46	215,08	2,4301
44	38,390	990,60	41,391	230,08	2,6082
45	506,70	1 082,5	248,95	248,93	2,7241
46	31,290	2 927,0	22,201	263,07	6,5474
47	506,70	1 109,8	247,70	254,87	2,7759
48	38,390	3 037,7	41,391	329,02	6,4776
49	31,290	3 368,5	22,201	456,11	7,2525
50	41,152	3 148,9	9,7796	345,16	7,2985
51	22,680	2 991,9	5,2345	265,12	7,3094
52	20,767	2 808,6	2,1207	169,96	7,3451
53	15,111	2 656,1	0,76950	92,536	7,4247

Nastavak

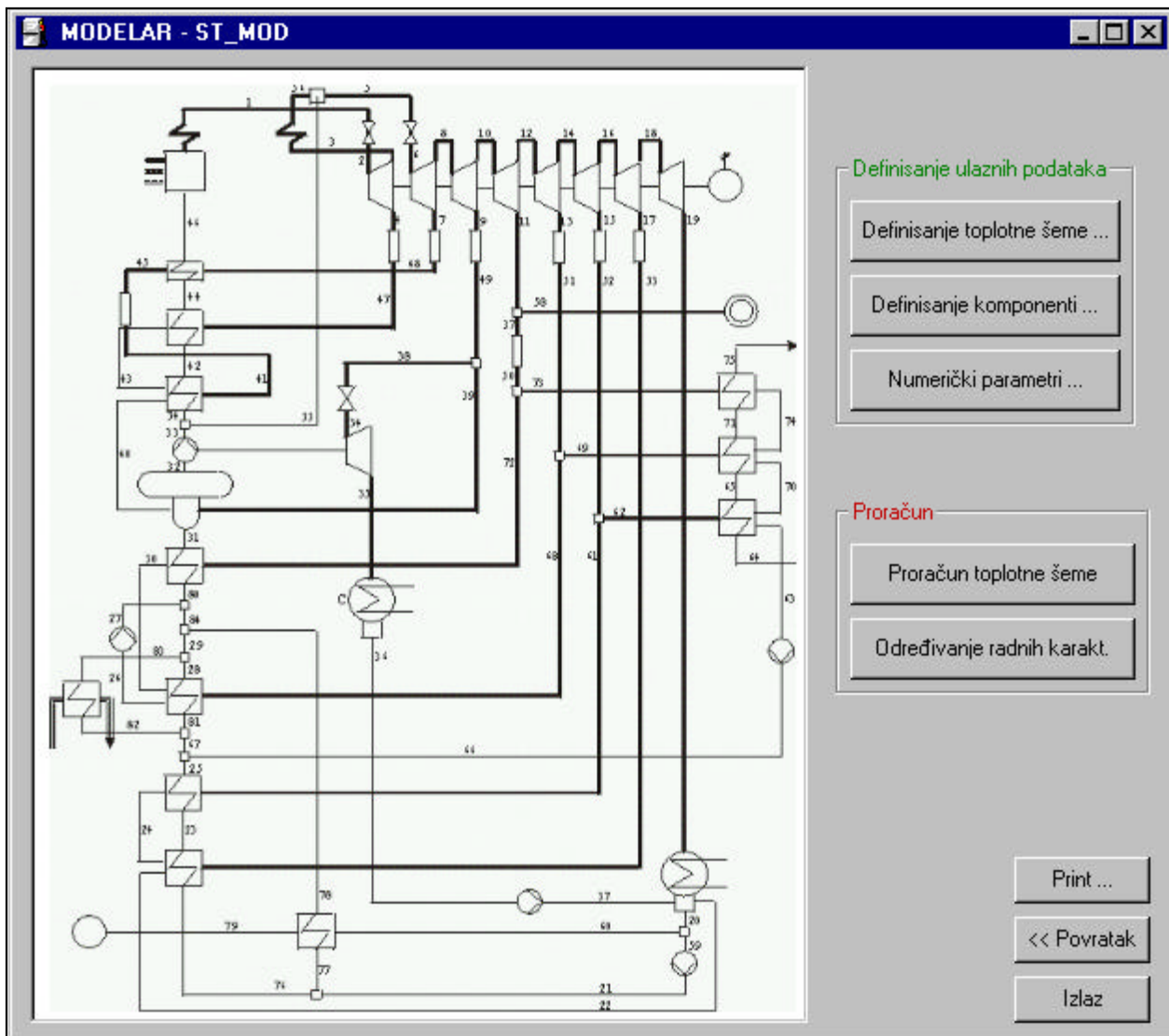
54	22,135	2525,2	0,28310	67,766	7,5027
55	395,13	637,47	32,660	150,72	1,8462
56	31,290	2927,0	21,693	262,21	6,5573
MATEMATIČKI PARAMETRI ZA OCENU NUMERIČKOG PRORAČUNA					
BROJ_ITERACIJA=		704			
FNORM=		0,30465E-11			
ZADATA_VREDNOST_GREŠKE (ERR_REL)=		10000 E-0,7			
GLAVNI TERMODINAMIČKI PARAMETRI POSTROJENJA					
L_ieqT(kJ/kg)= 1263,1					
L_Gb(kJ/kg)= 1238,0					
P_GB(MW)= 627,29					
Q_Bb(kJ/kWs)= 2,6154					
ETA_Bb(-)= 38235					
q_TPb(kJ/kWs)= 21969					
ETA_TPb(-)= 0,45518					

stupanje proračunatih vrednosti od vrednosti datih od strane proizvođača za posmatrani režim rezultat su neraspolaganja tačnim vrednostima određenih parametara koji su potrebni za definisanje ulazne baze podataka.

Na slici 3 prikazan je model toplotne šeme parnog bloka 800 MW TE „Schwarze Pumpe”. Blok u nominalnom režimu ostvaruje električnu snagu od 756 MW, u kombinovanoj proizvodnji sa 60 MJ/s (145 °C / 70 °C) toplote za daljinsko grejanje i sa oduzimanjem 400 t/h suvozasicene tehnološke pare 4,5 bar. Radi se o savremenom parnom bloku sa nadkritičnim parametrima sveže pare (257 bar / 544 °C), gde su primenjena skoro sva moguća rešenja u pogledu povišenja stepena korisnosti i optimizacije toplotne šeme. Zato ovaj primer najbolje ilustruje mogućnosti programskog sistem MODELAR u pogledu rešavanja najsloženijih toplotnih šema parnog bloka. Rešenje ove toplotne šeme postiže se nakon 785 iteracionih koraka (pri zadatoj vrednosti relativne greške kao zaustavnog kriterijuma od 10⁻⁸), što na standardnoj PC konfiguraciji traje i manje od nekoliko minuta.

6. ZAKLJUČAK

Programski sistem MODELAR omogućava proračun toplotnih šema termoenergetskih postrojenja opšte konfiguracije. Programski sistem karakteriše visoka tačnost i brzina proračuna, velika fleksibilnost kao i jednostavnost upotrebe. Primenjeni matematički model omogućava stabilan iteracioni proces brzo konvergenciju čak i u slučajevima loše pretpostavljenih vrednosti startnog vektora. Razvijena metodologija za proračun termodinamičkih veličina sta-



Slika 3. Toplotna šema parnog bloka 800 MW TE „Schwarze Pumpe”.

nja radne materije je tačna i brza. Program se može uspešno primenjivati u svim fazama životnog veka jednog termoenergetskog postrojenja. U fazi projektovanja program se koristi za izbor toplotne šeme postrojenja prema zahtevima korisnika – industrijsko-tehnološkog sistema (potrebe i dijagram potrošnje električne i toplotne energije, tehnološke pare itd.), toplane ili termoelektrane. U toku eksploatacije postrojenja ovakav programski alat koristi se za garancijska i pogonska ispitivanja, simultano praćenje parametara procesa i određenih parametara, analizu performansi i optimizaciju rada postrojenja. Na primeru dva savremena parna bloka velike snage programski sistem je potvrdio svoje vrednosti u pogledu rešavanja i najsloženijih konfiguracija toplotnih šema parnog bloka.

7. LITERATURA

- [1] Rosić B., RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA I RAČUNARSKOG PROGRAMA ZA PRORAČUN I OPTIMIZACIJU TOPLOTNIH ŠEMA TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA, Magistarska teza, Mašinski fakultet – Beograd, 2000.
- [2] Wagner, W., Kruse, A., PROPERTIES OF WATER AND STEAM, THE INDUSTRIAL STANDARD IAPWS-IF97 FOR THE THERMODYNAMIC PROPERTIES AND SUPPLEMENTARY EQUATIONS FOR OTHER PROPERTIES, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [3] Baehr H. D., Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen, BWK, BD. 40, Nr. 1/2 – januar/februar, pp. 30-33, 1988.
- [4] H. D. Baehr, Thermodynamik – eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, 1973.

- [5] Powell M. J. D., A Hybrid Method for Nonlinear Equations, Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations, Edited by Philip Rabinovitz, Gordon and Breach Science Publishers, London, 1970. pp. 87 – 114.
- [6] M. J. D. Powell, A FORTRAN Subroutine for Solving Systems of Nonlinear Algebraic Equations, Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations, Edited by Philip Rabinovitz, Gordon and Breach Science Publishers, London, 1970. pp. 115 – 150.
- [7] Riess W., Rofka S., A Program System for Thermodynamic Design, Optimisation and Part-Load Simulation of Thermal Power Plants Including Combined Cycles and Cogeneration, 49th ATI National Congress, Perugia, Italia, 26 – 30 September 1994.
- [8] Thermal balance software – A question of balance, Power Plant Technology Operations & Maintenance, Issue 16, pp. 10. – 17. August-September 1998.
- [9] Sandner T., Berechnung von Termischen Kreisprozessen mit Hilfe von Loesungsmethoden für nichtlineare Gleichungssysteme, Doktor-Ingenieurs Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, 1988.

Rad je primljen u uredništvo 10. 09. 2001. godine

Branislav M. Savić, Novica Vasiljević,
Saša Damnjanović, Titoslav Živanović i Dragan Tucaković

Softverski sistem za dijagnostiku rada parnog bloka

UDK: 621.311.22

Abstrakt

U ovom radu su prikazane glavne karakteristike i mogućnosti softverskog sistema za dijagnostiku rada parnog bloka zajedno sa različitim oblicima rezultata dobijenih njegovim korišćenjem. Primarno predviđen za kontrolu ekonomičnosti u cilju uštede goriva, naš softverski sistem razvijen za referentni parni blok, prevazilazi ovu osnovnu funkciju. Otkrivanje različitih uzroka odstupanja pojedinih parametara procesa i njihovog doprinosa na povećanje specifične potrošnje toplote omogućuje da se generalno poboljša rad parnog bloka u narednom pogonskom periodu, boljim vođenjem procesa, ali i takođe da se utvrde izmenjena pogonska stanja različitih komponenti parnog bloka. Značajno pogoršano stanje nekih komponenti trebalo bi da bude signal o potrebi njihove opravke. Mogućnost softverske "identifikacije" stacionarnih režima rada ne samo da služi većoj tačnosti primene postupka za kontrolu ekonomičnosti, već omogućava i dijagnostiku pogonskih uslova rada parnog bloka. Ova funkcija je veoma važna i može se iskoristiti za dobijanje odgovarajućih baza podataka i za druge važne svrhe, kao što je, na primer, proračun utroška radnog veka parne turbine. Naš softverski sistem je razvijen tako da radi potpuno samostalno i sigurno u svim predviđenim neregularnim uslovima, kao veoma komforan za korisnika i lako adaptivan za njegovo buduće usavršavanje i proširenje sa novo uključenim mer-nim parametrima procesa.

Ključne reči: parni blok, softverski sistem, kontrola ekonomičnosti, dijagnostika pogonskih uslova rada

Abstract:

SOFTWARE SYSTEM FOR DIAGNOSIS OF STEAM BLOCK OPERATION

Main characteristics and possibilities of the software system for diagnosis of steam block operation and the different forms of obtained results with the help of this system are presented in this paper. Primarily predicted for the fuel economy control for the purpose of the fuel saving, our software system developed for the referent steam turbine unit, exceeds this basic function. Detection of the different sources of process parameter deviations and their contributions on heat rate increase enables to improve the steam turbine unit operation generally in the next operating period of time by better controlling of process and also to identify the changed operating states of different components of steam turbine unit. Significantly aggravated operating state of some components should be a signal for required repair works. The possibility of software „identification” of steady regime loads serves not only to get the greater accuracy of the use of fuel economy method, but also enables the diagnosis of operating conditions. This function is very important and it could be used to get the cor-

* Rad je objavljen na stručnom skupu Međunarodna konferencija Amerikan power conference Chicago, USA, 1997.

V. prof. dr Branislav M. Savić, r. prof. dr Novica Vasiljević, asist. mr Saša Damnjanović, v. prof. dr Titoslav Živanović i asist. mr Dragan Tucaković – Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 11000 Beograd 27. marta 80

responding data base for other different important purposes, such as calculations of the life of steam turbine consumption, for example. Our software system is developed so as to be: completely autonomous in its work, safe in all predicted irregular operating conditions, highly comfortable for the user and easy adaptive for future upgrading and expansion with newly included measured process parameters.

Key words: *steam turbine plant, software system, control of fuel economy, diagnosis of operating process conditions*

1. UVOD

Danas se u svetu posvećuje sve više pažnje analizi procesa u okviru termoelektričnih postrojenja sa ciljem da se njegovo odvijanje više izuči i bolje kontroliše. Potreba za automatizovanom analizom procesa je postala neophodnost zbog obilja podataka koji se uzimaju iz procesa, potreba njihove odgovarajuće obrade, kao i vrlo ograničenih kapaciteta i nepouzdanosti ljudskog faktora. Jedan od najvažnijih zadataka u sklopu analize procesa u okviru termoelektričnih postrojenja je dijagnostika pogonskih uslova rada. Dijagnostika pogonskih uslova rada se, pre svega, odnosi na određivanje odstupanja pojedinih parametara procesa i performansi različitih uređaja sa režimom rada i analize uzroka tih odstupanja, u cilju utvrđivanja pogonskog stanja pojedinih komponenti postrojenja, boljeg vođenja procesa radi poboljšanja ekonomičnosti, veće pouzdanosti, raspoloživosti i produženja radnog veka parnog bloka.

Razvoj našeg softverskog sistema za dijagnostiku pogonskih uslova rada se odvijao u fazama. Prethodne faze su se odnosile prevashodno na uvođenje postupka pogonskog bilansiranja, odnosno metode za kontrolu i poboljšanje ekonomičnosti parnog bloka termoelektre [1,2,3,4].

Prva faza je završena izradom projektnih studija pogonskog bilansiranja za sve parne blokove snage veće od 100 MW u okviru EPS-a¹. Izuzetak su parni blokovi 2 i 5 termoelektre "Kosovo"-A za koje projektne studije pogonskog bilansiranja nisu završene zbog nedefinisanih podataka za referentno gorivo od strane naručioca.

Druga faza sa kompletno "pešačkom" primenom postupka pogonskog bilansiranja definisanog u prethodno pomenutim projektnim studijama je realizovana u ograničenom stepenu samo za nekoliko parnih blokova.

Sledeća faza poluautomatizovane primene postupka [4] sa korišćenjem kompjuterskog programa za proračune ekonomičnosti, a sa ručnom pripremom i učitavanjem ulaznih podataka od strane korisnika, je bila predviđena da se prema dogovoru sa EPS-om primeni za jedan od blokova termoelektre "Kostolac" - B, ali nije realizovana od strane korisnika.

U svim ovim fazama primene postupka pogonskog bilansiranja "identifikacija" stacionarnih režima rada nije bila moguća, pa je formiranje baze

ulaznih podataka vršeno usrednjavanjem parametara procesa po vremenu, odnosno najčešće za jedan čas.

Poslednja faza realizovana razvojem ovog softverskog sistema [5,6,7,8] na nivou potpuno automatizovane primene, odnosno sa njegovom kompletnom autonomnošću u radu, ne samo da je isključila veliko učešće manuelnog rada, koji je inače bio glavna prepreka za širu primenu postupka pogonskog bilansiranja u prethodnim fazama, već je razvojem softvera sa "identifikacijom" stacionarnih režima rada omogućila dijagnostiku pogonskih uslova rada kao dodatnu vrlo važnu funkciju.

2. MOGUĆNOSTI I POTENCIJALI SOFTVERSKOG SISTEMA

Mogućnost softverske „identifikacije” stacionarnih režima rada daje novi kvalitet u primeni same metode za kontrolu ekonomičnosti omogućujući veću tačnost postupka pogonskog bilansiranja. Eliminirane su dodatne greške primene postupka pogonskog bilansiranja u prethodnim fazama zbog neadekvatno određenih nivoa snaga za stacionarne režime (računata kao srednja vrednost u definisanom vremenskom kontinuumu, na primer od jednog časa), njihovog stvarnog trajanja i odstupanja različitih parametara procesa.

Osnovni zadaci primene postupka pogonskog bilansiranja u kontroli i poboljšanju ekonomičnosti rada parnog bloka, kao i utvrđivanju pogonskog stanja različitih komponenti parnog bloka, sada se mogu ostvariti lakše i pouzdanije. Utvrđivanje uzroka odstupanja parametara procesa subjektivnog karaktera stvara uslove za bolje upravljanje procesom u narednom periodu sa manjom potrošnjom goriva i većom pouzdanošću i raspoloživošću parnog bloka. Sa druge strane, utvrđivanje uzroka odstupanja parametara procesa objektivnog karaktera nastalih promenom, odnosno pogoršanjem pogonskog stanja pojedinih komponenti parnog bloka, signalizira potrebu za intervencijom na takvim komponentama i promenu termin-plana i sadržaja remonata, pa u krajnjem slučaju i planiranje potrebnih revitalizacija ili čak rekonstrukcija da bi se performanse pojedinih komponenti dovele u projektno ili bolje pogonsko stanje. I ova druga uloga softverskog sistema utiče na povećanje pouzdanosti, raspoloživosti, ekonomičnosti i produženje radnog veka parnog bloka.

Uvođenje statističkih postupaka za utvrđivanje globalnih trendova promene pojedinih parametara procesa i njegovih odstupanja i uticaja na specifičnu potrošnju toplote parnog bloka moglo bi dodatno da poboljša ovakvu analizu u nekoj sledećoj fazi razvoja softvera, posebno u cilju predviđanja promena pogonskih uslova rada i stanja parnog bloka u budućem periodu, odnosno planiranju potrebnih reparacija i remonata.

Sa druge strane, dijagnostika pogonskih uslova rada, bazirana na softverskoj "identifikaciji" stacionarnih režima i odgovarajućih odstupanja pojedinih parametara procesa, a koja nije mogla da se ostvaruje u dosadašnjoj praksi analize procesa naših parnih blokova, sada pruža mogućnosti za formiranje odgovarajućih baza podataka o radu parnog bloka i njihovo korišćenje za druge veoma važne svrhe.

Jedna od najvažnijih budućih primena ovako dobijenih odgovarajućih baza podataka mogla bi se realizovati u proceni utroška radnog veka parne turbine, što danas predstavlja možda najvažniji predmet interesovanja u okviru oblasti dodatne analize procesa u termoenergetskim objektima [10], posebno za starije parne blokove. Jednostavnom nadgradnjom ovog softverskog sistema, sa primenom odgovarajućih statističkih postupaka, može se ostvariti automatizovano formiranje veoma korisne baze podataka za proračun utroška radnog veka komponenata parne turbine izloženih visokim temperaturama zbog niskocikličnog zamora i zamora materijala usled puzanja. Postupak za proračun utroška radnog veka parne turbine mogao bi da bude kompletno automatizovan u nekoj kasnijoj fazi razvoja njegove primene.

Takođe, mogućnost ugradnje nekih dodatnih procedura za kvalitativnu i kvantitativnu dinamičku analizu različitih parametara procesa mogla bi da bude veoma korisna za procenu rada različitih sistema automatskog regulisanja.

Pomenute karakteristike našeg softverskog sistema i mogućnosti njegovog daljeg razvoja približavaju ga zadacima koje rešavaju ekspertske sisteme. Posebno je važno da je naš softverski sistem otvoren i omogućava uključivanje drugih parametara procesa, pa i nadgradnju sa postupcima za druge aspekte analize procesa, koji ne moraju direktno da budu u vezi sa ekonomijom potrošnje goriva parnog bloka.

Interaktivna primena ovog softvera u realnom vremenu mogla bi da bude veoma važna opcija njegovog razvoja u budućem periodu. Paralelnim prenošenjem sračunatih odstupanja pojedinih parametara procesa od trenutka početne "identifikacije" stacionarnog režima stvorila bi se mogućnost korisniku da može da pokuša da aktivno deluje na nji-

hovo smanjenje, odnosno na onaj njihov deo čiji je uzrok subjektivnog karaktera.

3. POLAZNA BAZA I RAZVOJ

Projektna studija za pogonsko bilansiranje urađena za referentne blokove termoelektrane "Kostolac" - B², kojom se definišu uticaji odstupanja pojedinih parametara procesa i performansi parnog bloka na specifičnu potrošnju toplote, bazna specifična potrošnja toplote parnog bloka i metodološko korišćenje postupka putem odgovarajućih tabelarnih protokola, predstavljala je polaznu fazu u primeni postupka kontrole ekonomičnosti, odnosno pogonskog bilansiranja, pa prema tome i u razvoju ovog softverskog sistema.

S obzirom na to da je postupak predviđen za praktičnu primenu i u najosnovnijem obliku "pešačkog" rada, odstupanja specifične potrošnje toplote sa promenom pojedinih parametara procesa su data u studiji tabelarno preko diskretnih vrednosti. Nažalost, druga faza "pešačke" primene postupka pogonskog bilansiranja nije ostvarena u ovoj termoelektrani, pa u tom smislu ne postoji nikakvo iskustvo o njegovoj primeni i o radu blokova kao rezultatu analize njegove primene.

No, stručni savet EPS-a je ipak odlučio da se upravo za jedan od dva parna bloka termoelektrane "Kostolac"-B, kao referentnom, napravi kompjuterski program sa automatizovanim proračunima ekonomičnosti, ali sa ručnom pripremom i učitavanjem ulaznih podataka od strane korisnika [4], što odgovara fazi poluautomatizovane primene postupka pogonskog bilansiranja. Međutim, ni ova faza nije realizovana od strane korisnika.

Sledeća faza potpuno automatizovane primene bez učešća ljudskog rada, odnosno sa procesiranjem mernih vrednosti različitih parametara procesa, započela je 1995. godine potpisivanjem ugovora između naručioca termoelektrane "Kostolac"-B i izvršioca Mašinskog fakulteta u Beogradu. Prvobitno, prema dobijenom zadatku, trebalo je da merni podaci budu preuzeti sa procesnog računara, ali pošto je pristup korišćenju informacija bio zaštićen, to je moglo da se ostvari samo na poseban način. Preuzimanje mernih vrednosti ograničenog broja parametara sa odgovarajuće konfigurisanog izveštaja u definisanom vremenskom intervalu planirano je da se ostvari na vezi između procesnog računara i njegovih štampača, pri čemu je trebalo prebroditi prisutnu zaštitu povratnog signala. Međutim, ovakav projektovani sistem akvizicije informacija pokazao se prilično nepouzdanim i ograničavajućim i nije iskorišćen za namenjenu svrhu. Izgradnjom nadzornog sistema koji je uradio Institut "Mihailo Pupin"⁹, ovi problemi sa procesiranjem mernih podataka i njihovom akvizicijom za

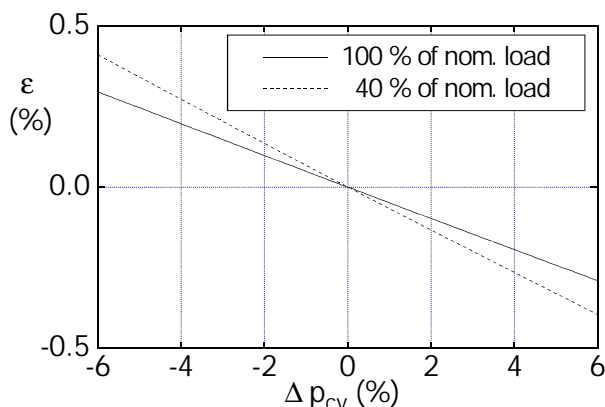
potrebe kontrole ekonomičnosti su bili prevaziđeni.

Razvoj našeg softverskog sistema je tekao paralelno. Pri tome je vođeno računa da on zadovolji poseban zahtev koji se postavlja u radu autonomnog sistema sa procesiranim podacima: da bude pouzdan u svim predviđenim neregularnim uslovima rada. Prethodno ispitivanje pojedinih softverskih modula i celog softverskog sistema je neophodna faza, koja je izvršena sa formiranim realnim bazama ulaznih podataka skidanjem mernih vrednosti sa dobijenih mernih traka na kojima je zabeležen višednevni rad parnog bloka. S obzirom na zametan posao učitavanja podataka sa mernih traka, morali smo da se ograničimo u pogledu vremenskog perioda, odnosno broja dana, i posebno za pojedine merene parametre procesa.

Tabela 1.
Osnovne karakteristike parnog bloka

Nominalna snaga generatora bruto: 340 MW Način regulisanja opterećenja: kliznim pritiskom Nominalni parametri	
a) Sveža para	
- pritisak:	79 bar
- temperatura:	537°C
b) Dогреjana para	
- pritisak:	42.25 bar
- temperatura:	537°C
c) Pritisak kondenzacije	0.042 bar

Osnovne karakteristike referentnog postrojenja parne turbine su date u tabeli 1. Primer jedne karakteristike odstupanja specifične potrošnje toplote sa promenom pritiska sveže pare za referentno postrojenje parne turbine prema originalnim podlogama proizvođača je prikazan na slici 1. Po-



Slika 1. Odstupanja specifične potrošnje toplote sa promenom pritiska sveže pare

što jedinica parne turbine radi sa regulacijom snage kliznim pritiskom, referentni pritisak će zavistiti od ostvarene snage. Za potrebe našeg softverskog sistema za sve relevantne parametre procesa izvedene su odgovarajuće funkcije odstupanja specifične potrošnje toplote za razliku od prikaza preko diskretnih vrednosti u tabelama u projektnoj studiji.

4. ORGANIZACIJA SOFTVERA

Softverski sistem za kontrolu ekonomičnosti potrošnje goriva nastavlja se na novoinstalirani nadzorni sistem⁹, koji pored ostalih zadataka obezbeđuje prenošenje mernih vrednosti svih parametara procesa potrebnih za formiranje baze podataka za potrebe našeg sistema.

Organizacija našeg softverskog sistema je napravljena moderno na modularnom principu koji obezbeđuje jasno definisane funkcije različitih kompjuterskih programa (softverskih modula), komunikaciju između različitih ulaznih i izlaznih fajlova sa podacima i interaktivnu ulogu komunikacionih programa sa korisnikom.

Blok šema organizacije softverskog za dijagnostiku rada parog bloka je predstavljena na sl. 2. Razlikujemo tri grupe softverskih modula: glavne softverske module, softverske module za komunikaciju sa korisnikom i pomoćni softverski modul.

Grupa glavnih softverskih modula ima dva softverska modula: softverski modul za "identifikaciju" stacionarnih režima i softverski modul za proračun ekonomičnosti.

Prvi softverski modul omogućuje "prepoznavanje" stacionarnih režima rada, proračune srednjih vrednosti obuhvaćenih mernih parametara i formira ulazne fajlove za softverski modul za proračun ekonomičnosti. Ovaj softverski modul, takođe, uključuje "softverski filter" za eliminisanje prenesenih eventualno neregularnih vrednosti mernih parametara. Ako neki od mernih signala nije raspoloživ, ovaj softverski modul obezbeđuje korišćenje odgovarajućih izračunatih vrednosti. Na ovaj način će i nekompletna baza podataka biti iskorišćena. Takođe, ovaj softverski modul formira ulazni fajl sa dodatnom grupom podataka za potrebe softverskog modula za grafičko predstavljanje rezultata.

Softverski modul za proračune ekonomičnosti parnog bloka omogućava proračune doprinosa svakog mernog parametra na specifičnu potrošnju toplote za stacionarne režime rada i dobijanje dnevnih, dekadnih i mesečnih izveštaja.

Softverski moduli za komunikaciju sa korisnikom omogućuju interaktivnu komunikaciju sa korisnikom pomoću menija. Ova grupa uključuje tri softverska modula: softverski modul za formiranje baze ulaznih podataka sa karakteristikama goriva, softverski modul za prikazivanje rezultata u obliku

odgovarajućih tabelarnih protokola na ekranu monitora i u obliku štampanih izveštaja i softverski modul za grafičko predstavljanje rezultata na ekranu monitora i štampanih dijagrama.

Softverski modul za formiranje ulazne baze podataka o karakteristikama goriva omogućuje da se ova baza podataka menja za prethodni period prema dobijenim laboratorijskim analizama goriva. Posle uključenja ovih promena za protekle dane korisnik ima mogućnost da ponovi proračune ekonomičnosti potrošnje goriva za blok termoelektrane za dati period vremena sa novim podacima o gorivu. Pošto postoji problem u efikasnoj kontroli karakteristika niskokaloričnog lignita u realnom vremenu, prethodno pomenuti način je praktično vrlo pogodan postupak za uključenje stvarnih karakteristika goriva za dati period.

Softverski modul za prezentaciju rezultata u obliku odgovarajućih tabelarnih protokola na ekranu monitora i štampanje izveštaja omogućuje da se dobiju rezultati proračuna ekonomičnosti potrošnje goriva u obliku dnevnih, dekadnih i mesečnih izveštaja.

Softverski modul za grafičko predstavljanje rezultata na ekranu monitora preko odgovarajućih dijagrama i njihovo štampanje obezbeđuje da se dobije prijemčivija vizuelna prezentacija i laka dijagnostička ocena pogonskih uslova rada.

Poseban kompjuterski program je predviđen za automatsko oslobađanje prekomerno zauzetog prostora na hard disku -pomoćni softverski modul. Posle dužeg perioda vremena, kapacitet "hard" diska će biti značajno okupiran proizvedenim fajlovima sa podacima, pa je neophodno da se njegov kapacitet povremeno oslobodi za novoprodukovane fajlove sa podacima.

5. OBLICI PRIKAZIVANJA REZULTATA

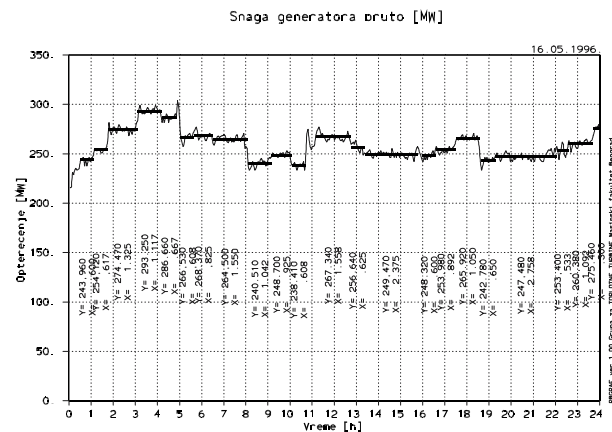
Osnovni dnevni dijagram promene ostvarene snage na priključcima generatora sa softverski "identifikovanim" stacionarnim režimima prikazan je na slici 3 i 4 za dva neuzastopna dana. Sa ovih dijagrama se može videti da je "identifikacija" stacionarnih režima veoma dobra, posebno imajući u vidu karakteristično izražene velike fluktuacije snage generatora u pogonu za ovu jedinicu.

Između mnogih uključenih parametara procesa, u ovom radu izabrali smo dva osnovna parametra za grafičku prezentaciju rezultata: pritisak i temperaturu sveže pare. Promene pritiska sveže pare i izračunatih srednjih vrednosti za stacionarne režime rada za oba dana su prikazani na slici 5 i 6. Odgovarajuća odstupanja pritiska sveže pare u od-

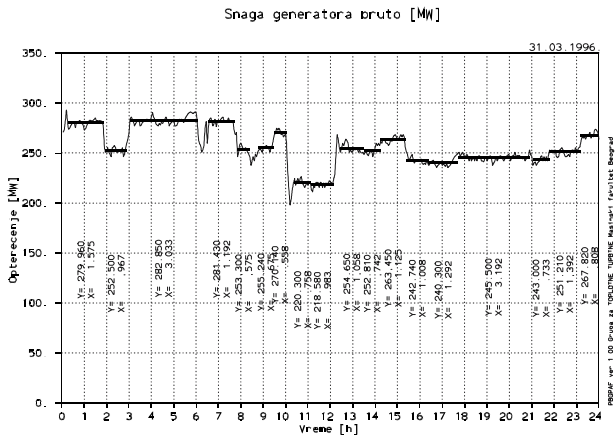
nosu na nominalne projektne vrednosti za ovaj slučaj regulacije snage kliznim pritiskom su data na slici 7 i 8. Drugi dan je izabran za prezentaciju baš zbog prisutno izražene dinamičke nestabilnosti u promeni pritiska koja je svakako nepoželjna sa gledišta pogonske pouzdanosti jedinice parne turbine. Ispitivanje uzroka ove dinamičke nestabilnosti moglo bi da bude vrlo važno iz razloga eliminisanja pojave takvih pogonskih uslova rada u budućnosti. Uticaj odstupanja pritiska sveže pare na potrošnju primarne energije za jedan od dva prezentirana dana je dat na slici 9.

Sledeće tri slike se odnose na uticaj promene temperature sveže pare za drugi referentni dan. Promene temperature sveže pare i izračunate srednje vrednosti temperatura za "identifikovane" stacionarne režime rada su prikazani na slici 10. Izražene fluktuacije memnog signala koje bi trebalo ispitati su karakteristično prisutne. Relativna odstupanja izračunatih srednjih vrednosti u odnosu na nominalnu vrednost predviđenu od strane proizvođača opreme su date na slici 11. Ovde, možemo da zapazimo permanentno višu temperaturu sveže pare za oko 1.5 % ili približno 8 °C. Ovo povećanje temperature sa izraženim njenim fluktuacijama mogla bi da ima vrlo važan uticaj na smanjenje raspoloživosti, pouzdanosti i preostalog radnog veka jedinice parne turbine. Iz ovih razloga ispitivanje rada sistema za automatsku regulaciju temperature pare u kotlu moglo bi da bude veoma važno. Rezultati proračuna ekonomičnosti potrošnje goriva pod uticajem ovog parametra su dati na slici 12. Dobijeno smanjenje u potrošnji primarne energije u ovom slučaju nije samo sebi cilj, prethodno pomenuti potrebni uslovi dobre raspoloživosti i pouzdanosti i smanjenja utroška preostalog radnog veka parne turbine su mnogo važniji. Bolja kontrola temperature sveže pare u pogonu trebalo bi da bude veoma važan zadatak.

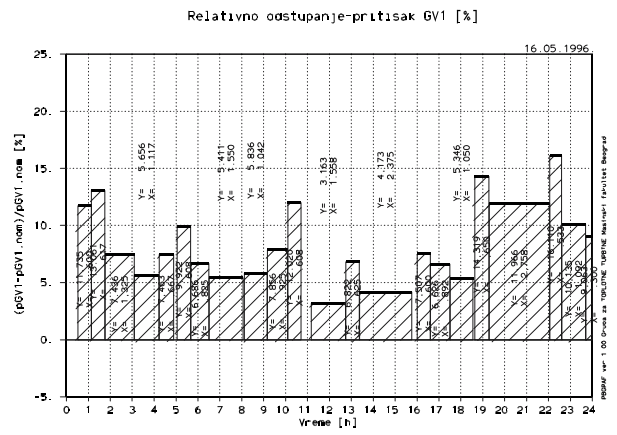
Dobijanje rezultata proračuna ekonomičnosti potrošnje goriva je moguće preko tri različite for-



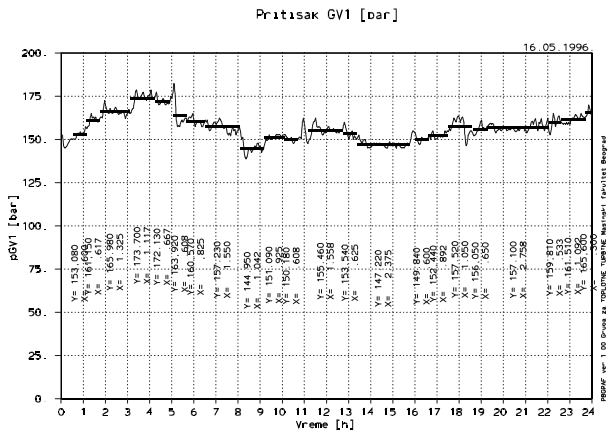
Slika 3. Promena snage i identifikovani stacionarni režimi za prvi dan



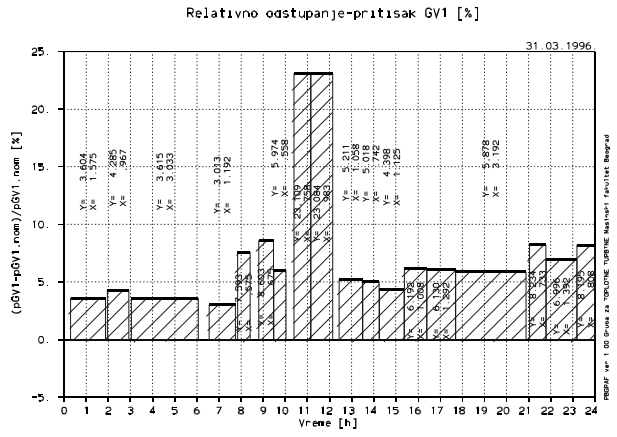
Slika 4. Promena snage i identifikovani stacionarni režimi za drugi dan



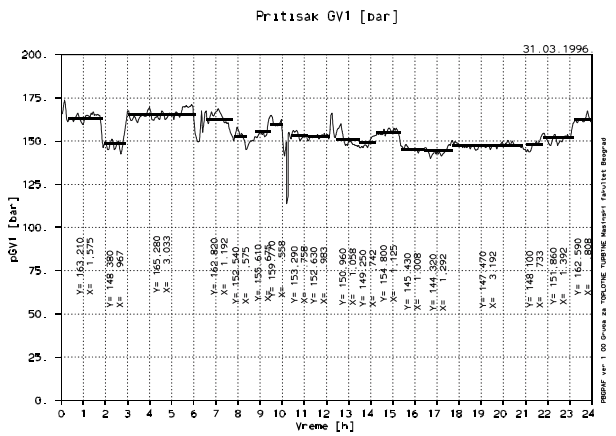
Slika 7. Relativno odstupanje pritiska sveže pare za prvi dan



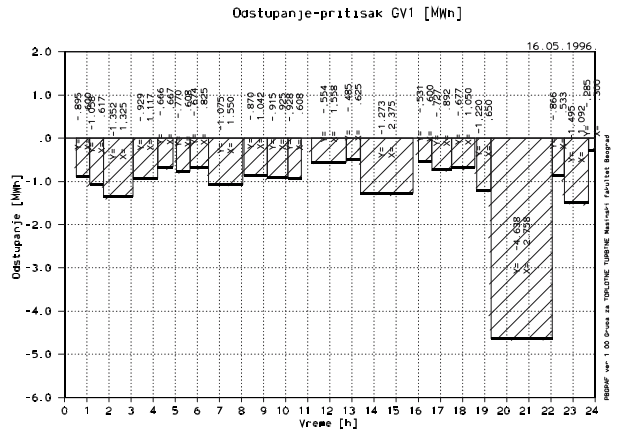
Slika 5. Promena pritiska sveže pare i njihove srednje vrednosti za prvi dan



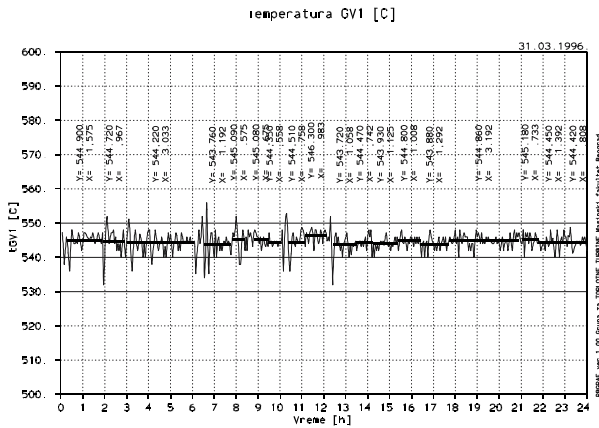
Slika 8. Relativno odstupanje pritiska sveže pare za drugi dan



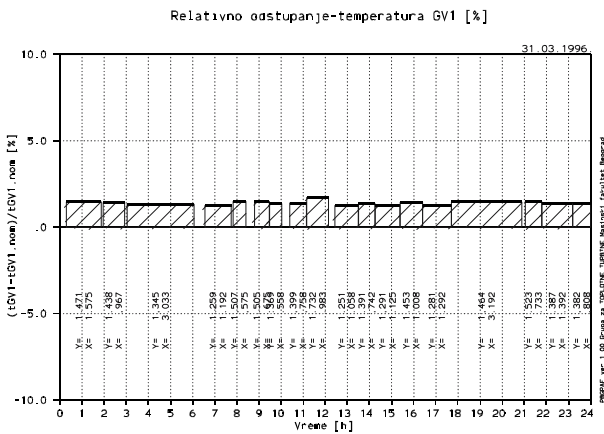
Slika 6. Promena pritiska sveže pare i njihove srednje vrednosti za drugi dan



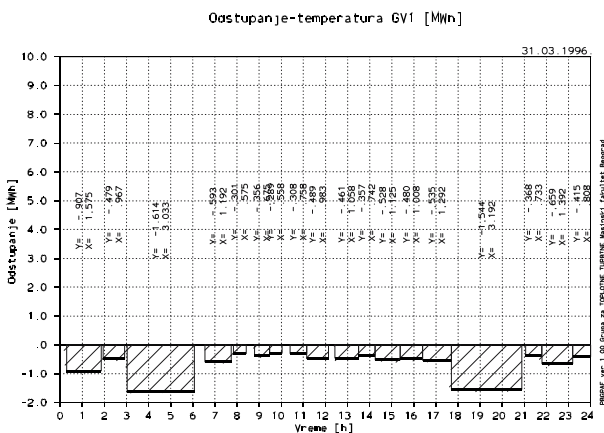
Slika 9. Uticaj pritiska sveže pare na potrošnju primarne energije



Slika 10.



Slika 11. Relativno odstupanje temperature sveže pare



Slika 12. Uticaj temperature sveže pare na potrošnju primarne energije

me izveštaja u obliku tabelarnih protokola (dnevni, dekadni i mesečni), i to posebno za kotlovski deo i turbinski deo postrojenja. Ovde, prezentiramo dnevni izveštaj za turbinski deo postrojenja i to za drugi referentni dan. Zbog ograničene širine standardnog štampača A4 formata softverski je predviđeno da se dnevni izveštaj štampa u kondenzovanom modu za samo 4 u nizu stacionarna režima odjednom. Tako, za svih 18 identifikovanih stacionarnih režima biće štampano 5 tabela. Na levoj strani ovih tabelarnih protokola su date ukupne sume.

Pored prikazanih oblika dnevnih dijagrama za različite parametre procesa, ovaj softverski sistem omogućuje takođe da se dobiju odgovarajući dijagrami sa rezultatima ekonomičnosti potrošnje goriva za dekadni i mesečni period.

6. ZAKLJUČAK

Razvijeni softverski sistem za dijagnostiku rada parnog bloka, pored njegove osnovne vrlo važne funkcije u uštedi goriva, ima mnogo širi značaj i ostvaruje više zadataka. Tako, otkrivanje različitih uzroka odstupanja pojedinih parametara procesa i njihovog doprinosa na povećane specifične potrošnje toplote subjektivnog karaktera omogućuje da se poboljša generalno rad jedinice parnog bloka boljom kontrolom procesa. Takođe, otkrivanje uzroka odstupanja pojedinih parametara procesa i povećane specifične potrošnje toplote objektivnog karaktera, kao rezultat pogoršanog pogonskog stanja nekih komponenti postrojenja, signalizira potrebu za intervencijom na takvim komponentama i omogućava bolje odvijanje procesa u njima posle izvršenih odgovarajućih opravki na tim komponentama. Obe pomenute pozitivne vrste intervencija povećavaju generalno pouzdanost, raspoloživost, ekonomičnost i produžavaju radni vek parnog bloka..

Zahvaljujući softverskoj „identifikaciji” stacionarnih režima, koja omogućuje inače veću tačnost primene postupka za kontrolu ekonomičnosti, naš softverski sistem ostvaruje novu veoma važnu funkciju dijagnostike pogonskih uslova rada parnog bloka. Ova funkcija može da se iskoristi sa relativno jednostavnom nadgradnjom za dobijanje odgovarajućih baza podataka o radu parnog bloka korisnih i za druge veoma važne svrhe, kao što su proračun utroška radnog veka parne turbine ili čak za ocenu rada različitih sistema automatskog regulisanja.

Sljedeća faza razvoja ovog softverskog sistema mogla bi da se odnosi na uvođenje statističkih postupaka za utvrđivanje globalnih trendova promene pojedinih parametara procesa i njihovih odstupanja.

Tabela 2.

Dnevni izveštaj za parno turbopostrojenje

Datum: 31 mart 1996		Termoelektrana "Kostolac"				Kontrola ekonomičnosti
Blok br. 1						Parno turbopostrojenje
						Dnevni izveštaj : Strana 1 od 5
		1	2	3	4	
21.82	39.Trajanje intervala (h)	1.5833	.97500	3.0417	1.2000	
	40.Reaktivno opterećenje (MWr)	77.548	70.142	68.877	44.592	
	41.Aktivno opterećenje (MW)	279.96	252.50	282.85	281.43	
1237.	42.Reaktivna energija (MWr h)	122.78	68.388	209.50	53.510	
5604.	43.Aktivna energija (MWh)	443.26	246.19	860.34	337.72	
	44. Aktivno opterećenje (MW)	279.96	252.50	282.85	281.43	
	45.e - Aktivno opterećenje	.37864e-02	.88375e-02	.33981e-02	.35884e-02	
45.29	46.Proizvod 43*45	1.6784	2.1757	2.9235	1.2119	
	47.e - teorijski gubici vode	.23717e-02	.36075e-02	.22560e-02	.23128e-02	
19.01	48.Proizvod 43*47	1.0513	.88812	1.9409	.78107	
	49.e - teorijska sopstvena potrošnja	.12738e-01	.18558e-01	.12117e-01	.12423e-01	
98.08	50.Proizvod 43*49	5.6463	4.5686	10.425	4.1953	
	51.tGV1(°C)-temperatura sveže pare	544.89	544.74	544.22	543.78	
	52.e - tGV1	-.20437e-02	-.19499e-02	-.18762e-02	-.17600e-02	
-10.69	53. Proizvod 43*52	-.90591	-.48005	-1.6142	-.59439	
	54.tGV2(°C)-temperatura dogrejane pare	520.26	518.32	520.34	521.47	
	55.e - tGV2	.46035e-02	.51370e-02	.45815e-02	.42708e-02	
31.11	56. Proizvod 43*55	2.0405	1.2647	3.9417	1.4423	
	57.pGV1(bar)-Pritisak sveže pare	163.29	148.28	165.31	162.89	
	58.e - pGV1	-.16413e-02	-.18472e-02	-.18073e-02	-.12283e-02	
-18.78	59. Proizvod 43*58	-.72752	-.45475	-1.5549	-.41483	
	60.dp(bar)-pad pritiska u dogrejaču pare	3.7291	3.3741	3.7666	3.7481	
	61.e - dp	.27109e-03	.10405e-02	.17416e-03	.22048e-03	
4.037	62. Proizvod 43*61	.12016	.25617	.14984	.74460e-01	
	63.pK(bar)-pritisak u kondenzatoru	.32606e-01	.30318e-01	.32848e-01	.32729e-01	
	64.e - pK	.44348e-03	.70853e-03	.45316e-03	.48976e-03	
3.659	65. Proizvod 43*64	.19658	.17443	.38987	.1654064	
	66.e - reaktivno opterećenje	.79418e-03	.76116e-03	.64185e-03	.32959e-03	
3.338	67. Proizvod 43*66	.35203	.18739	.55221	.11131	
	68.e - opterećenje glavnog transformatora	-.23086e-03	-.30465e-03	-.22252e-03	-.22665e-03	
-1.614	69. Proizvod 43*68	-.10233	-.75002e-01	-.19145	-.76545e-01	
	70.wr(kg/s)-ubrizgavanje	10.000	10.000	7.4110	10.000	
	71.e - ubrizgavanje	.11785e-01	.12971e-01	.86774e-02	.11728e-01	
66.91	72. Proizvod 43*71	5.2238	3.1934	7.4655	3.9608	
.7970	73.Zbir odstupanja	.32877e-01	.47519e-01	.28393e-01	.32147e-01	
10.00	74.tRVu(°C)-temperatura rashladne vode	10.000	10.000	10.000	10.000	
	75.e - tRVu	.40608e-03	.58112e-03	.35045e-03	.39337e-03	
3.009	76.Proizvod 43*75	.18000	.14306	.30150	.13285	
	77.Teorijska snaga sopst. potrošnje (MW)	29.230	27.629	29.373	29.302	
608.2	78. Proizvod 39*77	46.279	26.938	89.342	35.163	

nja, kao i promene performansi pojedinih uređaja, u cilju poboljšanja predikcije promena pogonskih uslova rada i stanja parnog bloka u budućem periodu, odnosno planiranju potrebnih reparacija i rekonata.

Interaktivna primena ovog softvera u realnom vremenu, sa mogućnošću da korisnik aktivno utiče na smanjenje utvrđenih odstupanja pojedinih parametara procesa, mogla bi da bude još jedna veoma važna opcija njegovog razvoja u budućem periodu

Ovaj softverski sistem je tako razvijen da bude: kompletno autonoman u radu, siguran u svim predviđenim neregularnim uslovima rada, visoko komforan za korisnika i lako adaptivan za buduće proširenje sa novouključenim mernim parametrima procesa. Posebno je važno da je naš softverski sistem otvoren i omogućava ne samo uključivanje drugih parametara procesa, već i nadgradnju sa postupcima za druge aspekte analize procesa, koji ne moraju direktno da budu u vezi sa ekonomijom potrošnje goriva parnog bloka.

Uvođenje ovakvog softverskog sistema moglo bi da bude posebno korisno za nove jedinice pošto bi sa ovakvim sistemom mogle da se kontrolišu projektne performanse posebnih komponenti i cele jedinice pre garancijskih ispitivanja.

Pomenute karakteristike našeg softverskog sistema i mogućnosti njegovog daljeg razvoja približavaju ga zadacima koje rešavaju ekspertske sisteme.

LITERATURA

- [1] Grupa za TOPLOTNE TURBINE (Vasiljević, N., Savić, B., Stojaković, M., Damnjanović, S.) i Grupa za PARNE KOTLOVE (Brkić, Lj., Živanović, T., Tucaković, D.), projektne studije "POGONSKOG BILANSIRANJA" URAĐENE ZA SVE NAŠE PARNE BLOKOVE SNAGE VEĆE OD 100 MW ZA POTREBE EPS-A, Mašinski fakultet, Beograd, 1980.-1997.
- [2] Brkić, Lj., Vasiljević, N., Stojaković, M., Savić, B., Živanović, T., projektna studija za potrebe EPS-a: POGONSKO BILANSIRANJE TE "KOSTOLAC-DRMNO", Mašinski fakultet, Beograd, 1986., str. 172.
- [3] Brkić, Lj., Vasiljević, N., Stojaković, M., Savić, B., Živanović, T., POGONSKO BILANSIRANJE PAR-

NIH BLOKOVA, Sedmo stručno savetovanje o termoelektranama Jugoslavije, Zbornik referata, Ohrid, oktobra 1985. godine.

- [4] Vasiljević, N., Stojaković, M., Savić, B., Damnjanović, S., KOMPJUTERSKI PROGRAM „POGONBIL” ZA AUTOMATIZOVANE PRORAČUNE EKONOMIČNOSTI ZA PARNI BLOK TERMOELEKTRANE „KOSTOLAC-DRMNO” SA MANUELNIM UČITAVANJEM ULAZNIH PODATAKA, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [5] Savić, B., Vasiljević, N., Damnjanović, S., Rosić, B., SOFTVERSKI SISTEM ZA AUTOMATIZOVANU KONTROLU EKONOMIČNOSTI I DIJAGNOSTIKU POGONSKIH USLOVA RADA PARNOG BLOKA TE "KOSTOLAC"-B, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [6] Savić, B., Vasiljević, N., Damnjanović, S., Rosić, B., AUTOMATIC ECONOMICAL CONTROL OF THERMAL POWER PLANT BY USING OF PROCESSING MEASURED DATA, XXVIII. KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLOQUIUM, KP47A,B, DRESDEN, 1996.
- [7] Savić, B., Stojaković, M., Vasiljević, N., Damnjanović, S., Rosić, B., Software Package for Economical Control and Diagnosis of Operating Conditions of Steam Turbine Plant, PROCEEDINGS OF THE AMERICAN POWER CONFERENCE, 59th Annual Meeting, Chicago, 1997., Vol. 59-II, p. 646-651.
- [8] Savić, B., Vasiljević, N., Damnjanović, S., Živanović, T., Tucaković, D., DEVELOPMENT OF SOFTWARE SYSTEM FOR CONTROL OF FUEL ECONOMY AND DIAGNOSIS OF OPERATING CONDITIONS OF ONE STEAM TURBINE UNIT, VI INTERNATIONAL SAUM CONFERENCE ON SYSTEM AUTOMATIC CONTROL AND MEASUREMENTS - SAUM '98, Proceedings, Niš, september 28-30, 1998., p. 331-336.
- [9] Velimirović, V., Marinković, S., Mišić, A., ARHITEKTURA I ORGANIZACIJA NADZORNOG SISTEMA TE DRMNO, Institut "Mihailo Pupin", Beograd, 1997., str.4.
- [10] Bertilsson, J. E., Czeratzki, A., Scarlin, B., DETERMINATION OF THE REMAINING LIFE OF STEAM TURBINES: A BRIDGE BETWEEN THEORY AND PRACTICE, Brown Boverly Review, No. 1&2, Vol. 9, 1986., pp. 67-77.

Rad je primljen u uredništvo 10. 09. 2001. godine

Analize dinamičkih opterećenja parovoda sveže pare i cevovoda napojne vode

Stručni rad
UDK: 536.8; 621.311.22; 621.1.01

Rezime:

Maksimalna dinamička opterećenja parovoda sveže pare i cevovoda napojne vode nastaju u prelaznim stanjima, usled delovanja regulacionih i sigurnosno-zaštitnih sistema, i pri udesnim stanjima. U radu su prikazani rezultati numeričkih simulacija i analiza dinamičkih opterećenja parovoda i cevovoda u termoelektrani „Oslomej” u Makedoniji, tokom delovanja sigurnosno-zaštitnih sistema pri ispadu turbine i napojne pumpe, kao i u termoelektrani „Kostolac B” pri udesu loma parovoda sveže pare. Analizirane dinamičke sile su posledica nestacionarnog strujanja kompresibilnog fluida i prostiranja intenzivnih talasa pritiska. Određivanje dinamičkih fluidnih sila je neophodno u cilju sagledavanja maksimalnih napreznja koja deluju na cevi, kolena i oslonce, odnosno u cilju projektovanja ovih elemenata cevovoda na maksimalna dinamička napreznja i dobijanja podloga za određivanje preostalog radnog veka.

Ključne reči: fluidne dinamičke sile, parovodi, linija napojne vode, numerička simulacija

Abstract:

ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS OF MAIN STEAM AND FEEDWATER PIPELINES

Main steam and feedwater pipelines are exposed to the maximum dynamic forces during transients caused by the action of control and safety systems, as well as during the accident conditions. Results of the numerical simulation and analyses of the fluid dynamic loads of the main steam and feedwater pipelines are presented for two cases in the paper. Turbine and feedwater pump trips are simulated and analyzed for Thermal Power Plant „Oslomej”. The accident of the main steam pipeline rupture is analyzed for Thermal Power Plant „Kostolac B”. The analyzed fluid dynamic forces are caused by the transient compressible fluid flows and by the propagation of intensive pressure waves. The prediction of fluid dynamic forces is necessary in order to calculate maximum loads of pipelines, bends and pipe supports, as necessary input data for the safe and reliable design of these components and residual operation life time assessment.

Key words: transient fluid forces, steam/feedwater pipelines, numerical simulation

1. UVOD

Parovod sveže pare i cevovod napojne vode su izloženi intenzivnim dinamičkim napreznjima tokom prelaznih stanja, izazvanim otkazom tehnolo-

ške opreme i delovanjem sigurnosno-zaštitnih sistema. Dinamička napreznja izazivaju unutrašnje gasodinamičke sile u parovodu, odnosno hidrodinamičke sile u cevovodu napojne vode, koje nastaju usled nestacionarnog strujanja kompresibilnog

fluida i prostiranja talasa pritiska. Nestacionarne fluidne sile deluju duž ose pravih deonica cevi. Kod parovoda sveže pare intenzivna dinamička naprezanja se javljaju usled zatvaranja pregradnog ventila ispred turbine visokog pritiska i otvaranja zaobilaznog voda pri ispadu turbine, ili pri pojavi loma, isticanja i pražnjenja cevnog sistema. Ispad napojne pumpe i zatvaranje klapne na potisu pumpe izazivaju dinamička naprezanja cevovoda napojne vode.

Određivanje dinamičkih fluidnih sila je neophodno, u cilju sagledavanja maksimalnih naprezanja koja deluju na kolena i oslonce cevovoda, kao podloge za projektovanje ovih elemenata na maksimalna dinamička naprezanja. Stoga su rezultati proračuna nestacionarnih gasodinamičkih i hidrodinamičkih sila podloga za strukturne analize cevovoda, određivanje napona i deformacija vitalnih komponenti, i proračun vibracija cevnog sistema.

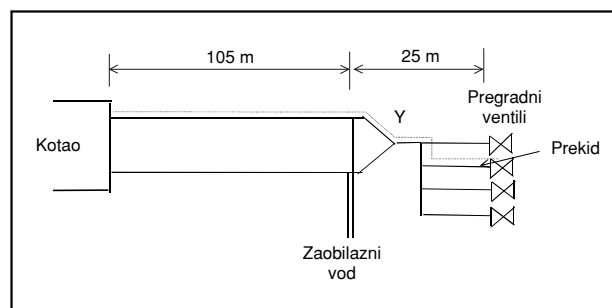
U radu su prikazani rezultati kompjuterske simulacije i analize prelaznih procesa i dinamičkih fluidnih sila za sledeće scenarije, radne parametre i opremu: 1) ispad turbine praćen potpunim kidanjem dela parovoda sveže pare ispred jednog od pregradnih ventila na turbini visokog pritiska termoelektrane „Kostolac B”, i 2) ispad turbine i ispad napojne pumpe na termoelektrani „Oslomej”.

Određivanju dinamičkih sila, kojima fluid deluje na strukturu cevovoda, prethodi simulacija nestacionarnog strujanja radnog fluida, kao i dejstva

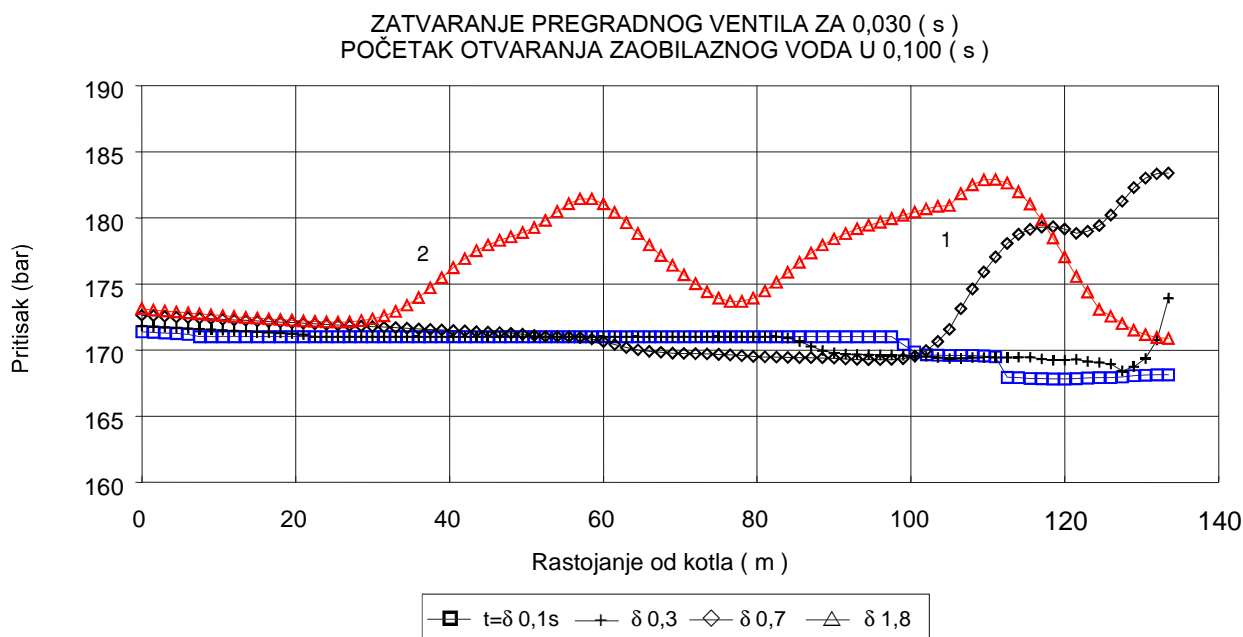
poremećaja, tehnoloških, regulacionih i sigurnosno-zaštitnih elemenata na struju fluida. Simulacija strujanja i određivanje fluidnih dinamičkih sila su sprovedeni pomoću kompjuterskog programa TEA. Metodologija numeričkog proračuna je data u radovima [1,2,3].

2. UDES PAROVODA SVEŽE PARE NA TERMoeLEKTRANI „KOSTOLAC B”

Potpuni prekid parovoda sveže pare na liniji za uvođenje pare u turbinu visokog pritiska, neposredno ispred pregradnog ventila, analiziran je za radne parametre i opremu termoelektrane „Kostolac B”, projektne instalisane snage 350 MWe. Izvršena je kompjuterska simulacija prelaznih procesa u parovodu sveže pare prema sledećem scenariju [4]:



Slika 1. Linija parovoda sveže pare TE „Kostolac B”



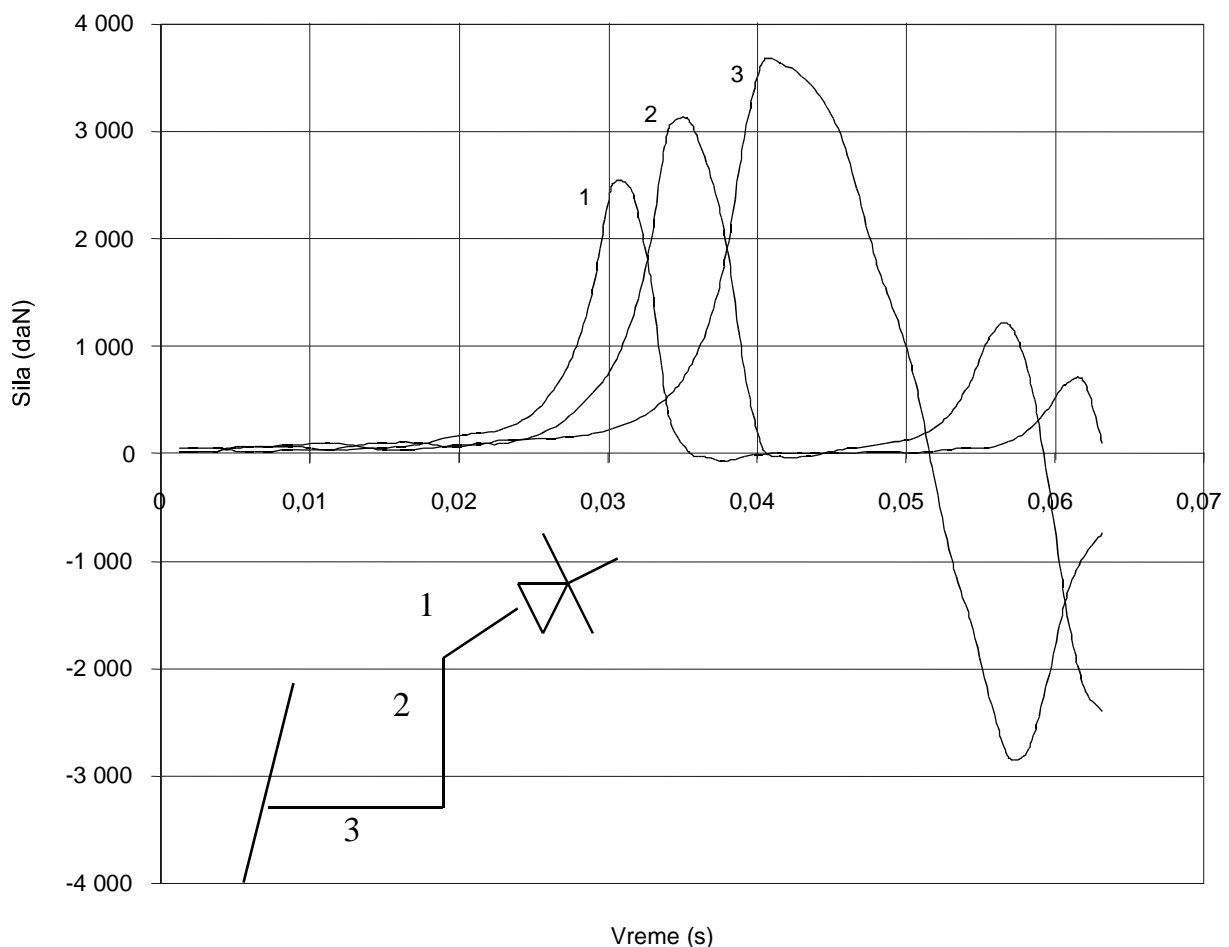
Slika 2. Promena pritiska u parovodu sveže pare TE „Kostolac B” pri zatvaranju pregradnog ventila ispred turbine visokog pritiska

- u početnom vremenskom trenutku elektrana radi na konstantnoj snazi bliskoj nominalnoj,
- operateri zatvaraju pregradne ventile ispred turbine,
- posle 20 s od zatvaranja pregradnih ventila dolazi do potpunog prekida jedne od linija za dovođenje pare u turbinu, ispred pregradnog ventila,
- para ističe na mestu loma u turbinsku zgradu, i dolazi do naglog pada pritiska u parovodu sveže pare i cevnom sistemu kotla.

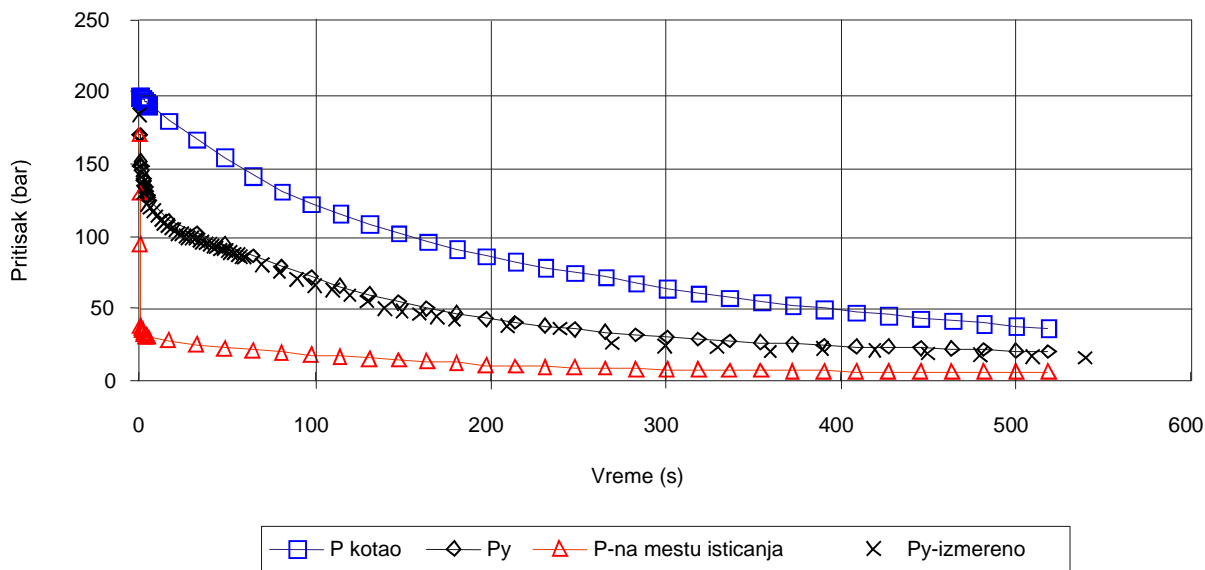
Na slici 1 je prikazana linija parovoda sveže pare. Unutrašnji prečnik parovoda od izlaza iz kotla do Y račve je 0,252 m, od Y račve do linija za uvođenje pare u turbinu 0,347 m, a linija za uvođenje pare 0,252 m. Ukupni protok pare iz kotla je 260 kg/s, a temperatura 540 °C. Na slici 2 je prikazana promena pritiska neposredno po zatvaranju svih pregradnih ventila za 0,030 s duž trase označene isprekidanom linijom na slici 1. Porast pritiska ispred pregradnog ventila, u trenutku njegovog

potpunog zatvaranja iznosi 0,6 MPa. Maksimalni porast pritiska je rezultat superpozicije kompresivnih talasa u sve četiri linije kojima se para dovodi do turbine, dostiže se u vrlo kratkom vremenskom periodu (za manje od 0,100 s) i iznosi preko 1 MPa. Strelicama 1 i 2 je prikazano prostiranje talasa pritiska od turbine ka kotlu. U 0,100 s se otvara zaobilazni vod oko turbine, pritisak u parovodu sveže pare opada, tako da dolazi do dodatnog dinamičkog opterećenja parovoda (minimum pritiska na rastojanju od približno 80 metara od izlaza iz kotla, u trenutku 0,180 s, slika 2, uslovljen je otvaranjem zaobilaznog voda). Gasodinamičke sile u delu parovoda neposredno ispred turbine visokog pritiska, tokom zatvaranja pregradnog ventila, prikazane su na slici 3. Maksimalna sila u deonici 1, neposredno ispred pregradnog ventila, dužine oko 2,4 m, iznosi preko 26 kN.

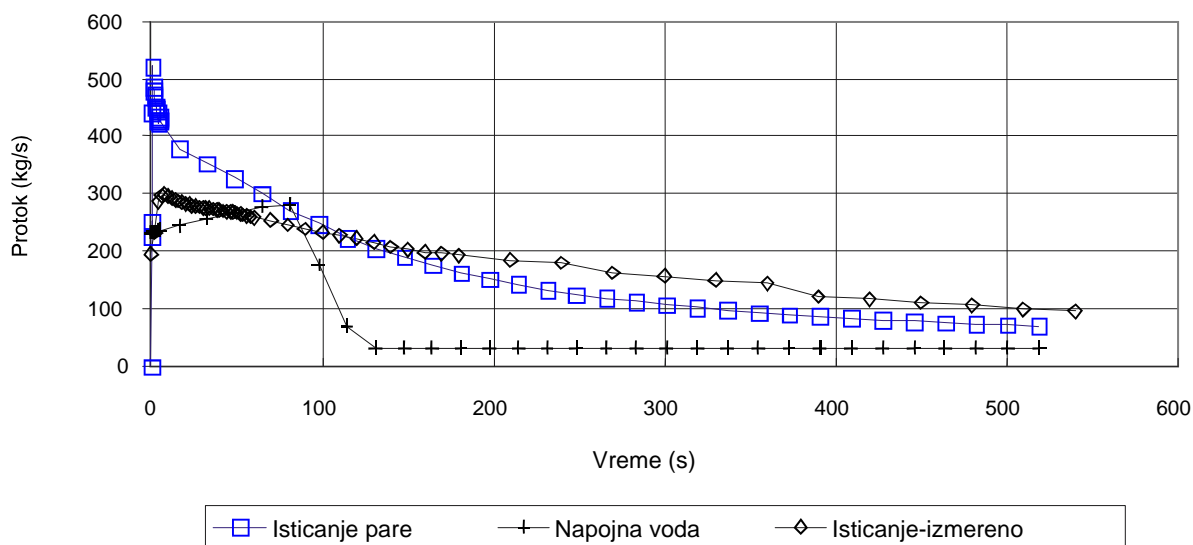
Promene pritiska i protoka nakon loma parovoda su prikazane na slikama 4 i 5. Reaktivna sila u delu parovoda kod koga je došlo do loma je prikazana na slici 6.



Slika 3. Gasodinamičke sile u delu parovoda ispred pregradnog ventila koji se zatvara za 0,030 s



Slika 4. Promena pritiska tokom isticanja usled loma parovoda sveže pare ispred turbine (mesto Y račve je označeno na slici 1)



Slika 5. Protoci pare i napojne vode kotla tokom isticanja usled loma parovoda

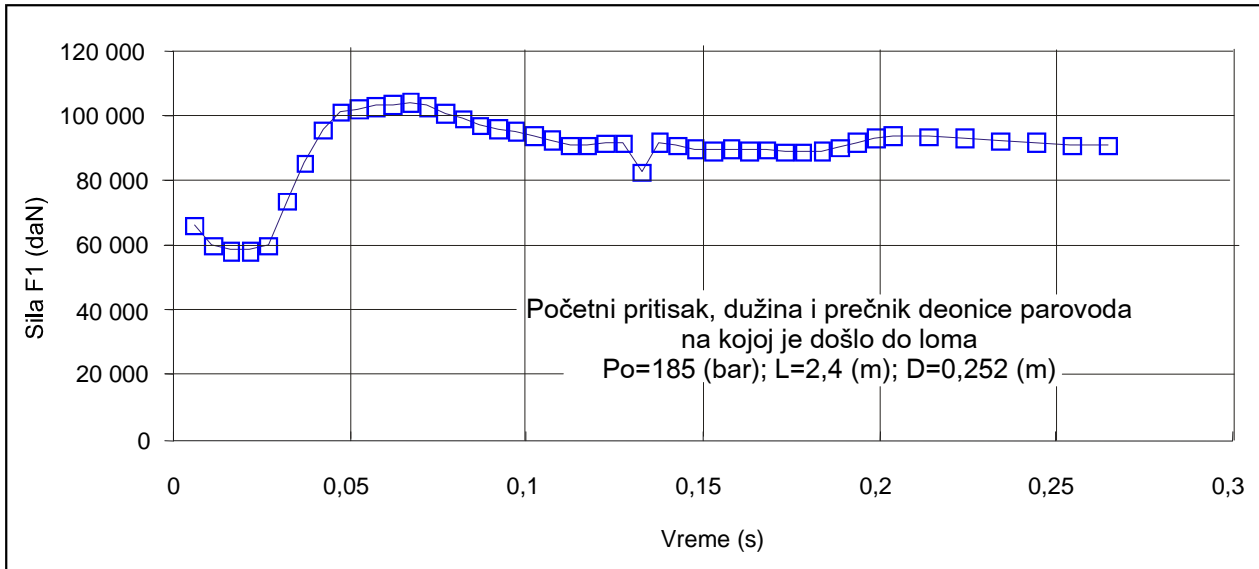
3. PRELAZNI PROCESI NA TERMOELEKTRANI „OSLOMEJ”

Dinamičke fluidne sile su određene za parovod sveže pare (linija RA) pri ispadu turbine i liniju napojne vode (RL) pri ispadu napojne pumpe na termoelektrani „Oslomej” u Makedoniji [5]. Konfiguracije parovoda sveže pare i cevovoda napojne vode su prikazane na slikama 7 i 9. Ukupni protok pare na izlazu iz kotla je 105,5 kg/s, na pritisku od

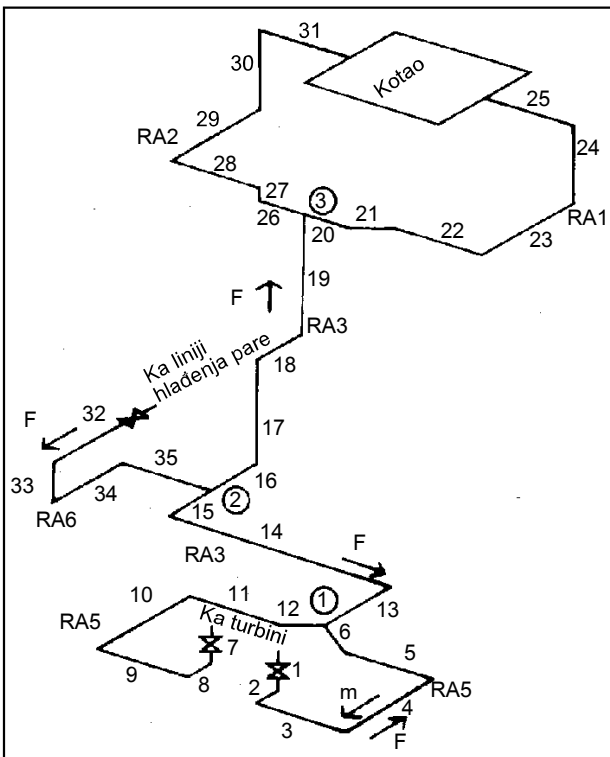
133,4 bara i temperature 540 °C. Pritisak napojne vode na potisu napojne pumpe je 181,6 bara, a temperatura 120 °C.

3.1 Parovod sveže pare (linija RA)

U nula sekundi počinje zatvaranje pregradnih ventila ispred turbine visokog pritiska (TVP). Pregradni ventili se istovremeno zatvaraju za 0,2 s. Zaobilazni ventil TVP počinje sa otvaranjem kada

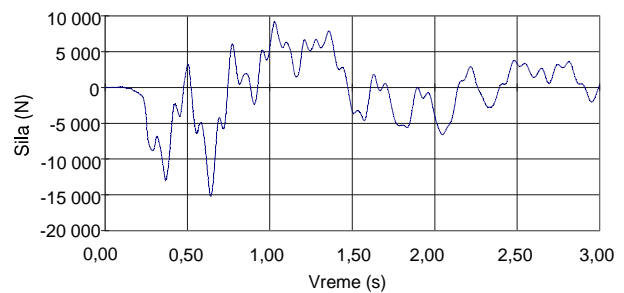


Slika 6. Reaktivna sila na mestu isticanja usled loma parovoda



Slika 7. Linija sveže pare TE „Oslomej” (linija RA)

pritisak ispred ventila dostigne 135,3 bara. Simulacija se vrši za vremenski interval od 3 sekunde nakon početka poremećaja. U tom intervalu se javljaju maksimalni impulsi sile neposredno po zatvaranju pregradnih ventila, a potom se amplitude prigušuju. Pretpostavlja se da se u ovom kratkom vremenskom intervalu produkcija pare u kotlu ne menja. Poremećaj od pregradnih ventila duž parovoda

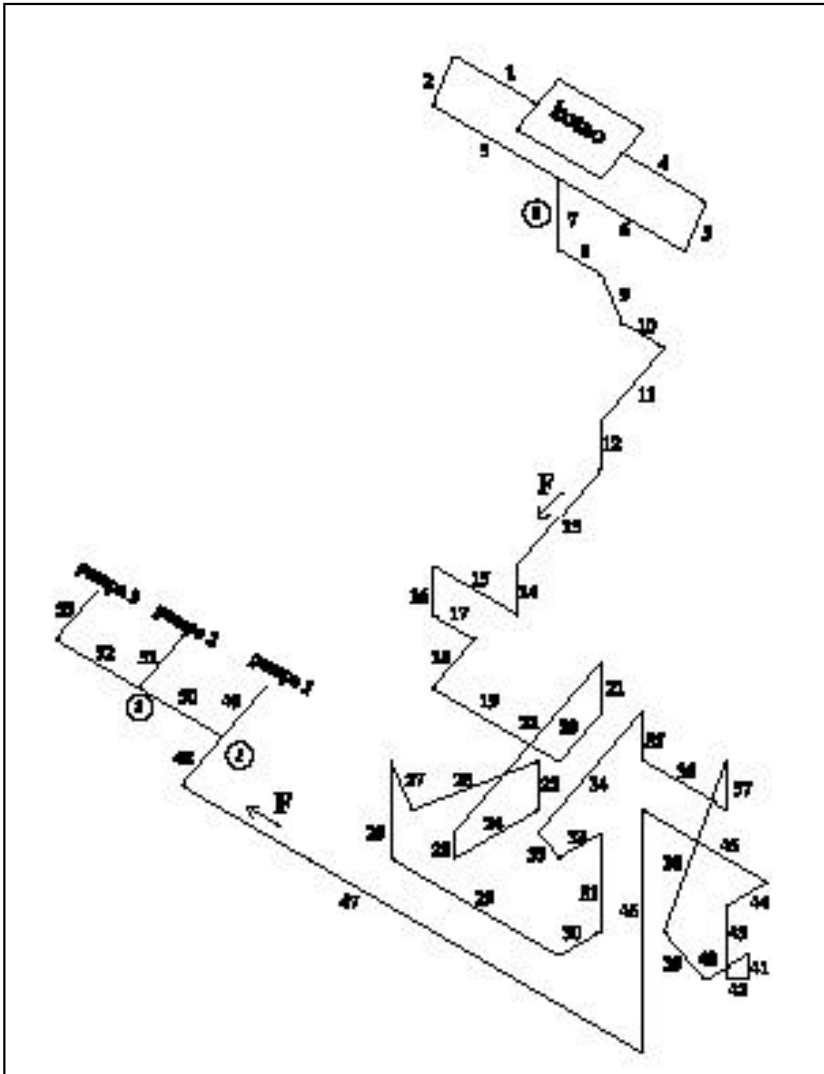


Slika 8. Dinamička sila u deonici 19 linije RA

se prenosi brzinom prostiranja zvuka od oko 500 m/s (ukoliko se zanemari elastičnost zidova cevovoda, što se može prihvatiti s obzirom na debljinu zida parovoda, brzina zvuka se određuje prema $(\partial p / \partial \rho)_s^{1/2}$, gde su p -pritisak, a ρ -gustina [6]).

Zatvaranje pregradnih ventila ispred TVP dovodi do porasta pritiska ispred ventila, prostiranja i superponiranja talasa pritiska duž parovoda, što izaziva dopunska gasodinamička opterećenja parovoda. Dopunski poremećaj sa stanovišta prostiranja talasa pritiska i pojave dinamičkih sila predstavlja otvaranje ventila na zaobilaznom vodu oko TVP.

S obzirom na to da se dinamička sila fluida određuje kao integral promene masenog protoka po dužini deonice cevovoda, značajnije sile se i javljaju samo u deonicama veće dužine. Dobijeni rezultati jasno ukazuju na dinamički karakter ovih sila, periodično ponavljanje sile u deonicama 1 do 15, od pregradnih ventila do spoja sa zaobilaznim vodom, kao i prigušivanje amplituda sile tokom vremena. Otvaranje zaobilaznog ventila povećava protok od kotla ka zaobilaznom ventilu, što za so-



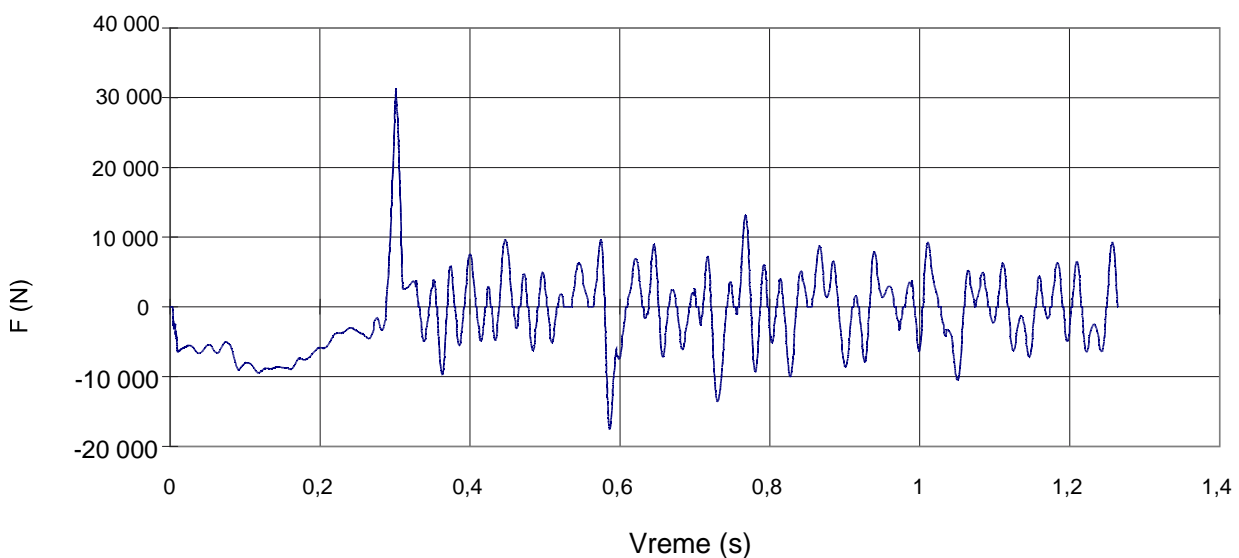
Slika 9. Linija napojne vode TE „Oslomej” (linija RL)

bom povlači povećanje pozitivne vrednosti dinamičke sile u deonicama od spoja sa zaobilaznim vodom ka kotlu, deonice od 16 do 31. Na slici 8 je prikazana dinamička sila u deonici 19.

3.2 Linija napojne vode RL

U nula sekundi počinje ispad pumpe u radu bez uključivanja rezervne. Shodno tome opada pritisak na potisu pumpe, a raste na usisu. Protok vode kroz pumpu opada do nule i postaje negativan. Nakon kraćeg intervala negativnog protoka, zatvara se nepovratna klapna na potisnom delu pumpe i zaustavlja se tok vode, što dovodi do stvaranja kompresionog talasa koji se prostire ka kotlu i odbija se o ekonomajzer kotla. Pretpostavlja se da je u kratkom simuliranom vremenskom intervalu pritisak vode u ekonomajzeru kotla stalan.

Na slici 10 je prikazana dinamička sila u deonici 47 cevovoda pri ispadu pumpe. S obzirom na znatno veću gustinu vode u odnosu na paru i veću brzinu zvuka u vodi od preko 1 000 m/s, amplitude i frekvence dinamičkih sila u liniji napojne vode su veće nego u parovodima. Kao što se vidi i u deonicama kraćim od 5



Slika 10. Dinamička sila u deonici napojne vode pri ispadu pumpe (deonica 47 linije RL)

metara dinamička sila prelazi 10 kN, a maksimalna vrednost iznosi 31 kN, i prouzrokovana je zaustavljanjem negativnog toka vode kroz pumpu usled zatvaranja nepovratne klapne.

4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani neki od rezultata proračuna dinamičkih fluidnih sila u parovodu sveže pare i liniji napojne vode tokom prelaznih i udesnih stanja za parametre i opremu termoelektrana „Drmino” i „Oslomej”. Dobijeni rezultati su podloga za strukturne analize cevovoda, proračun napona i deformacija vitalnih komponenti, određivanje vibracionih karakteristika sistema, kao i za procenu preostalog radnog veka postrojenja.

5. LITERATURA

- [1] Stevanović, V. NUMERIČKO REŠAVANJE PROSTIRANJA TALASA PRITISKA U SITEMU FLUIDA I STRUKTURE TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1986.

- [2] Stevanović, V., Studović, M., COMPUTER CODE FOR THE SIMULATION OF FAST THERMO-HYDRAULIC TRANSIENTS IN THERMAL POWER SYSTEMS, 15. Symp. Int. Assoc. for Hydraulic Research, Belgrade, 1990, p. L1.
- [3] Stevanović, V., Studović, M., Bratić, A., SIMULATION AND ANALYSIS OF A MAIN STEAM LINE TRANSIENT WITH ISOLATION VALVES CLOSURE AND SUBSEQUENT PIPE BREAK, Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, Vol. 4, No. 5, 1994, pp. 387-398.
- [4] Studović, M., Stevanović, V., Stevanović, D., Pavlović, Ž., NUMERIČKA SIMULACIJA I ANALIZA LOMA PAROVODA SVEŽE PARE NA TE DRMINO, Elaborat rađen za potrebe EPS, Mašinski fakultet Beograd, 1991.
- [5] Stevanović, V., Nedeljković, S., Studović, M., ODREĐIVANJE GASODINAMIČKIH I HIDRAULIČKIH SILA U PAROVODIMA SVEŽE I MEĐUPREGREJANE PARE I LINIJI NAPOJNE VODE TERMoeLEKTRANE „OSLOMEJ”, projekat, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [6] Streeter, V. L., Wylie, E. B., HYDRAULIC TRANSIENTS, McGraw-Hill, New York, 1967.

Rad je primljen u uredništvo 10. 09. 2001. godine

Vera Šijački Žeravčić, Biljana Anđelić, Gordana Bakić,
Miloš Đukić, Dušan Milanović, Aleksandar Vlajčić, Petar Maksimović

Uticaj kvaliteta materijala na pouzdanost termoenergetskog postrojenja

Stručni rad
UDK: 621.311.22; 620

Rezime:

Značajan broj otkaza termoenergetskih postrojenja, prema statističkim podacima, je posledica neodgovarajućeg kvaliteta materijala od koga je neka komponenta izrađena. Interesantno je pitanje kako materijal može da bude neodgovarajući, kada se s jedne strane, pri projektovanju izabiraju materijali koji, po svojim standardizovanim osobinama, zadovoljavaju mogućnost eksploatacije pri povišenim parametrima za određeni radni vek, dok se s druge strane uz specifikaciju isporučenih materijala dostavljaju i atesti kao nepobitni dokazi o kvalitetu materijala. Međutim, mnogobrojna ispitivanja, koja su na našim postrojenjima usledila nakon havarijskih ispada, su kao rezultat imala jednoznačan zaključak: polazni materijal nije bio zadovoljavajućeg kvaliteta. Namera u ovom radu je da predloži klasifikaciju mogućih grešaka kod komponenti termoenergetskih postrojenja čime bi bila pojednostavljena i olakšana procedura svih vidova kontrola ali i otkrivanje uzroka pojave oštećenja i razaranja. Takođe su prikazani neki od konkretnih slučajeva razaranja komponenti termoenergetskih postrojenja koja su usledila zbog nezadovoljavajućeg polaznog kvaliteta materijala, ne ulazeći u tehno-ekonomsku analizu štete koja bi bila krana svakog ovakvog nalaza.

Ključne reči: termoenergetsko postrojenje, materijal, kontrola kvaliteta, predlog klasifikacije grešaka

Abstract:

THE INFLUENCE OF MATERIAL QUALITY ON POWER PLANT RELIABILITY

According to statistics, a substantial number of shutdowns occurring in power plant components, have resulted from inadequate material quality. It is interesting to know how this particular material proves to be inappropriate, when it satisfies conditions of high temperature and service life, and is delivered with an asserted quality specification as proof of its quality. Numerous tests performed on domestic components after breakdowns all lead to a common conclusion: the initial material quality was poor. The aim of this paper is to present a proposal of possible flaws classification of power plant components which can ensure easier control of material during inspection as well as reveal possible causes of flaws/damages and failures. Some specific cases of component damages provoked by inadequate material quality are also presented.

Key words: fossil fuel power plant, material, quality control, flaw classification proposal

Prof. dr Vera Šijački Žeravčić, mr Gordana Bakić dipl. ing. maš., Miloš Đukić dipl. ing. maš.,
– Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 11000 Beograd, 27. marta 80
Doc. dr Biljana Anđelić dipl. ing. met. – Tehnički fakultet u Čačku, 32000 Čačak,
Mr Dušan Milanović dipl. ing. maš. – "Vectram", 11000 Beograd, Baba Višnjina 41
Aleksandar Vlajčić dipl. ing. maš., Petar Maksimović, dipl. ing. maš.
– "EPS" JP TE "Nikola Tesla" – 11500 Obrenovac, Bogoljuba Uroševića Crnog bb

1. UVOD

Realna ocena preostalog resursa termoenergetskih (TE) postrojenja je jedan od najvažnijih zadataka savremene etape u njihovoj eksploataciji. Metode i pristupi proceni preostalog resursa su mnogobrojni, zasnovani na različitim polaznim pretpostavkama, ali često ograničeni u svojoj primeni i vrlo konzervativni. Pojedine metode se zasnivaju na praćenju podataka iz eksploatacione istorije postrojenja, pre svega, pritiska i temperature, ali nijedna od njih ne uzima u obzir uticaj određenih grešaka na izdržljivost materijala. Jedan od razloga za ovakav pristup sigurno leži u činjenici da kod TE postrojenja ne postoji klasifikacija mogućih grešaka niti sistematizovano praćenje vrste

grešaka po uzroku nastajanja. Stoga je u ovom radu prikazana jedna od mogućih klasifikacija grešaka metala TE postrojenja, a dat je i kratak pregled onih koje se posebno odnose na realni kvalitet polaznog materijala, jer on predstavlja prvu kariku u lancu činilaca koji određuju eksploatacioni vek postrojenja.

2. PREDLOG KATEGORIZACIJE GREŠAKA

Baveći se problemima materijala i njihovim ponašanjem u uslovima dugotrajne eksploatacije već dugi niz godina, došli smo do saznanja da su i dan-danas neki pokazatelji koji se tiču materijala TE postrojenja ostali nedorečeni i nesistematizovani.

Predlog klasifikacije grešaka metala TE postrojenja

Tabela 1.

Princip klasifikacije	Cilj	Grupa grešaka	Primeri
Hronološki	Određivanje organizacije odgovorne za pojavu greške	1.1 Konstrukcione	1.1.1 Nepravilan izbor oblika elementa konstrukcije (nepravilno konstrukciono rešenje);
			1.1.2 Nepravilan izbor osnovnih dimenzija elemenata konstrukcije;
			1.1.3 Nepravilna ocena nivoa eksploatacionog delovanja na metal;
			1.1.4. Nepravilna ocena položaja/vrste oštećenja, itd.
		1.2 Tehnološke	1.2.1 Odstupanje dimenzija elemenata konstrukcije u odnosu na projektnu dimenziju;
			1.2.2 Odstupanje od zahtevanog, po standardima, hemijskog sastava, strukture, mehaničkih osobina, količine uključaka, diskontinuiteta, itd.;
		1.3 Montažne	1.3.1 Greške zavarivanja: neprovvari, prokapljine, prsline zavarivanja, nalepljivanje, itd., kod fabrički zavarenih spojeva;
			1.3.2 Odstupanje u parametrima režima zavarivanja, prethodne i naknadne termičke obrade od projektom predviđenih;
			1.3.3 Odstupanje u kvalitetu i stanju površine od zahteva prema standardu ili projektu;
			1.3.4 Mehaničke povrede površine metala u transportu i montaži;
			1.3.5 Nepravilna montaža elemenata konstrukcije;
			1.3.6 Greške zavarivanja na montažnim šavovima;
		1.4 Eksploatacione	1.4.1 Zamorne prsline, prsline puzanja koje se javljaju zbog narušavanja t-p režima rada;
			1.4.2 Koroziona oštećenja koja se javljaju sa vodeno-parne strane i sa strane dimnih gasova;
			1.4.3 Promena oblika elemenata konstrukcije i parovoda iznad dopuštenih vrednosti usled delovanja višeg nivoa temperature i pritiska, dinamičkih udara;
1.5 Remontne	1.5.1 Prsline provocirane visokim nivoom zaostalih napona od zavarivanja pri remontu ili koncentracijom napona pri remontu;		
	1.5.2 Greške zavarivanja pri remontu;		
	1.5.3 Nepravilno sastavljanje elemenata pri remontu;		

Princip klasifikacije	Cilj	Grupa grešaka	Primeri
Funkcionalni	Određivanje činilaca ili grupe činilaca, odgovornih za nastanak greške	2.1 Greške čiji je osnovni uzrok veće opterećenje (mehaničko, toplotno, kombinovano)	
		2.1.1 Greške kao posledice dejstva samo većeg opterećenja	Zamorne prsline; Prsline puzanja; Prsline od dejstva statičkog opterećenja; Prsline krto g razaranja;...
		2.1.2 Greške kao posledica kombinovanog dejstva opterećenja i drugih činilaca	Prsline usled naponske korozije; Koroziono-zamorne prsline; Krtog razaranja usled starenja pod dejstvom napona i temperature; Prsline usled termičkog zamora;
		2.2 Greške čiji je osnovni uzrok korozioni atak	Opšta korozija; Promena hemijskog sastava metala i okoline; Kiseonična korozija; Interkristalna korozija; Piting korozija; Vodonična krtost;
		2.2.1 Greške kao posledica kombinovanog dejstva korozione sredine i drugih činilaca	Freting korozija; Kavitaciona korozija; Greške iz 2.1.1 čija je pojava stimulisana delovanjem temperature i napona;
		2.3 Greške čiji je osnovni uzrok temperatura	Starenje pri zagrevanju; Promena strukture (degradacija) ; Pore (puzanje); Naslage; Zaostali naponi;
Po karakterističnim znacima	Tačnije opisivanje greške	3.1 Greške u geometriji (odstupanje od prečnika i debljine zida u odnosu na projektne dimenzije);	
		3.2 Greške zavarivanja;	
		3.3 Greške u hemijskom sastavu (odstupanje sadržaja legirajućih elemenata od standardom predviđenih vrednosti, razugljeničenje površinskih slojeva);	
		3.4 Greške mikrostrukture (odstupanje veličine zrna, sadržaja feritne faze, sadržaja perlitne faze, ... u odnosu na standardom predviđene vrednosti);	
		3.5 Greške u mehaničkim svojstvima (odstupanje od standardom predviđenih vrednosti);	
		3.6 Greške nehomogenosti (nemetalni uključci-sulfidi, oksidi, silikati i šljaka u količini i veličini iznad dopuštenih vrednosti, likvacija, nehomogenost u veličini zrna,...);	
		3.7 Greške neprekidnosti (pore i gasne šupljine, neprovani svih oblika, mreža prslina,...).	

vani. Jedan od njih se odnosi i na nepostojanje jedinstvene klasifikacije grešaka TE postrojenja, koja je inače, kada je reč o greškama metala nuklearnih postrojenja ili materijala koji se koriste u drugim granama industrije odavno urađena. S obzirom na paralelnost u odvijanju procesa kod termo i nuklearnih elektrana, kao i ponašanje koje pokazuju metali pojedinih komponenti u uslovima eksploatacije, sigurno je da klasifikacija grešaka metala nuklearnih elektrana [1] u potpunosti po konceptu može da se preuzme i primeni kod TE postrojenja. Ovakva klasifikacija bi bila neophodna i sa stano-

višta procene radnog i preostalog radnog veka, čime bi značajan broj dilema i nepoznanica, posebno onaj koji se odnosi na istoriju postrojenja, bio razrešen. U tabeli 1 dat je Predlog klasifikacije grešaka metala TE postrojenja koji je podložan dopunama i promenama posebno sa aspekta vrste grešaka čija je pojava isključivo karakteristika za TE postrojenja.

Predložena klasifikacija, principijelno, obuhvata sve moguće vrste grešaka koje mogu da se javе kod TE postrojenja od projekta, montaže do bilo kog stadijuma eksploatacije postrojenja. Određen

broj grešaka može u relativno kratkom vremenu eksploatacije da se otkrije, pre svega iz grupe konstruktivnih, a delimično i iz grupe montažnih. Međutim, greške iz grupe tehnoloških grešaka u materijalu se javljaju kao skrivene, koje se vremenom, čak i u uslovima optimalne eksploatacije, aktiviraju i u zavisnosti od veličine, mogu da prouzrokuju manji ili veći stepen oštećenja a nekada i razaranje komponente.

Zato bi jedan od osnovnih interesa trebalo da bude i utvrđivanje raspodele broja grešaka po uzrocima i po vremenu njihove pojave tokom eksploatacije po svim grupama, a ne samo po pojedinim. Međutim, u analizi rezultata određivanja uzroka pojave greške, ako se ona uopšte i sprovodi, ima mnogo nedostataka, iako je poznato da ona predstavlja jednu od karika u lancu mera koje se preduzimaju u cilju povećanja pouzdanosti postrojenja, zato što:

- često nije moguće odrediti uzrok pojave greške;
- umesto uzroka pojave ističe se karakter, kao npr. zamorna prslina, naponska korozija, itd.
- skoro u svim slučajevima analize uzroka pojave greške/oštećenja odsustvuje kvantitativna analiza udela dejstva različitih činilaca u pojavi oštećenja. Ovakav pristup, kao i odsustvo razradene metodologije u analizi pronalaženja uzroka pojave oštećenja dovodi do subjektivizma pri utvrđivanju uzroka.

Najčešće greške, istovremeno i najopasnije sa veoma teškim posledicama, iz grupe tehnoloških grešaka u materijalu koje su se sa dejstvom pojavile kao zakasnele kod naših TE postrojenja se odnose se na:

- odstupanje od zahtevanog, po standardima, hemijskog sastava, strukture, mehaničkih osobina, količine uključaka, i
- pojavu grešaka zavarivanja: neprovara, prokopljina,...

Stepen razaranja sa tehno-ekonomskog aspekta zavisi od komponente postrojenja koja je sa greškom. Samo nekoliko primera havarija koje su se desile na našim TE postrojenjima u poslednjih deset godina, a koje su bile posledica neodgovarajućeg kvaliteta polaznog materijala, upečatljivo mogu da posluže kao dokaz neophodnosti uvođenja klasifikacije grešaka s jedne strane, i sprovođenja kvalitetne ulazne kontrole s druge strane, tabela 2 [2-6].

Ovakve analize je dalje potrebno upotpuniti i sa podacima o istorijatu opreme, da bi se bar za ubuduće znalo u kojim slučajevima bi trebalo, pri ugovaranju i prijemu opreme, primeniti:

- pristup definisanja tačnog nivoa kvaliteta materijala ispod koga određena komponenta neće biti prihvaćena, i
- rigoroznije mere ulazne kontrole da bi se smanjila mogućnost ugradnje komponenti nezadovoljavajućeg kvaliteta,

a možda bi to trebalo da nam u bilo kom slučaju postane praksa.

3. UTICAJ POJEDINIH ČINILACA

Imajući u vidu značajan broj podataka, na osnovu višegodišnjih istraživanja, o vrstama grešaka koje su kod domaćih TE postrojenja dovele do različitih oštećenja i havarija posebna pažnja je posvećena kategoriji tehnoloških grešaka. O ovim greškama i njihovom uticaju mogli bi da se napišu tomovi knjiga, a u ovom radu će biti spomenute informativno, samo sa aspekta posledica koje mogu da izazovu.

3.1. Uticaj neodgovarajućeg hemijskog sastava

Da bi materijal neke komponente mogao da zadovolji eksploataciju u uslovima povišenih parametara, jasno je da mora da potiče iz klase toplotnopoostojanih čelika. U slučaju da je, iz bilo kog

Tabela 2.

Vrste grešaka koje su prouzrokovale havariju pojedinih komponenti kod naših TE postrojenja

TE	Komponenta postrojenja		
	Kotao	Parovodi / Cevovodi	Turbina
TENT-A		-greške zavarivanja -hemijski sastav	
TENT-B	-hemijski sastav -količina uključaka		-hemijski sastav -struktura -količina uključaka
TEKO-B	-hemijski sastav	-hemijski sastav (p) -hemijski sastav (c)	

razloga, ugrađen materijal sa neodgovarajućim hemijskim sastavom, a to po pravilu sa sobom povlači i neodgovarajuću strukturu i mehaničke osobine, neminovno, pre ili kasnije dolazi do razaranja. Brzina dejstva greške, odnosno vreme do loma zavisi od veličine odstupanja od nazivnog hemijskog sastava s jedne strane, odnosno radnih parametara, s druge strane. U poređenju sa ostalim vrstama grešaka, ne samo iz 1.2.2. kategorije, greške tipa neodgovarajućeg hemijskog sastava mogu u izvesnim slučajevima da izazovu najteži vid razaranja.

3.2. Uticaj neodgovarajuće strukture

Ova vrsta greške, ako je prisutna, skraćuje projektni i eksploatacioni vek postrojenja. Brzina dejstva je mnogo manja nego u slučaju neodgovarajućeg hemijskog sastava, a stepen razaranja može da bude najtežeg vida, posebno ako do izražaja dođe i prekoračenje nekih drugih uticajnih činilaca (opterećenja, temperature, radne sredine,...).

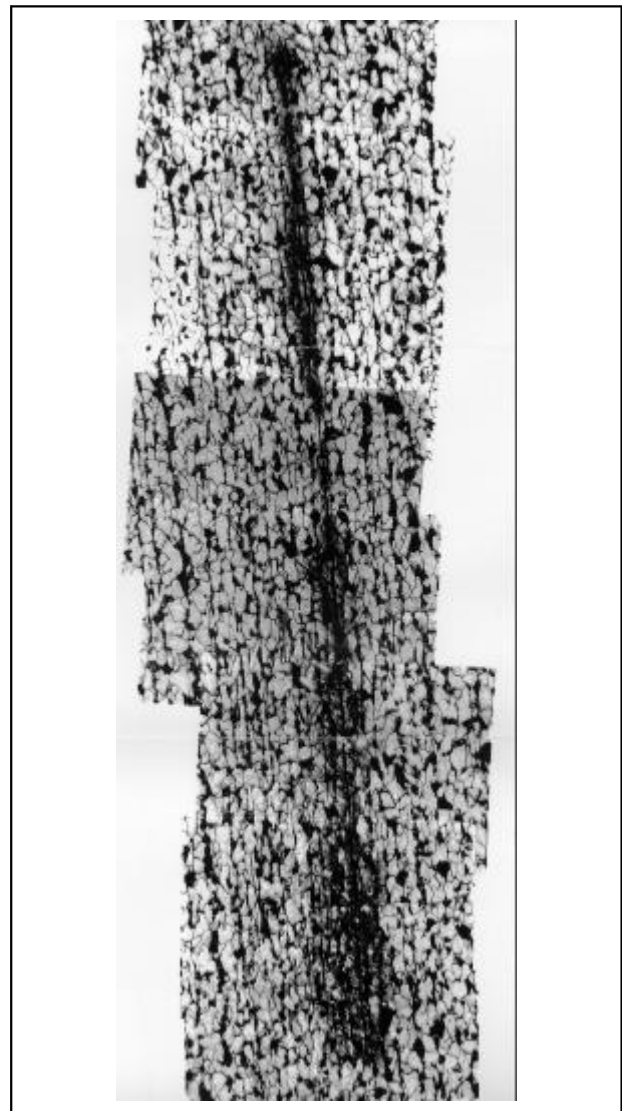
3.3. Uticaj nemetalnih uključaka

Pored drugih, optički uočljivih nesavršenstava, nemetalni uključci imaju uticaja na eksploatacioni vek materijala ugrađenih u TE postrojenja u smislu njegovog skraćivanja, kao i izazivanja oštećenja sa razvojem do loma. Uopšteno, nemetalni uključci deluju kao klice prslina, posebno ako su prisutni u materijalima onih grejnih površina kod kojih, zbog uslova procesa i eksploatacije, može da se javi sklonost ka apsorpciji vodonika i vodoničnoj krtosti (isparivač). Utvrđeno je da bitan uticaj na osobine materijala [7], a time i na pojavu oštećenja, ima ne samo priroda nemetalnih uključaka (sulfidi, oksidi), već i njihov zapreminski udeo, oblik i raspodela.

Pošto bi sadržaj i S i Mn kod toplotnopoostojanih čelika (uključci MnS su najčešći tip uključaka) trebalo da se nalazi u opsegu dozvoljenih vrednosti, onda bi i zapreminski udeo MnS uključaka trebalo da bude poznat i praktično relativno sličan za isti tip čelika (imajući u vidu da su postupci fabricacije isti). Međutim, mnogo značajniji činilac nije njihov zapreminski udeo, već njihov oblik (najčešće izdužen) i raspodela.

Naime, mora da se konstatuje, bar kada je reč o materijalima ugrađenim u naša TE postrojenja, da se većina njih odlikuje veoma izraženom koncentracijskom nehomogenošću u lokalnim oblastima (mikrolokalnim oblastima), odnosno, u konačnom, neravnomernom raspodelom uključaka. Zbog specifičnosti procesa difuzije pri očvršćavanju npr. legiranih čelika, dolazi do pojave segregacije atoma mangana, posebno u centralnim oblastima odlivka, koja uslovljava i povećanu količinu MnS uključaka u toj oblasti, slika 1. Takođe, oblasti lokalno obo-

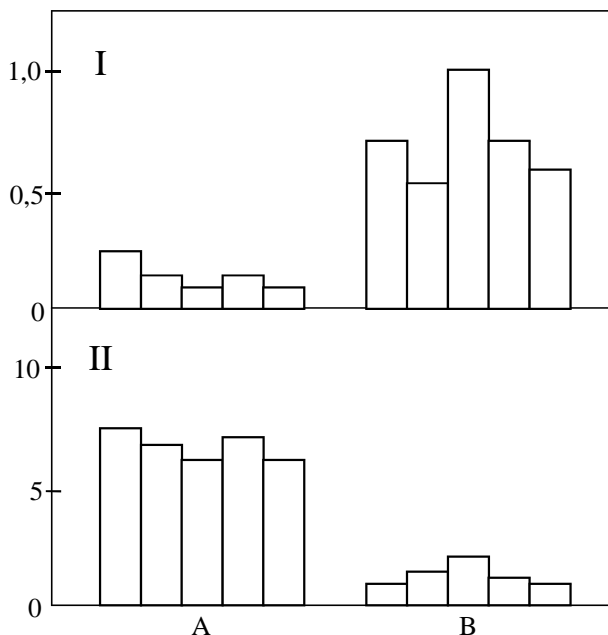
gačene Mn (MnS uključcima) se odlikuju trakastom feritno-perlitnom strukturom, ili čak, što je posebno karakteristično za zonu uticaja toplote zavarenog spoja, pojavom nepoželjne austenitno-martenzitne strukture. Ovakve lokalne oblasti, zbog povećane čvrstoće ali i snižene plastičnosti, pokazuju štetan uticaj, pogoduju spajanju npr. vodoničnih prslina ili, generalno, deluju kao klice za obrazovanje prslina. Postojanje ovih oblasti kao što je rečeno, posebno dolazi do izražaja u ZUT-u, gde su poznate kao „lokalne krte faze” i gde mogu da izazivaju stalnu pojavu oštećenja (nakupine-mikroprslina-makroprslina), slika 2. Na slici 3 je, kao primer, prikazana zavisnost između količine segregacija i mikrostrukture u zoni uticaja toplote, odnosno žilavosti kao osobine koja pokazuje sklonost materijala ka krtom razaranju.



Slika 1. Poprečni presek uzorka cevi. Sredina uzorka. Dugački MnS uključci međusobno povezani prslinama. Usledilo razaranje do loma (200x)



Slika 2. Kolekcije nečistoća u metal šavu i po granicama zrna zone pregrevanja ZUT-a (500 x)

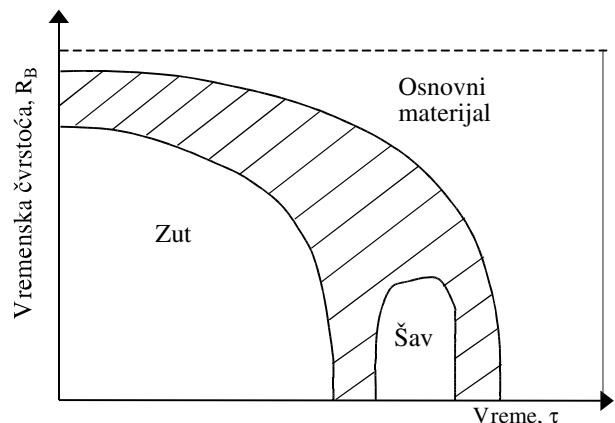


Slika 3. Uticaj količine segregacija u centru uzorka na žilavost na -10°C , (I) i količinu martenzitno-austenitne strukture, % (II): A – visok nivo, B – nizak nivo

3.4. Uticaj grešaka zavarivanja

Greške zavarivanja, takođe, mogu, po konačnom ishodu, da se svrstaju u "opasne" greške, s tim što smatramo da posebno treba ukazati na činjenicu da su to greške uvek složenog karaktera i sa nižim pragom aktiviranja, zbog čega je proistekla i opštepoznata konstatacija da zavareni spoj uvek predstavlja osetljivo mesto u konstrukciji.

Sam zavareni spoj i bez bilo kakvih aktivnih ili skrivenih grešaka zavarivanja ima značajan udeo u razaranjima komponenti TE postrojenja, pre svega zbog svoje nehomogene mikrostrukture. Interesantno je istaći da se i podaci koji su saopšteni u mnogim standardima /normama / i literaturi, a tiču se osobina toplotnopoostojanih čelika na povišenim temperaturama, odnose samo na osnovni materijal koji inače u zavarenom spoju učestvuje samo jednim delom. Preostala dva dela, oblast zone uticaja toplote i oblast metal šava, sa potpuno različitom i to nepovoljnijom strukturom, imaju i potpuno različite osobine od osnovnog materijala, pre svega bitno nižu vremensku čvrstoću, slika 4. Ako se na sve to superponira i dejstvo prisutne greške/greška zavarivanja, onda je jasno zašto je oblast zavarenog spoja u literaturi poznata kao lokacija osetljiva na oštećenja.



Slika 4. Šematski prikaz promene vremenske čvrstoće zavarenog spoja, po oblastima, tokom eksploatacije

4. UMEMSTO ZAKLJUČKA

Kvalitet polaznog materijala komponenti TE postrojenja polako ali sigurno zauzima mesto koje mu pripada. On predstavlja prvu kariku u lancu činilaca koji, između ostalog, određuju eksploatacioni vek termoenergetskog postrojenja. Za sam kvalitet bi moglo da se kaže da je funkcija četiri osnovna faktora:

- hemijskog sastava, posebno sadržaja štetnih elemenata, kao i odstupanja od standardom predviđenih vrednosti,

– sadržaja nemetalnih uključaka,
 – uslova i načina livenja,
 – režima termomehaničke obrade,
 odnosno faktora koji se kontrolišu tokom samog proizvodnog procesa do dobijanja konačnog proizvoda. Stvarni kvalitet materijala za izradu različitih komponenti TE postrojenja (svakako zavisi i od stepena odgovornosti komponente), koji je inače standardom definisan, trebalo bi da predstavlja optimalnu kombinaciju kvaliteta i ekonomskih pokazatelja. Nažalost, u praksi se sve češće dešavaju slučajevi da se odstupa od tog optimuma, i to na račun kvaliteta. Uticaj prvog faktora hemijskog sastava je najznačajniji, s tim što samo on može, zavisno od stepena odstupanja od nazivnog sadržaja pa do potpune zamene materijala u smislu nekvalitetnijeg, da dovede do skoro trenutnog razaranja. Ostala tri faktora (u slučaju odstupanja i u zavisnosti od stepena odstupanja) deluju kao skrivene greške najčešće se ne aktiviraju u periodu dečijih bolesti postrojenja već kasnije, ponekad i nakon dugotrajne eksploatacije. Rezultat njihovog dejstva, zavisno od komponente koja je u pitanju kao i karakteristika strukturnih grešaka, je različit, a može da bude i izuzetno težak. Imajući u vidu da je materijal komponenti TE postrojenja tokom rada izložen uslovima delovanja visokih parametara (pritiska i temperature), korozivno aktivnoj sredini i dejstvu stacionarnih i promenljivih opterećenja verovatno nije naodmet da se još

jednom istakne značaj i uloga polaznog kvaliteta materijala, odnosno značaj rigorozne kontrole pri prijemu materijala.

5. LITERATURA

- [1] Getman A. F., ZAVODSKAJA LABORATORIJA N° 2, (1997), 37-43
- [2] Šijački Žeravčić V., Marković A., Radović M., Stamenić Z, i dr.: STUDIJA O ISPITIVANJU UZROKA LOMA LOPATICA DRUGOG FLUKSA TURBINE TURBONAPOJNE PUMPE NA BLOKU 2, TENT-B, Mašinski fakultet u Beogradu, 1996
- [3] Šijački Žeravčić V., Marković A., Smiljanić P., Stamenić Z, i dr.: EKSPERTIZA UZROKA LOMA DOVODA SVEŽE PARE BLOKA 1, TE Drmno-Kostolac b, Mašinski fakultet u Beogradu, 1991
- [4] Šijački Žeravčić V., Radović M., Stamenić Z., Bakić G., Đukić M.: EKSPERTIZA LOMA CEVI PREGREJAČA SVEŽE PARE INA BLOKU 2, TENT-B, Mašinski fakultet u Beogradu, 1998
- [5] Šijački Žeravčić V., Marković A., Radović M., Stamenić Z. i dr.: STUDIJA O STANJU I PROCENI PREOSTALOG RADNOG VEKA POVEZNOG PAROVODA P2-P3 TE DRMNO-KOSTOLAC B, Mašinski fakultet u Beogradu, 1996
- [6] Šijački Žeravčić V., Marković A., Stamenić Z.: ODREĐIVANJE UZROKA POJAVE RAZARANJA NA SANACIJU, Mašinski fakultet u Beogradu, 1992.
- [7] Gladman T., INT. CONF. CLEAN STEEL 4., The Institute of Material, London 1992, pp 3–24.

Rad je primljen u uredništvo 10. 09. 2001. godine

Elektrostatički ekrani između namotaja VN i NN – ugradnja u blok transformatoru od 725 MVA

Stručni rad
UDK: 621.314.21; 621.314.222.7.

Rezime:

Za popravku nekog transformatora je od posebnog interesa pravilno utvrđivanje uzroka ispada iz pogona odnosno razloga oštećenja njegovih pojedinih komponenti, jer su to polazne osnove za izvođenje bilo kakvog unapređenja konstrukcije tog transformatora.

Prenošenje prenapona sa strane visokog napona (VN) na stranu nižeg napona (NN), a što je veoma izraženo kod blok transformatora gde su prenosni odnosi napona veliki, može da predstavlja ne mali problem, budući da njihove vrednosti najčešće znatno prekoračuju dopuštene vrednosti za opremu na strani NN. Kako bi se ovaj problem prevazišao kod nekih blok transformatora ugrađeni su elektrostatički ekrani između namotaja VN i NN, kao što je to slučaj i kod blok transformatora od 725 MVA, 400 kV.

Ugradnja elektrostatičkih ekrana u prostor gde je rasuti fluks najveći zahteva od konstruktora veliku pažnju, budući da su moguća lokalna pregrevanja- usijanja metalnih delova koja mogu dovesti do oštećenja okolne izolacije, loših rezultata gasnohromatografske, analize pa i ispada samog transformatora. Rad daje prikaz rešenja jednog elektrostatičkog ekrana koji je ugrađen između namotaja VN i NN blok transformatora 725 MVA, gde je posebna pažnja posvećena razmatranju zagrevanju ekrana.

Postavljanjem ekrana u prostor između namotaja VN i NN znatno se redukuju vrednosti prenapona koje se mogu preneti na stranu NN i uglavnom ne prelaze 10 % onih kada njih ne bi bilo, bilo da se radi o punom ili sečenom talasu impulsnih napona.

Ključne reči: transformator, modernizacija, prenaponi, ekrani, lokalna pregrevanja

Abstract:

ELECTROSTATIC SHIELD BETWEEN HV AND LV COILS- BUILDING INTO 725 MVA GENERATOR TRANSFORMER

For the purpose of transformer repair, special attention should be paid to proper detection of causes of transformer failure, that is the reasons of the damage of its particular components, since this is the starting point when embarking on any kind of improvement of transformer design.

Transmitting of overvoltage from the HV to LV side, which is quite frequently the case with generator transformers where the voltage ratio is high, can represent not a small problem at all, assuming that its value in most cases rather exceeds the allowed values for the equipment at LV side. In order to overcome the problem with some transformers, electrostatic shields were built between the HV and LV coils, as was the case with the 725 MVA generator transformer.

Vlastimir Jovanović, dipl. ing., Miloš Kostić, dipl. tehn. – MINEL TRANSFORMATORI, 11000 Beograd- Ripanj, Put za koloniju 24

Building-in of the electrostatic shields in the place where the highest stray flux requires the utmost attention from the designer part, considering the possibility of the local overheating, very hot state of the metal parts that could lead to damage of the surrounding insulation, poor results of the gas chromatographic analysis, even to breakdown of the subject transformer. The example of the solution with an electrostatic shield which is built-in between the HV and LV windings of 725 MVA generator transformer, with a special accent on the scrutiny of the heating of the shield, has been given further on in the paper.

By means of placing the shield in the space between the HV and LV coils the overvoltage values that can be transmitted to the LV side are reduced by large and they do not exceed 10% of the value when they did not exist, when dealing either with the full or the chopped wave of the impulse voltage.

Key words: transformer, updating, overvoltages, shields, hot spots

1. UVOD

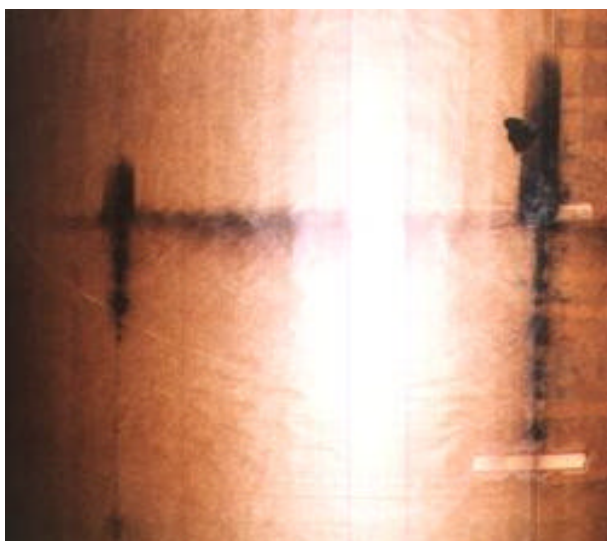
Postoje konstrukcije transformatora sa ugrađenim elektrostatičkim ekranima između namotaja VN i NN. Cilj postavljanja elektrostatičkih ekrana je da se spreči prenošenje prenapona impulsne prirode sa visokonaponske na niskonaponsku stranu odnosno da zaštiti od prelaznih pojava na namotajima VN idući ka namotajima NN, pa je ispitivanje njihove efikasnosti od posebnog značaja. U tom cilju, maksimalno moguće redukovanje kapaciteta između namotaja VN i NN je bitno, kako bi preneti prenaponi bili beznačajni. U slučajevima veoma strmih talasa moraju se preduzeti dopunske mere, kako bi se postigla zadovoljavajuća efikasnost ekrana.

Kako bi se sprečilo prenošenje prenapona impulsne prirode sa visokonaponske na niskonaponsku stranu na blok transformatoru 725 MVA, bili su postavljeni elektrostatički ekrani između namotaja VN i NN. U toku demontaže faza ovog transformatora zapažena su vidna oštećenja ugrađenih

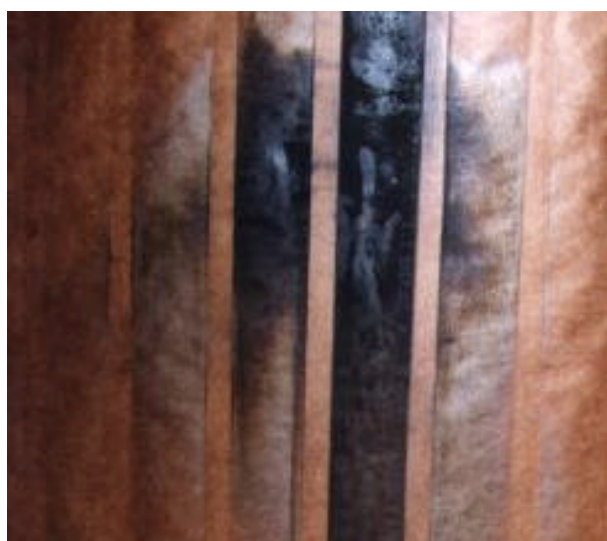
ekrana u termičkom smislu, što je imalo za posledicu i oštećenje okolne celulozne izolacije. Zagrevanje ekrana do te mere je bilo prekomerno da je na pojedinim mestima prouzrokovalo čak i topljenje mesinganog lima, posebno na mestima sastavaka. Na slici 1 je prikazan oštećeni elektrostatički ekran gde se mogu videti termička oštećenja mesinganog lima, dok je na slici 2 dat prikaz nagorele celulozne izolacije koja je bila neposredno u blizini ekrana.

Budući da su elektrostatički ekrani locirani u najvećem rasutom fluksu to je od posebnog značaja njihovo pravilno dimenzionisanje imajući u vidu komponente rasutog polja. Gubici koji se i pri najnepovoljnijim pogonskim uslovima mogu pojaviti treba da budu minimalni kako bi se i temperature održale u dopuštenim, prihvatljivim granicama.

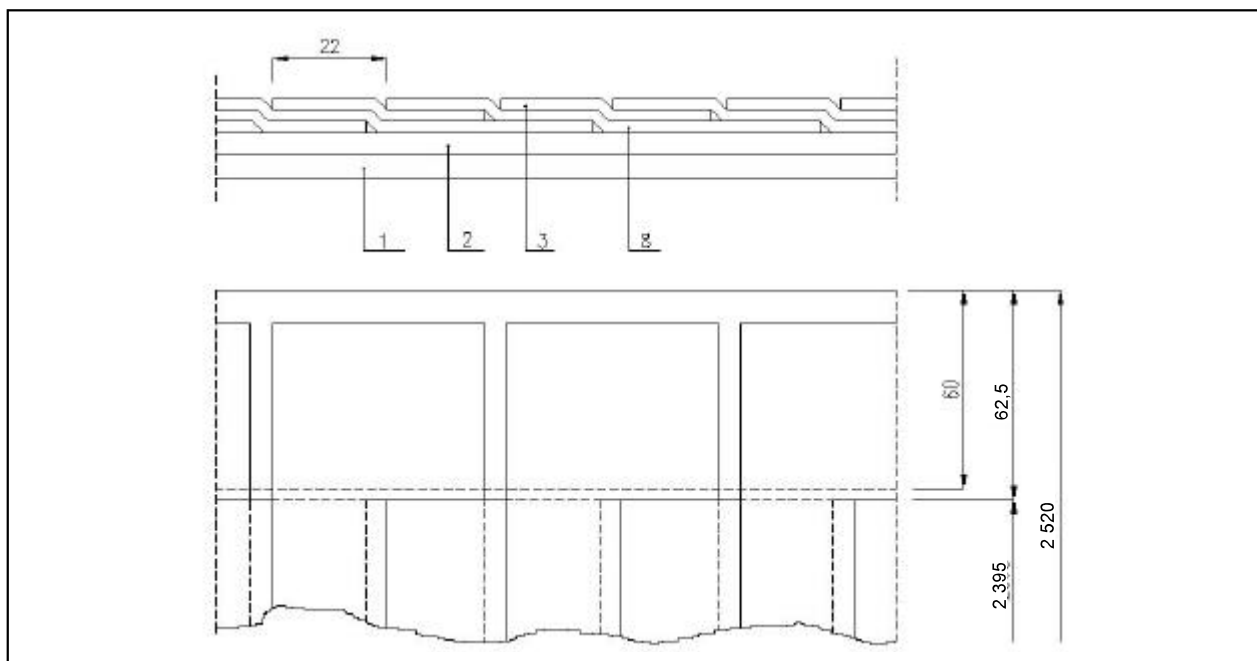
Blok transformator 725 MVA je izveden sa namotajem VN u sredini, dakle, sa namotajem NN podeljenim na dva dela, tako da su u ove svrhe postavljeni elektrostatički ekrani uz oba polunamotaja NN.



Slika 1. Nagoreli mesingani ekran



Slika 2. Oštećena celulozna izolacija



Slika 3. Postavljanje provodnih traka na osnovu

2. KONSTRUKCIJA ELEKTROSTATIČKIH EKRANA

Konstrukcija elektrostatičkih ekrana nije ni malo jednostavna ako se imaju u vidu mesta njihove ugradnje, prostor između namotaja VN i NN gde je rasuti fluks najveći pa i mogućnost lokalnih pregrevanja najveća. Ukoliko se za njih koriste jednostavno limovi debljine od nekoliko milimetara to svakako vodi ka njihovom pregrevanju i oštećenju okolne izolacije, a kako to slike 1 i 2 jasno ilustruju. Kako bi se izbegle ovakve pojave prilaz rešavanja konstrukcije ovih ekrana morao je da bude sasvim drugačiji. Da bi se vrtložne struje u njima sve-

le na najmanju meru oni se moraju sastojati od traka mesinganog lima male debljine (folija), a što problem čini znatno složenijim. Izvođenje ovih ekrana je moguće od folija $\delta 0,1 \times 40$ mm, ili pak, tzv. lametta traka od mesinga.

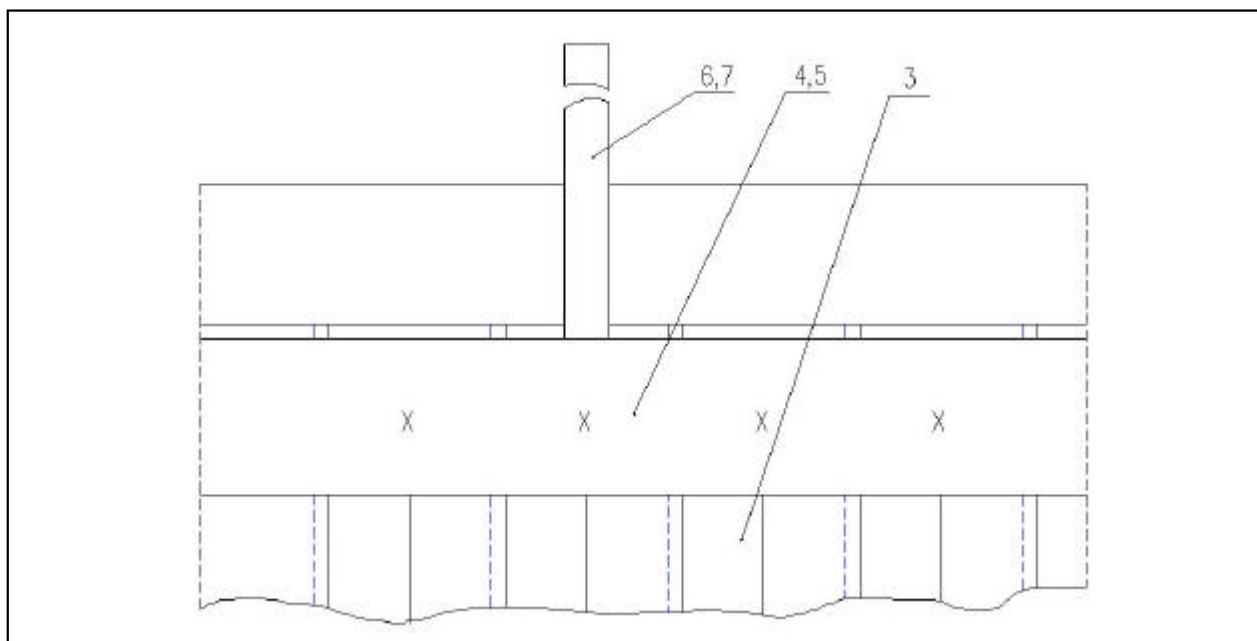
Na slici 3 je prikazan detalj izvođenja ekrana od mesinganih folija (lametta traka) kao i celulozna izolacija, kako između pojedinih traka, tako i prema namotaju NN. Objašnjenja oko upotrebljenog materijala su data u narednoj tabeli 1.

Sabirna traka (pozicija 4) je zalemljena za krajeve provodnih traka kao i za sabirnu traku (pozicija 5), a koja je zalemljena sa izvodima (pozicija 6 i 7) od

Osnovni materijali za elektrostatički ekran

Tabela 1.

Pozicija	Naziv	Materijal
1.	Izolacioni cilindar	Trafoboard TIV $\delta 4$; $\phi 1 486/1 494 \times 2 400$ mm
2.	Izolacioni cilindar	Natron papir $\delta 0,125$; $\phi 1 494/1 500 \times 2 520$ mm
3.	Provodna traka	Mesing 2x lametta traka $\delta 0,06 \times 20$ mm
4.	Sabirna traka	Mesing $\delta 0,1 \times 40 \times 2 395$ mm
5.	Sabirna traka	Mesing $\delta 0,1 \times 40 \times 4 715$ mm
6.	Izvod	Bakarna pletenica $3 \text{ mm}^2 / \text{PR}2$; 1 m
7.	Izvod	Bakarna pletenica $3 \text{ mm}^2 / \text{PR}2$; 0,5 m
8.	Izolaciona traka	Natron papir $\delta 0,125 \times 80 \times 2 395$ mm



Slika 4. Spajanje provodnih traka sa sabirnom i izvodom

bakarne pletenice. Preko je na kraju postavljen još spoljni izolacioni cilindar od natron papira, pošto je prethodno izolacioni cilindar (pozicija 2) preko ekrana oboren cepanjem pojedinih slojeva natron papira po metodu stvaranja ugaonih barijera od meke izolacije. Detalji povezivanja provodnih traka i sabirne trake, odnosno izvoda, su prikazani na slici 4.

Kao što je napred navedeno namotaj VN se nalazi u sredini, dakle, između dva polunamotaja NN. Osnovni podaci o njima su sledeći:

	NN1	VN	NN2
Broj zavojaka	24	547	26
Naziv struja	11 508	1 021	11 508
Unutrašnji prečnik	1 310	1 720	2 364
Spoljni prečnik	1 468	2 112	2 512
Visina	2 045	2 035	2 045
Tip	Spiralni	Interleaved	Spiralni

Ekrani su postavljeni uz same polunamotaje NN montažom preko vertikalnih odstoynika odnosno uz sam cilindar NN. Ekrani su visine 2 395 mm, tako da su preko namotaja $2\ 395 - 2\ 045 = 350$ mm, od čega je dole 65 mm, a sa gornje strane 285 mm.

Ovakvom dispozicijom je postignuto da se sabirna traka, koja je postavljena na samom vrhu ekrana, nalazi sa spojevima i izvodom za uzemljenje izvan nekog jačeg uticaja rasutog polja.

Ekrani su preko izvoda povezani za odgovarajuće elektrostatičke prstenove, a sa gornje strane su i uzemljeni.

Namotaji su odvojeni glavnom izolacijom koja se sastoji od uobičajenih izolacionih cilindara i ugaonih barijera koje su sa njima zajedno ukomponovane. Postavljeni su na sistem podmetača sa nosećim prstenovima, radi formiranja izolacione podloge, a na kraju, za formiranje kompletne faze kao i manipulisanje njome, sve je postavljeno na noseću podlogu od drveta.

Svakako bi bila od interesa provera temperature ekrana odnosno dokaz o njegovom neznatnom zagrevanju. U tom smislu bi na odgovarajućem modelu trebalo postaviti izvestan broj temperaturnih sondi na samoj izolaciji ekrana ka namotaju NN, na foliji i u uljnom kanalu iznad samog ekrana kako bi se mogla potvrditi zadovoljavajuća konstrukcija ekrana čiji bi gradijenti trebalo da budu u dopuštenim granicama prema ulju.

Isto tako, za merenje raspodele impulsnog napona, šest izvoda bi moglo biti izvedeno ka krajevima gore od određenog broja folija, u tri para. Dva para bi bila na susednim folijama, a treći par na prvom i poslednjoj foliji, da bi se merio napon nastao od zavojka oko jezgra zbog glavnog izvoda koji spaja folije zajedno. Razumljivo je da bi se za ovakva ispitivanja koristio repeticioni generator.

U narednom izlaganju će se termička valjanost ekrana pokazati računskim putem, dok će njegova efikasnost biti objašnjena korišćenjem nekih merenih rezultata na ekranima slične konstrukcije.

3. TERMIČKI PRORAČUNI

Razmotriće se folija od mesinga δ 0,1x40 mm, jer je ovo svakako najnepovoljniji slučaj, imajući u vidu da je ekran izrađen od lameta traka koje se sastoje od veoma tankih mesinganih žica (prečnika oko 0,06 mm) tako da su gubici u njima zanemarljivo mali. Isto tako će se posmatrati unutrašnji ekran NN1-VN, a tamo gde rezultati bitno odstupaju daće se komentar i za spoljni.

Poznato je da je glavni fluks u jezgru:

$$\phi = B_m \cdot S_{je} = 1,7 \times 1,1123193 = 1,8909 \text{ Wb} \quad (1)$$

gde su:

B_m - maksimalna indukcija u jezgru;

S_e - presek jezgra.

Ako se uzme da je napon kratkog spoja 13,5 %, fluks rasipanja će biti 0,255 3 Wb, a njegova gustina:

$$B = \frac{\Phi_y}{S_y} = \frac{0,2553}{1,1137} = 0,2292 \text{ T} \quad (2)$$

gde je

$$S_y = \left(\Delta + \frac{b_2 + b_l}{3} \right) (U_m = (12,6 + \frac{7,9 + 9,8}{3}) 191,6 \cdot \pi \cdot 10^{-4} = 1,1137 \text{ m}^2 \quad (3)$$

U poslednjem slučaju je:

Δ - razmak između VN-NN;

b_2 - širina namotaja NN;

b_l - širina namotaja VN (u našem slučaju je 1/2 njegove širine);

U_m - srednji obim namotaja.

Radialna komponenta magnetnog polja može se naći i korišćenjem sledeće relacije:

$$B_x = 0,2 \frac{I \cdot \omega}{h} \ln \frac{r_g}{r_d} \quad (4)$$

gde su:

$I \cdot \omega$ - broj amperzavojaka;

h - visina namotaja;

r_g, r_d - odstojanje posmatrane tačke.

Ako se posmatra sredina zavojka namotaja nižeg napona NN2, i zamenjujući vrednosti u gornjoj jednakosti, biće:

$$B_x = 0,2 \frac{11\,508 \times 24}{204,5} \ln \frac{200,5}{4} = 1057 \text{ gaussa,} \\ \text{ili } 0,1057 \text{ T.} \quad (5)$$

Za namotaje (u ovom slučaju za elektrostatički ekran) sa vertikalnim rashladnim površinama, čija je visina velika u poređenju sa širinom, dobija se, pri jednostranom iznosu za debljinu izolacije provodnika od δ (m), za gustinu odavanja toplote:

$$\frac{V}{F} = \frac{\theta}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_k}} \text{ W / m}^2 \quad (6)$$

Pritom je pretpostavljeno da je provodnik okružen uljem jednostrano ili dvostrano. Ako zamenimo koeficijent konvekcije $\alpha_k \approx 100 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ koji odgovara temperaturnom padu od oko 15 $^\circ\text{C}$, koeficijent provođenja toplote $\lambda = 0,25 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, i uzimajući za gubitke po jedinici površine 372 W / m^2 za gradijent ćemo imati:

$$\theta = \frac{V}{F} \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_k} \right) = 372 \left(\frac{0,007}{0,25} + \frac{1}{100} \right) = 14,1 \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (7)$$

Iz gore dobijenih rezultata se vidi da su se dobile zadovoljavajuće vrednosti iako je prilaz rešavanja problema mogao biti sasvim drugačiji. Dobijena odstupanja bi bila rezultat izbora određenih koeficijenata.

Ako se npr. radi o tronamotajnom transformatoru čiji se treći namotaj nalazi u sredini, tada se on, i kada nije opterećen, prožima rasutim poljem kada su druga dva namotaja opterećena. Za gubitke usled vrtložnih struja u tom namotaju može se pisati:

$$V_z = 1,3 \frac{G}{\rho \cdot \lambda} \left(\beta \frac{I \cdot \omega}{h} K \frac{f}{50} \right)^2 10^{-5} \text{ W.} \quad (8)$$

U gornjoj jednakosti je G masa u kg , r specifična otpornost, $\Omega \cdot mm^2 / m$, γ specifična gustina provodnika, β širina provodnika normalno na pravac polja rasutog fluksa u cm , i zamenjujući odgovarajuće vrednosti za foliju od mesinga dobija se:

$$V_z = 1,3 \frac{15,147}{0,0851 \cdot 8,6} (0,01 \frac{26 \cdot 11\,508}{204,5} 0,96)^2 \times \\ \times 10^{-5} = 5\,308 \times 10^{-5} \text{ W} \quad (9)$$

gde je masa G :

$$G = 8,6 \cdot 23,36 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} = 15,147 \text{ kg.} \quad (10)$$

Iz gornjeg primera se vidi da su gubici u foliji usled aksijalne komponente rasipnog polja zanemarljivo mali, a što je i razumljivo s obzirom na debljinu folije.

4. PRENOŠENJE IMPULSNIH PRENAPONA

Za svrhe ispitivanja prenošenja impulsnih napona koji nastaju u elektrostatičkom ekranu kao i u drugim namotajima nižeg napona, a kada se akcija dovodi na ulaz namotaja visokog napona, može se koristiti mali repeticioni generator impulsa.

Elektrostatički ekrani su sa gornje strane povezani sa elektostatičkim prstenovima i dalje uzemljeni. Radi razmatranja prenošenja prenapona u njima treba posmatrati susedne folije, kao napr. par 1 i 2, ili drugi par susednih folija 3 i 4, i na kraju 5 i 6 koje predstavljaju prvu i poslednju foliju ekrana, tako da se između njih indukuje napon jednog zavojka. Akcija se može dovesti na ulaz ili izlaz namotaja VN ili NN, pri čemu bi preostala tri bila uzemljena. Ovakav se eksperiment izvodi sa punim talasom, sečenim talasom, a izuzetno retko (prema NEMA standardima, EBASCO specifikacijama) sa strmim čelom. Razumljivo je da se ovakav eksperiment može izvesti samo na gotovom transformatoru ili na modelu, te će u narednom izlaganju biti navedeni rezultati istraživanja na modelima sa sličnim dispozicijama.

Prilikom dovođenja akcije određenog oblika dobija se napon prema masi približno iste vrednosti za bilo koju foliju elektrostatičkog ekrana. Isto tako do skoro istih se rezultata dolazi ako se akcija dovodi na početak ili kraj namotaja, bilo kada se radi o namotaju VN ili NN. Došlo se do sledećih rezultata:

Budući da je stvarni dovedeni impulsni napon na VN daleko veći od onog na niskonaponskoj strani to se i razmatra akcija sa te strane. Isto tako, s obzirom da se kod nas ne primenjuje talas strmog čela, posmatraće se sečeni talas doveden na VN.

	Napon folije prema masi, %	
Oblik impulsnog napona	VN	NN
Puni talas	3,0	11,8
Sečeni talas	4,4	11,5
Talas strmog čela	15,0	23,5

Pošto se radi o 400 kV nazivnom naponu sečeni talas je $1\,425\text{ kV}$, ili napon na ekranu bi prema masi bio $0,044 \times 1\,425 = 62,7\text{ kV}$.

Naponi između sušenih folija su zanemarljivo mali pri direktnim merenjima. Kod analiza napona prema masi i nalaženjem njihovih razlika došlo se do rezultata da su oni manji od 0,3 % od dovedenog napona. Za sečeni talas na strani VN ovi naponi bi bili manji od $0,003 \times 1\,425 = 4,275\text{ kV}$.

Napon između prve i poslednje folije- 5 i 6 kod dovedenog sečenog talasa na strani VN može se

očekivati manji od 0,3 %, ali će se razmatrati strožiji kriterijum kao za talas sa strmim čelom kada je on oko 1,5 %, a što bi iznelo $0,015 \times 1\,425 = 21,375\text{ kV}$.

Svrha elektrostatičkog ekrana je da zaštiti namotaj NN od prenošenja prelaznih prenapona sa VN strane. Njegova efikasnost se može proveriti tako što se krajevi namotaja VN kratko spoje i tu dovodi akcija prema zemlji, a meri se struja odvođenja na strani namotaja NN čiji su krajevi isto tako kratko spojeni i uzemljeni. Ovo ispitivanje se izvodi sa neuzemljenim ekranom, i onda uzemljenim. Kada nije uzemljen, ekran prima neki potencijal između VN i NN, i budući da struja teče ka namotaju NN i ka zemlji, ovo približno simulira uslove kada je ekran uklonjen. Struja uzemljenja namotaja NN sa uzemljenim ekranom treba da bude manja od 10 % struje kada je plivajući ekran.

Budući da je učestanost znatno veća od 50 Hz, impedansa uzemljenja ekrana će porasti, i pri nekoj frekvenciji kolo će biti rezonantno a ekran neefikasan. Sasvim je nesumnjivo da ekran treba da bude efikasan, pri uobičajenim impulsnim naponima, za napred opisani opit.

Isto tako treba imati u vidu da impedansa uzemljenja može imati znatnog uticaja, s obzirom na kapacitet ekrana prema namotaju NN koji može da iznese i više hiljada pF, tako da vremenska konstanta tada naraste reda mikrosekunde, a što svakako treba izbeći.

5. PREDLOŽENA KONSTRUKCIJA

S obzirom na veliko prihvatanje i odvođenje impulsnih prenapona od strane ekrana, postalo je neophodno da se izvrši gradacija naprezanja prema masi sa gornje i donje strane ekrana. Stoga su na tim mestima ugrađeni statički prstenovi, kako bi oblikovali polje i naprezanje izolacije bilo ravnomernije. U toku montaže, ekran se sa gornje strane povezuje za statički prsten, a ovaj dalje sa što kraćom vezom za masu. Korišćenje jednog sabirnog voda sa donje strane nije preporučljivo, pošto bi to moglo da rezultira znatnim cirkulacionim strujama između različitih folija, ukoliko rasuti fluks nije simetričan sa gornje i donje strane.

Za izolaciju između prve i poslednje folije, gde smo pretpostavili napon ne veći od 21,375 kV, predviđen je trafoboard od $\delta 1,5\text{ mm}$ i natron papir naslage 1 mm, koji se na krajevima povija, tako da je osigurano i od kliznih napona sa gornje i donje strane. Između parova susednih folija ekrana tranzitni napon je zanemarljivo mali, ili u najgorem slučaju 4,275 kV, a što u ovom slučaju natron papir $\delta 0,125\text{ mm}$ i na datom rastojanju sasvim zadovoljava.

Elektrostatički ekran je izolovan naslagom natron papira od 3 mm jednostrano sa obe strane, a prema namotaju NN izolovan je i cilindrom od trafoboarda debljine δ 4 mm, što u potpunosti zadovoljava za njegov naponski nivo. Sa ovim obimom izolacije ekran ne pokazuje nikakve nagoveštaje pregrevanja, odnosno bilo kakvo zatamnjenje folije ili neposredne izolacije. Pored toga, ekran je izveden sa lametama trakama, a što još više umanjuje gubitke usled vrtložnih struja, dakle, bilo kakvo zagrevanje gotovo da je anulirano.

6. ZAKLJUČAK

Kako bi se sprečilo da prenaponi impulsne prirode budu preneseni sa strane VN, na niskonaponsku stranu između namotaja VN i NN se postavljaju elektrostatički ekrani. Budući da se nalaze u glavnom rasutom polju, njima preti opasnost da budu pregrevani usled prekomernih vrtložnih struja, te se njihovom dimenzionisanju mora posvetiti posebna pažnja. Ukoliko se izvode iz ploča od provodnog lima kao što je to bio slučaj kod blok transformatora 725 MVA, onda to dovodi do takvog njihovog pregrevanja da dolazi do pregorevanja i samog lima, a što svakako oštećuje i celokupnu okolnu izolaciju.

Elektrostatički ekrani se moraju izvesti u obliku traka određene maksimalne širine i debljine kako bi se vrtložne struje u njima svele na najmanju meru, pa prema tome i njihovo zagrevanje. To se može postići upotrebom traka od mesinga δ 0,1 × 40 mm max., a za ove svrhe se često koriste i folije debljine oko 0,06 mm, ili lametama trake u kojima su gubici usled vrtložnih struja svedeni na minimum.

Povezivanje provodnih traka ekrana se izvodi pomoću bakarne pletenice ili druge mesingane trake lemljenjem, a njihova lokacija je izvan nekog jačeg dejstva rasutog fluksa, čime se izbegava njihovo pregrevanje. Na ovaj način se postiže dobra veza sa uzemljenim delovima, koja se ostvaruje samo sa jedne strane, jer ako bi se to ostvarivalo sa obe strane pretila bi opasnost od cirkulacionih struja usled nesimetrije rasutog polja.

Izolovanost između pojedinih traka, kao i između krajeva ekrana koji predstavljaju jedan zavojak, izvodi se za najteže uslove kod prelaznih pojava, dakle, kod prenošenja prilikom ispitivanja punim i sečenim talasom, a u najstrožijim uslovima i kod talasa sa strmim čelom.

Kako bi se umanjili gradijenti, sa obe strane ekrana (gore i dole) se postavljaju statički prstenovi koji su oblikovani prema ostalim delovima pod naponom ili prema masi i za koje su povezani ekrani. Veze ekrana sa masom treba da budu što kraće kako bi se izbegle oscilatorne, rezonantne pojave, jer bi u tom slučaju ekran bio neefikasan.

7. LITERATURA

- [1] E. Jeziarski: TRANSFORMATORY, PODSTAWY TEORETYCZNE, NT Warszawa
- [2] R. Kuechler: DIE TRANSFORMATOREN, GRUNDLAGEN FUER IHRE BERECHNUNG UND KONSTRUKTION, SPRINGER- VERLAG, Berlin/ Goettingen/ Heidelberg 1956

Rad je primljen u uredništvo 06. 09. 2001. godine

*Branko Milosavljević,
Radmilo Antić, Branko Maoduš, Miodrag Petrović*

Oklopljene generatorske sabirnice Održavanje i kvarovi u eksploataciji

Stručni rad
UDK: 621.314,14; 621.311.216; 679.743,4

Rezime:

Oklopljene generatorske sabirnice između blok-transformatora i transformatora za sopstvenu potrošnju moraju biti uzemljene i električno izolovane od kazana blok-transformatora, transformatora za sopstvenu potrošnju i ostale opreme.

Način uzemljavanja, rastavljanja i izolacije oklopa, a posebno kvalitet i kontrola ovoga sistema od velike su važnosti u daljoj eksploataciji.

U referatu se prikazuju osobine sabirnica izvedenih oklopljenim šinskim vezama i njihovi odgovarajući parametri. Opisuje se jedan pogonski događaj vezan za delovanje kućišne zaštite blok-transformatora u TENT B, rezimira analiza poremećaja i pokazuju izvedena merenja i popravke.

Ključne reči: oklopljene šinske veze, uzemljenje oklopa kućišta, kućišna zaštita blok-transformatora

Abstract:

ARMoured GENERATOR BUS-BARS OVERHAULING AND FAULTS DURING OPERATION

Armoured generator bus-bars between block-transformer and transformer for own consumption must be earthed and electrically isolated from block - transformer boiler, transformer for own consumption and other equipment.

Mode of earthing, disconnecting and isolating the armour, and particularly the quality and control of this system are of great importance for further exploitation.

The paper deals with features of bus-bars derived by armoured rail connections and their corresponding parameters. An operating event is described, in connection with the effect of casing protection of block transformer in Thermal Power Plant Nikola Tesla B and the paper also deals with analysis of disturbances and shows performed measurements and repairs.

Key words: armoured rail connections, armoured casing earthing, casing protection of block-transformer

Branko Milosavljević, dipl. el. ing. - JP "Elektroprivreda Srbije", 11000 Beograd, Vojvode Stepe 412

Radmilo Antić, dipl. el. ing. - "EPS" JP "Elektroistok", 11000 Beograd, Kneza Miloša 11

Branko Maoduš, dipl. el. ing. - "EPS" JP TE "Nikola Tesla", 11500 Obrenovac, Bogoljuba Uroševića Crnog bb

Miodrag Petrović, dipl. el. ing. - "EPS" JP "Elektroistok", 11000 Beograd, Kneza Miloša 11

1. OSNOVNI PARAMETRI OKLOPLJENIH SABIRNICA 21 kV

Za vezu generatora sa blok-transformatorom i transformatorom sopstvene potrošnje (SP) predviđene su oklopljene aluminiјumske šinske veze 21 kV naznačene struje 22 000 A. Oklopljene šinske veze su realizovane koaksijalnim visokoprovodnim cevima, čiji su podaci dati u dodatku,

Vrednosti parametara kratkog spoja su:
šinska veza generator - blok transformator

– udeo mreže $P_k = 5\,845$ MVA, $I_k = 161$ kA
 $I_{ud} = 409$ kA

– udeo generatora $P_k = 3\,595$ MVA, $I_k = 99$ kA,
 $I_{ud} = 280$ kA

– otečna veza prema transformatoru sopstvene potrošnje bloka $P_k = 9\,940$ MVA $I_k = 260$ kA,
 $I_{ud} 689$ kA

Efektivne vrednosti jednosekundne struje kratkog spoja:

– veza generator-blok transformator = 170 kA

– otečne veze = 265 kA

Prečnik Al provodnika

– veza generator-blok transformator 850/818 mm

– otečne veze 150/135 mm

Prečnik Al oklopa

– veza generator-blok transformator 1 420/1 404 mm

– otečne veze 720/708 mm

Izolacioni nosači provodnika su od epoxy-smole, a same šine su pod natp pritiskom, što se obezbeđuje posebnom instalacijom. U oklopljene šinske veze ugrađen je generatorski prekidač.

2. UZEMLJENJE OKLOPA ŠINSKIH VEZA

U cilju zaštite od previsokog napona dodira izvedeno je uzemljenje cevi oklopa i metalne konstrukcije. Sistem oklopa šinskih veza je izolacionim odvojcima podeljen na uzemljivačke segmente. Svaki segment je na krajevima kratko spojen kratko spoјivom prečagom i na jednom mestu povezan bakarnim užetom 95 mm^2 sa uzemljivačem; oklopi i metalna kućišta u kojima su smešteni izvodi provodnih izolatora električnih aparata (generatori, transformatori i ost.), galvanski su spoјeni sa kućištem pripadajućeg uređaja.

Kazani blok-transformatora i transformatora sopstvene potrošnje su uzemljeni preko odgovarajućih mernih strujnih transformatora, koji služe za realizaciju kućišne zaštite transformatora.

3. OPIS POGONSKOG DOGAĐAJA USLOVLJENOG PRORADOM KUĆIŠNE ZAŠTITE

Dana 20. 7. 1998. godine u normalnom pogonu elektrane "TENT B", dok je blok B1 radio snagom od 500 MW i 250 MV Ar, na blok transformatoru 1 AT je delovala kućišna zaštita IBX 164 i, u skladu sa postupkom predviđenim za takve slučajeve, automatski je došlo do:

1. isključenja 400 kV prekidača u RP elektrane, isključenja prekidača pobude i razbuđivanje generatora;
2. isključenja 6,5 kV prekidača, dovoda sa transformatora 1BT na 6,6 kV postrojenja 1BA i 1BB i delovanja preklopne automatike 6,6 kV kojim je napajanje sopstvene potrošnje bloka prebačeno na opštu grupu;
3. isključenja turbine zatvaranjem stop ventila;
4. isključenja generatorskog prekidača 21 kV i
5. svođenja rada kotla na minimum.

Po ispadu bloka odmah je izvršena vizuelna kontrola transformatora i konstatovano da na njemu nema vidnih znakova i posledica bilo kakvog nenormalnog stanja. Pregledom elemenata zaštite konstatovano je da nijedna druga električna zaštita transformatora nije bila pobuđena.

Na osnovu iznetih činjenica, zaključeno je da na blok transformatoru 1AT ne postoji kvar; da se, iako razlog delovanja kućišne zaštite nije utvrđen, transformator može staviti pod napon. U skladu sa postupkom "TENT B" o blokiranju zaštite, izvršeno je blokiranje kućišne zaštite transformatora u pogledu isključenja, a njena eventualna prorada aktivira signalizaciju. Smenskom osoblju su data dodatna uputstva, u cilju pojačanog nadzora opreme i odgovarajućeg reagovanja pri eventualnoj pojavi alarma prorade kućišne zaštite.

Stručne službe održavanja elektrane i "Elektroistoka" iz Beograda, su odmah izvršile kontrolna merenja u krugovima diferencijalne zaštite blok transformatora 1AT i diferencijalne zaštite bloka u pogonskim uslovima i u uslovima "kvara" odnosno prorade kućišne zaštite (isključenje blokirano). Na osnovu merenja nisu zapažena neka veća odstupanja od normalnih vrednosti, što bi ukazivalo na ugroženost rada blok transformatora. Takođe, pri pojavi signala prorade kućišne zaštite situacija u kolima diferencijalne zaštite se nije bitno promenila, odnosno odnosi diferencijalnih struja su ostali približno isti. Takođe se i vrednost struja u zemljovodnom provodniku zvezdišta visokonaponske strane blok-transformatora nije promenila. Pri tome je vrednost struje kroz strujni transformator kućišne zaštite blok-transformatora varirala između 150-250 A. Rezultati gasno-hromatografske kon-

trole ulja blok-transformatora nisu pokazali da se u blok-transformatoru događaju neke nenormalne pojave. Na osnovu svega ovoga, izveden je zaključak da nije ugrožena pogonska sigurnost blok transformatora 1AT i da blok B1 može da ostane i dalje u pogonu. Znači, da je kvar sada trebalo tražiti na sistemu uzemljenja oklopljenih sabirnica 21 kV.

U cilju sagledavanja ove problematike biće prikazani biti fenomeni i efekti u sistemu šinskih veza.

4. ELEKTRIČNE STRUJE I MAGNETNA POLJA ŠINSKIH VEZA

Kao što je navedeno, oklopljene šinske veze su realizovane koaksijalnim visokoprovodnim cevima čiji je prostorni raspored simetričan u odnosu na vertikalne ravni koje prolaze osom srednje faze (šine). Saglasno ovome i magnetna polja uslovljena strujama koje protiču visokoprovodnim cevima provodnika (šina), kao i oklopa, zavise od ovih struja i slede ovu simetriju.

Magnetno polje u okolnom prostoru (van koaksijalnih cevi oklopa) će zavisiti od algebarskog zbira struja faza i struja korespondentnih oklopa, kao i prostornog rasporeda sistema koaksijalnih cevi.

Sistem visokoprovodnih koaksijalnih cevi faznih provodnika i oklopa je međusobno indukciono spregnut, te se, pri proticanju faznih struja, indukuju podužne EMS u cevima oklopa. Cevi oklopa šinskih veza su, po pravilu, na krajevima uzemljivačkih segmenata (obostrano) međusobno efikasno kratko spojeni metalnim prečagama velikog preseka (kratkospojive prečage).

Obostrano kratkospojen trofazni sistem oklopnih cevi se, stoga, ponaša kao kratkospojeni sekundar trofaznog transformatora čiji primar predstavljaju cevi faznih provodnika. Ovaj "trofazni" transformator je, međutim, u opštem stanju nesimetričan usled različite međusobne induktivnosti među cevima s jedne strane, a i zbog međusobne nejednakosti omskog otpora na mestima povezivanja cevi oklopa, s druge strane.

Struje u oklopima će biti praktički suprotne i približno jednake strujama korespondentnih faznih provodnika, pa će njihov algebarski zbir imati relativno malu vrednost, što će imati za posledicu relativno slaba magnetna polja u okolnom prostoru.

Treba imati na umu da algebarski zbrovi struja međusobno mogu da se značajno razlikuju i pored praktičke jednakosti faznih struja, zbog navedene nesimetrije, što ima za posledicu nesimetričnost magnetnog polja u spoljnom prostoru.

U okolini jednostrano kratkospojenih segmenata, kao npr. u okolini segmenta blok-transformatora, gde je kratko spajanje izvedeno preko tran-

sformatorskog suda, javljaju se u okolini sabirnica mnogostruko jača magnetna polja nego kod obostrano kratkospojenih, pošto kroz cevi okolopa (lula) ne teku "povratne" struje. Ova jaka magnetna polja uslovljavaju indukovanje značajnih EMS u konturama u čiji sastav eventualno uđe ovaj uzemljivački segment (lula) ili se deo konture nađe u neposrednoj okolini ovog segmenta.

5. ELEKTRODINAMIČKA I TERMIČKA DEJSTVA NA UZEMLJIVAČKE SEGMENTE

U slučaju pojave prekomernih struja, bilo usled kratkih spojeva, bilo usled loše ili pogrešne sinhronizacije, dolazi do višestrukog pojačanja magnetnih polja i mnogostrukog povećanja elektrodinamičkih sila i momenata koji mogu mehanički ugroziti sistem šinskih veza.

Elektrodinamičko dejstvo na segment bitno zavisi od toga da li je sistem cevi oklopa jednostrano ili obostrano kratko spojen.

Elektrodinamičko dejstvo na obostrano kratkospojene cevi oklopa će se manifestovati ekspanzionim pritiskom na cev oklopa, a implozionim pritiskom na cev provodnika. Pojava lateralnih sila i momenata će, po pravilu, biti mali i neće ugrožavati mehaničku stabilnost segmenta.

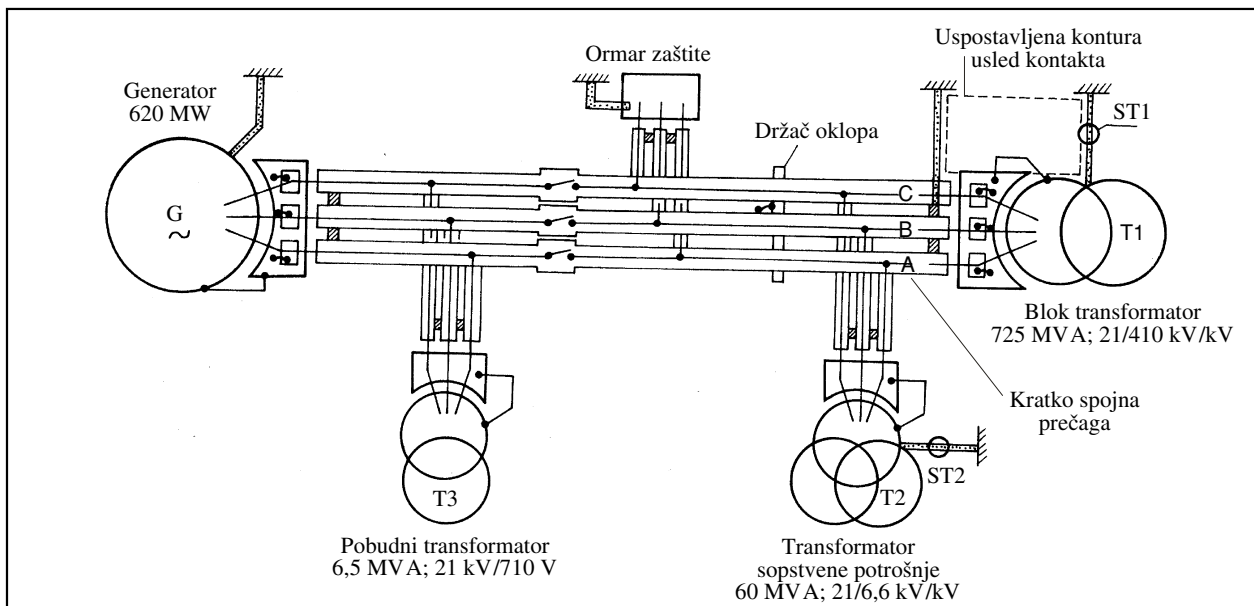
Elektrodinamičko dejstvo na jednostrano kratko spojen segment će se manifestovati velikim lateralnim silama u ravni koja prolazi kroz ose šinskih veza, težeći da ih razmakne, i odgovarajućim momentima sila na oslonce cevi provodnika i oklopa. Termičko dejstvo na šinske veze i predmete u njihovoj okolini će biti, u grubom, srazmerno kvadratu jačine struja po cevima provodnika i otklopa i kvadratu jačine magnetnih polja koja prožimaju predmete od provodnog materijala u okolnom prostoru. Ovo će se manifestovati njihovim zagrevanjem i uslovljavati gubitke snage i energije.

6. KVALITATIVNA ANALIZA POJAVE DELOVANJA KUĆIŠNE ZAŠTITE

Kod opisanog pogonskog događaja okarakterisanog delovanjem kućišne zaštite blok-transformatora je došlo do formiranja konture, u čiji sastav su ušli: sud blok-transformatora - oklopne cevi (lule) do prvog rastavnog mesta - uzemljivačko uže od metalnog kratkospojnika iza rastavnog mesta - ostatak uzemljivačkog sistema - strujni transformator - kućište blok-transformatora.

Zatvaranje konture je ostvareno kratkim spajanjem prvog rastavnog mesta na jednoj fazi.

Kao što je napred opisano, u cevima oklopa (lulama), od transformatorskog suda do prvog rastavnog mesta, u normalnom pogonu se javljaju značajne indukovane EMS. Kratkim spajanjem ce-



Slika 1. Principijelna šema uzemljenja oklopljenih sabirnica 21 kV

vi oklopa jedne faze (u našem slučaju faze "C" sa odgovarajućom lulom transformatora) je, pod uticajem ove EMS, uspostavljena struja po konturi, u čiji sastav je ušao i strujni transformator kućišne zaštite i pobudila ovu zaštitu.

Pored ovoga je u isto vreme došlo i do formiranja konture premoštavanjem cevi oklopa prema protivpožarnoj instalaciji ispred rastavnog mesta transformatora sopstvene potrošnje, čime je, u stvari, došlo do formiranja nove konture uslovljene premeštanjem prvog rastavnog mesta.

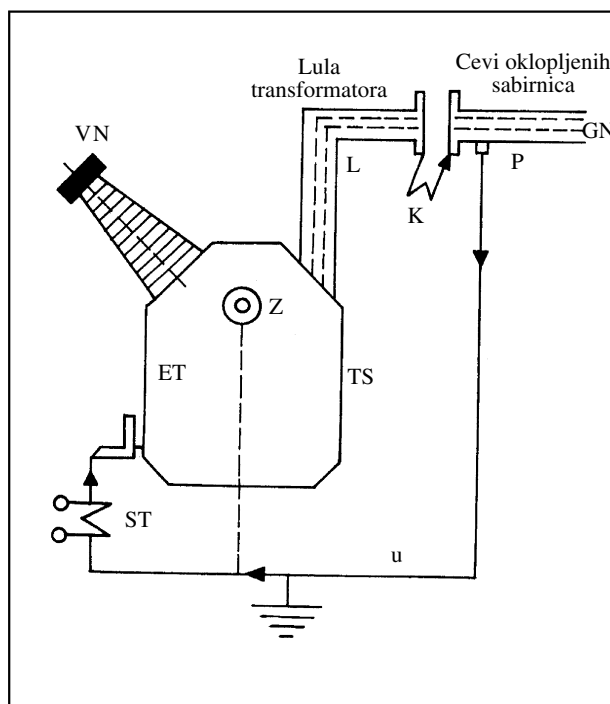
7. PRIKAZ IZVEDENIH PROVERA, MERENJA I POPRAVKI

U cilju potpunijeg razjašnjenja ovog događaja, u dva navrata su vršena detaljna merenja napona i struja na odabranim elementima oklopa šinskih veza i uzemljivača, i provere simulacijom zatvaranja kontura premoštavanjem rastavnih mesta.

Izmereni su naponi na rastavnim mestima blok-transformator - oklopi šinskih veza prema generatoru; transformator SP - oklopi šinskih veza prema generatoru; "međufazni" naponi na strani blok-transformatora uz rastavno mesto i naponi na strani šinskih veza kod transformatora SP.

Izmerene su struje zvezdišta blok-transformatora, struja transformatora kućišne zaštite oba transformatora i struje koje protiču kroz užad za uzemljenje.

Ove struje su merene pri premoštavanju rastavnih mesta sukcesivno kod blok-transformatora i kod transformatora SP, kao i pri pojavi jednovremenog premoštavanja kod blok transformatora i



Slika 2. Ilustracija uzroka opisanog pogonskog događaja

- ET – energetska transformator
- L – lula transformatora
- P – kratkospojna prečaga
- GN – oklopljene šinske veze prema generatoru
- Z – zvezdište transformatora
- ST – strujni transformator kućišta zaštite
- VN – visokonaponski provodni izolatori
- TS – transformatorski sud
- K – mesto poremošćenja
- u – uzemljivačka užad

oklopa sa instalacijom PPZ transformatora SP. Zbog opsežnosti rezultata merenja, nismo u mogućnosti da ih ovde prikazemo.

Na osnovu merenja obavljenih na instalaciji uzemljenja oklopnih sabirnica 21 kV i kućišta transformatora sa priključnim delom oklopljenih sabirnica 21 kV pre simulacija "kvara", kao i merenja obavljenih pri simulaciji "kvara" premoštenjem izolacionih umetaka, utvrđeno je da povremeno dolazi do spoja priključnog dela oklopljenih sabirnica sa 21 kV na transformatoru sa oklopljenom sabirnicom 21 kV faza "C".

Takođe je utvrđeno da dolazi do premoštavanja oklopa sabirnica 21 kV sa nosećom konstrukcijom cevnog sistema protivpožarne instalacije transformatora sopstvene potrošnje 1 BT.

8. ZAKLJUČAK

Osnovni zaključak koji proističe iz ovih merenja je da međusobno spajanje - efikasno premošćenje nekog rastavnog mesta između transformatora i šinskih veza može usloviti proradu kućišne zaštite.

Međusobnim izolovanjem ova dva sistema jedno od drugog, ubacivanjem izolacionog umetka, eliminisan je jedan od uzroka prorade kućišne zaštite. A navedeno povremeno premošćenje između kućišta transformatora 1 AT i pravolinijskog dela oklopljenih sabirnica sa 21 kV u fazi "C", otklonjeno je pri prvom zastoju bloka jednostavnim pomeranjem cevljog transformatora za nekoliko centimetara.

Rad je primljen u uredništvo 06.09.2001. godine

Uticaj promene kvaliteta uglja na rad kotla i pomoćne opreme

Stručni rad
UDK: 622.3

Rezime:

U radu je opisan uticaj promene osnovnih karakteristika goriva na osnovnu i pomoćnu opremu bloka kao i uticaj određenih karakteristika na zaštitu životne sredine.

Uspešnost u projektovanju i kasnije u eksploataciji i održavanju kotlovskog postrojenja i pomoćnih sistema umnogome zavise od dobrog poznavanja navedenih karakteristika goriva i granica njihove promene. Što su granice uže, to su rešenja jednostavnija i kompaktnija, problemi u eksploataciji manji, manje oscilacije radnih parametara, veća efikasnost, raspoloživost i ekonomičnost rada.

Smanjenje varijacije parametara uglja ima pozitivne efekte i na zaštitu životne sredine, jer široki opsezi pojedinih parametara uglja otežavaju projektovanje, a kasnije i optimalni rad sistema, u smislu zaštite životne sredine od štetnih uticaja.

Ključne reči: karakteristike uglja, kotao, zaštita okoline

Abstract:

**INFLUENCE OF THE CHANGED PROPERTIES OF COAL
ON THE BOILER AND AUXILIARY PLANT OPERATION**

The paper deals with the influence of the change in coal properties on the operation of the boiler plant and auxiliary equipment. It also explains how some changes in the properties of coal can influence the efficiency of environmental control.

Successful design and operation of the boiler plant and auxiliary systems of a unit greatly depend on the good knowledge of the properties of fuel burning in the boiler and the limits of their changes. The narrower the limits, the simpler and the better the design solutions can be achieved and the fewer problems in the plant operation to be expected, i.e., fewer oscillations in the operation data, higher efficiency, availability and profitability of plant operation.

Fewer oscillations in coal properties, also have positive effects on the environmental control. Wide range of changes not only make the design work more difficult but also have an adverse effect on the optimum operation of the system and consequently on the environmental control achievements.

Key words: coal characteristics, boiler, environmental protection

1. UTICAJ PROMENE KARAKTERISTIKA UGLJA NA OSNOVNU I POMOĆNU OPREMU TERMOELEKTRANE

Osnovni podaci pri projektovanju parnog kotla odnose se na gorivo koje će sagorevati u njemu. Karakteristike goriva imaju uticaj na sledeće delove kotlovske postrojenja: opremu za dopremu uglja, pripremu ugljenog praha, ložište, grejne površine, opremu za regeneraciju toplote, opremu za prečišćavanje dimnih gasova, opremu za odvođenje pepela i šljake itd.

Glavne karakteristike goriva koje utiču na konstrukciju kotla i pomoćne opreme su pre svega: vrsta uglja, donja toplotna moć, sadržaj vlage, sadržaj pepela i njegove karakteristike, sadržaj sumpora, sadržaj volatila, meljivost uglja itd.

Uticaj promene svake od navedenih karakteristika na osnovnu i pomoćnu opremu termoelektrane se može u kratkim crtama opisati na sledeći način:

Donja toplotna moć predstavlja karakteristiku koja je u direktnoj vezi sa količinom goriva koju treba sagoreti u kotlu, u cilju postizanja projektnih parametara pare. S tim u vezi, ona predstavlja i osnovni podatak koji definiše tip kotla i njegove dimenzije, zapreminu ložišta i toplotno opterećenje, kapacitete postrojenja za dopremu uglja i kapacitete bunkera za ugalj, kapacitete mlinova i ventilatora i drugih pomoćnih postrojenja.

Saglasno izloženom, što su granice promene kvaliteta goriva šire, to je zadatak koji se postavlja pred projektantom kotla složeniji i veći, a rešenja su u takvim slučajevima komplikovanija i skuplja.

Sadržaj vlage, u poređenju sa drugim karakteristikama, uslovljava najveće teškoće pri projektovanju kotlova. Uticaj vlažnosti na rad kotla je mnogostruk. Povećana vlažnost otežava transport goriva do mlinova i njegovo mlevenje. Posebne teškoće se javljaju u zimskom periodu na bunkerima uglja i dodavačima, izražene kroz lepljenje i zasvodnjavanje. Snižena vlažnost u letnjem periodu sa druge strane ima za posledicu otežano održavanje temperature aero-smeše na izlazu iz mlinova. Kod zatvorenih sistema pripreme ugljenog praha, vlažnost snižava temperaturni nivo u ložištu, povećavajući zapreminu produkata sagorevanja. Vlažnost uglja utiče na raspodelu primljene toplote između radijacionih i konvektivnih grejnih površina, na brzinu produkata sagorevanja u konvektivnim kanalima, na gubitke toplote sa izlaznim gasovima, na hidraulički otpor kanala i gubitak energije za pogon ventilatora dimnih gasova.

Sa povećanjem vlažnosti goriva povećava se i parcijalni pritisak vodene pare u produktima sagorevanja, usled čega se povećava temperatura tačke rose i pri sadržaju sumpora u gorivu se uslovljava

borba protiv niskotemperaturske korozije primarnog stepena zagrevača vazduha.

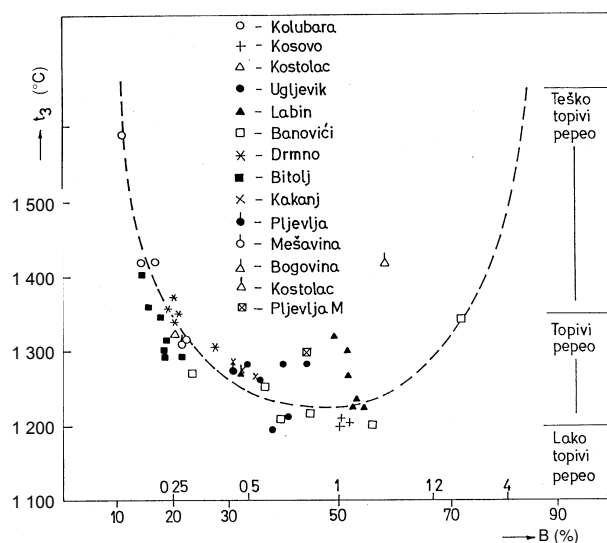
Pri projektovanju kotlova, ložišta i sistema za pripremu ugljenog praha, pored srednjih vrednosti vlažnosti uglja treba uzeti u obzir i sezonske promene, a takođe i promene sadržaja vlage u zavisnosti od konfiguracije ložišta.

Sadržaj pepela u gorivu značajno osciluje, kao što osciluje i njegov hemijski sastav. Uticaj mineralnih primesa u gorivu na rad kotla je višestruk. Ove primese mogu stvarati naslage na grejnim površinama kotla, u zavisnosti od temperature topljenja, viskoznosti i adhezionih karakteristika. Leteći pepeo, sa druge strane, može biti uzročnik abrazije, a takođe i visokotemperaturske korozije grejnih površina. Veliki uticaj na rad kotla pokazuje polazni mineralni sastav uglja, kao i fazne promene u ložišnom procesu.

Osnovnu karakteristiku mineralnog dela goriva predstavlja hemijski sastav. Za različite ugljeve on se menja u širokom dijapazonu – od visokog sadržaja SiO_2 i Al_2O_3 – kiseli pepeo, do baznog sastava sa visokim sadržajem CaO i MgO . Karakteristike za ocenu sklonosti ka zašljakivanju i prljanju pepelom iz goriva u procesu sagorevanja su uglavnom: temperatura topljivosti pepela, temperatura početka zašljakivanja, odnos bazni/kiseli oksidi i odnos gvožđe/kalcijum u pepelu kao i ukupni sadržaj kalcijuma, sumpora i alkalija u pepelu.

Na slici 1 prikazana je zavisnost temperature topljivosti pepela od baznog broja za različite vrste ugljeva [5].

Na osnovu temperatura topljivosti moguće je oceniti uslove stvaranja naslaga. Odnos između baznih i kiselih komponentata ukazuje na mogućnost

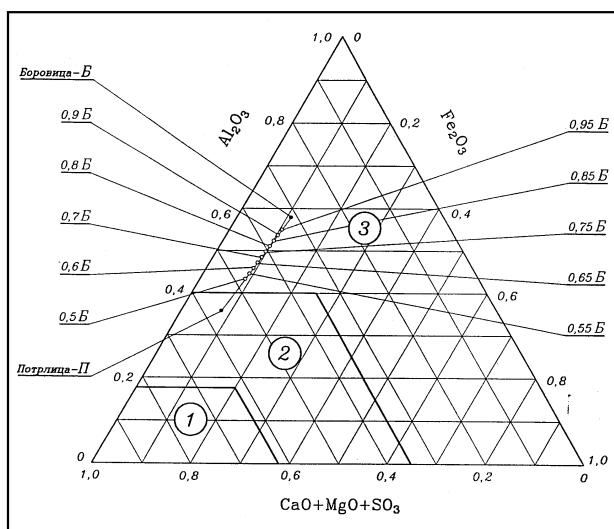


Slika 1. Zavisnost bazni broj – temperatura topljenja

nastanka eutektikuma koji, uglavnom, imaju nisku temperaturu topljenja i mogu da igraju važnu ulogu u nastanku naslaga. Alkalni materijali kao što su natrijum i kalijum, izuzetno ubrzavaju stvaranje naslaga i dobar su indikator sklonosti uglja ka stvaranju naslaga.

Pored toga, sadržaj i sastav pepela ima direktan uticaj na veličinu i kapacitet opreme za evakuaciju pepela i šljake iz levka ložišta kao i na sam izbor sistema za odvođenje pepela i šljake (suvi, vlažni itd.).

Na slici 2 prikazan je uticaj promene hemijskog sastava pepela na sklonost uglja iz rudnika Pljevlja ka stvaranju naslaga [6].



Slika 2. Altmanov trougao – uglalj Pljevlja

Sadržaj sumpora: Sumpor je sastavni deo praktično svih ugljeva, ali ne u velikom procentu. Sumpor negativno deluje na rad kotla. Pri projektovanju kotlova za sagorevanje uglja sa visokim sadržajem sumpora, treba obratiti posebnu pažnju. Prisustvo sumpornih oksida u dimnim gasovima znatno povećava temperaturu tačke rose vodene pare. Jedinjenja sumpora nastala u procesu sagorevanja goriva, izazivaju visokotemperatursku i niskotemperatursku koroziju cevnog sistema.

Meljivost uglja je karakteristika koja opisuje sposobnost uglja da se melje. Ona se često može izraziti kroz potrošnju energije za mlevenje uglja. Koeficijent meljivosti uglja se koristi pri određivanju kapaciteta mlinova i njegova dobra istraženost i granice promene su veoma bitne pri projektovanju mlina. Kod projektovanja mlina i prognoze veka udarnih tela mlina, važno je poznavati i abrazivnost uglja. Abrazivna svojstva ugljenog praha važno je poznavati i kod iznalaženja rešenja za sma-

njenje erozije kanala aero-smeše i gorionika ugljenog praha.

Ostale karakteristike: Pored osnovnih karakteristika uglja, za uspešno projektovanje kotla, primenom metoda matematičkog modeliranja, neophodno je poznavati i radijacione karakteristike čestica uglja, letećeg pepela i naslaga, toplotne moći volatila i temperature njihovog paljenja, čime se postiže veća tačnost proračuna i prognoza ponašanja kotla u realnim uslovima.

2. EKOLOŠKI ASPEKTI UTICAJA PROMENE KARAKTERISTIKA UGLJA

Uticaj termoenergetskog objekta na okolinu može, u velikoj meri, da zavisi od karakteristika korišćenog goriva, odnosno od količine i karakteristika produkata sagorevanja koji u ovom slučaju predstavljaju otpadne materije. Kada je u pitanju uglj, otpadne materije koje nastaju kao produkti sagorevanja i koje mogu štetno uticati na okolinu sadržane su u dimnim gasovima i čvrstom otpadu (pepeli i šljaci).

Parametri goriva koji utiču na sastav i količinu dimnih gasova su donja toplotna moć, sadržaj ukupnog sumpora u uglju i stepen vezivanja sumpora u pepelu, kao i sadržaj pepela u uglju. Količina nastalog čvrstog otpada prvenstveno zavisi od sadržaja pepela u uglju.

Emisija ovih otpadnih materija u okolinu zavisi od primenjenih tehničkih mera zaštite, a to su:

- sistem za otprašivanje dimnih gasova,
- sistem za smanjenje emisije sumpornih oksida,
- sistem za smanjenje emisije azotnih oksida,
- sistem za transport i odlaganje pepela.

Kod elektrana na uglj otprašivanje dimnih gasova se vrši u elektrofiltarskim postrojenjima. Rad ovih sistema direktno zavisi od karakteristika uglja i rada kotla, koji određuju i karakteristike dimnih gasova (količinu, sastav, temperaturu), tako da su moguće znatne varijacije u izlaznim koncentracijama čestica ukoliko u toku eksploatacije TE dolazi do promena kvaliteta uglja. Zbog toga se u dosadašnjoj praksi dešavalo da elektrofiltari rade sa parametrima koji su znatno ispod projektnih vrednosti, čemu je uzrok nepravilno definisanje tzv. projektnog uglja. Jedan očišćen primer za to su elektrofiltari blokova A1 i A2 TE Nikola Tesla, koji u eksploataciji postižu efikasnosti oko 95 %, što je znatno ispod njihove projektno vrednosti (98,5 %).

Uticaj kvaliteta uglja na izlazne koncentracije čestica u dimnom gasu može se ilustrovati na primeru definisanja projektnih parametara za rekonstrukciju elektrofiltarskih postrojenja blokova A1 i A2 TE Nikola Tesla [7]. Naime, primenjena metodologija izbora „projektnog uglja” zasniva se na

Tabela 1.

Prikaz rezultata proračuna izlaznih koncentracija čestica za pojedine blokove TE, mg/m^3

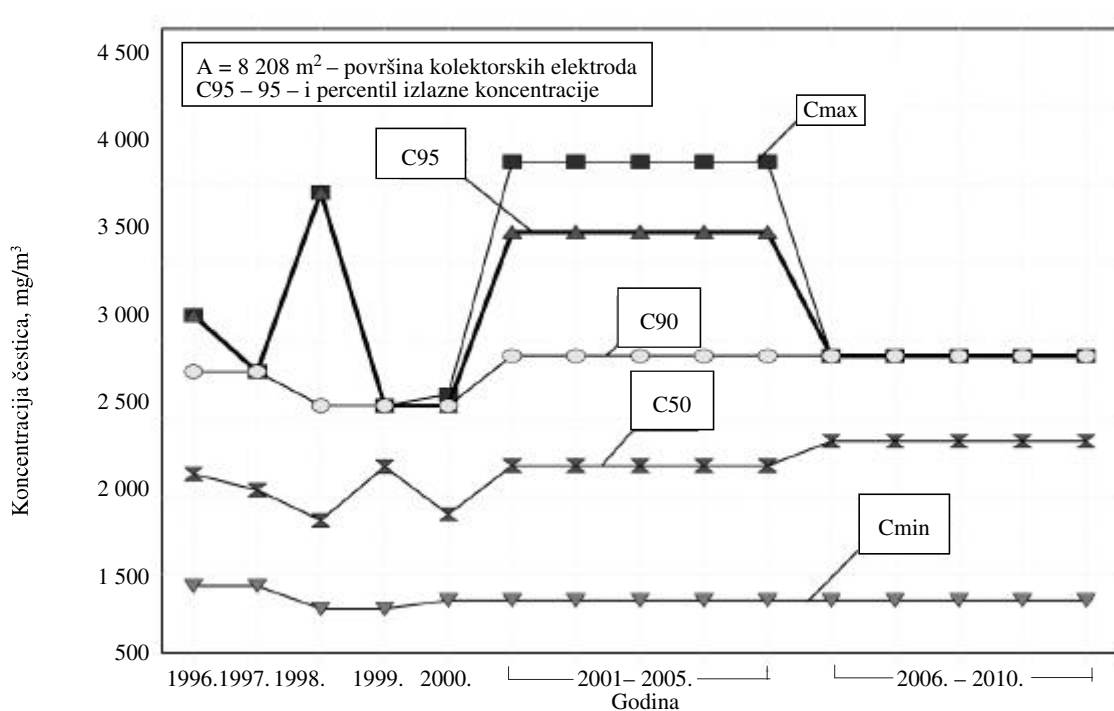
Termoelektrana	Broj uzoraka uglja	C_{\min}	C_{\max}	C_{95}	C projektno postojećeg EF
Kolubara, 161 MW	2 815	507	1 919	1 671	1 010
Kolubara, 100 MW	2 815	823	3 134	2 731	931
Kostolac A, 100 MW	7 342	629	2 161	1 542	700
Morava, 120 MW	9 mešavina	754	1 030	-	714
Nikola Tesla A1/A2, 2 x 210 MW	1 677	834	3 648	3 195	430

numeričkoj simulaciji sagorevanja uglja u kotlu i otprašivanja u elektrofiltarskom postrojenju za različite karakteristike uglja koji će se koristiti u preostalom veku eksploatacije TE, a prema podacima iz baze podataka o istražnim bušotinama koju je pripremio Rudarski Institut iz Zemuna. Za potrebe ovih analiza napravljen je programski paket ELF1-ELF5, pomoću koga je izvršen proračun i statistička obrada dobijenih vrednosti izlaznih koncentracija čestica za svaki uzorak uglja (ukupno 1 677 uzoraka). Rezultati proračuna prikazani su na slici 3 i u tabeli 1 u kojoj su takođe dati i opsezi izlaznih koncentracija za ostale analizirane TE EPS-a. Kod svih objekata se pokazalo da je 95-ti percentil izlaznih koncentracija čestica znatno veći od garantovanih vrednosti postojećih elektrofiltra za pojedine blokove, a za neke TE su čak i mi-

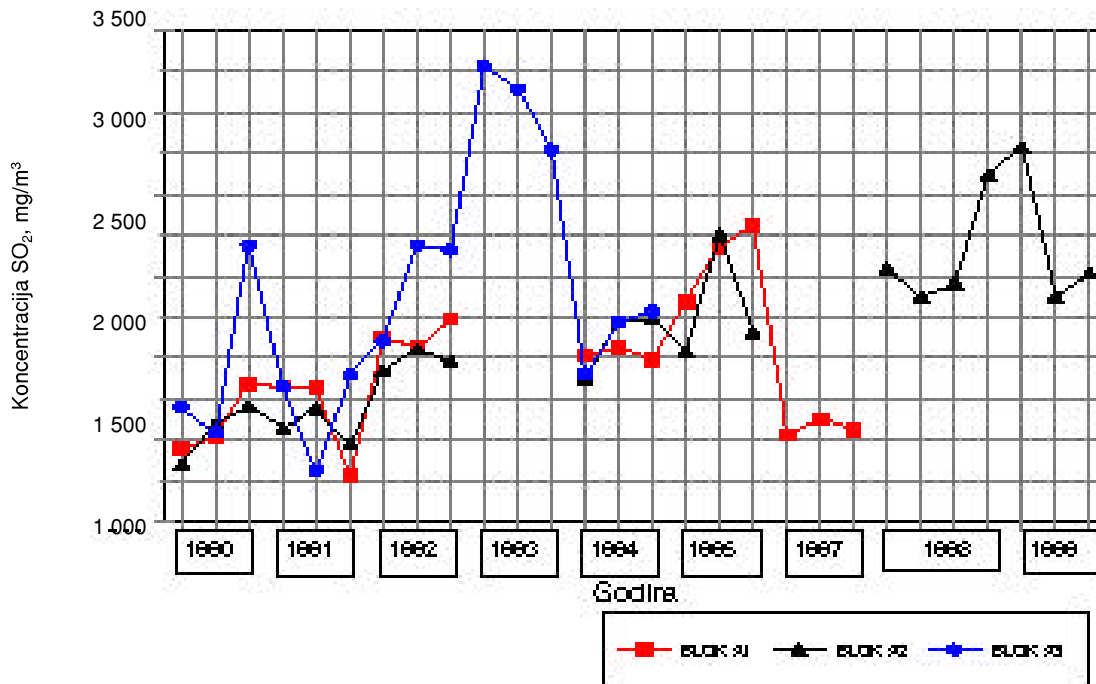
nimalne vrednosti C_{\min} veće od garantovanih (blokovi A1 i A2 TENT-a i TE Morava).

Ovakvi rezultati potvrđuju značaj pravilnog izbora karakteristika referentnog uglja na osnovu koga će se definisati tehničke karakteristike elektrofiltra koje obezbeđuju poštovanje zdatih graničnih vrednosti emisija čestica u čitavom preostalom veku TE.

Sadržaj ukupnog sumpora i stepen vezivanja sumpora u pepelu direktno utiču na emisiju sumpor dioksida, odnosno njegov sadržaj u dimnom gasu. Varijacije ovog parametra mogu se sagledati na primeru uglja iz Kolubarskog basena. Tako, rezultati merenja koncentracija SO_2 u dimnom gasu na blokovima A1-A3 TE Nikola Tesla (koja su vršena u okviru periodičnih ispitivanja rada bloka od strane Rudarskog Instituta iz Zemuna) pokazuju variranje ovih vrednosti u opsegu 1 000 – 2 500 mg/m^3



Slika 3. Varijacija izlaznih koncentracija čestica iz postojećeg elektrofiltra Bloka A1 i A2 – TE Nikola Tesla u narednom periodu



Slika 4. Prikaz rezultata periodičnih merenja koncentracija SO₂ u dimnom gasu

(suv gas, 0 °C, 1 013 mbar, 6 % O₂), slika 4. S obzirom na to da je ovo ulazni parametar za sistem za odsumporavanje, prilikom izbora tehnologije odsumporavanja neohodno je voditi računa o mogućnostima regulacije parametara procesa u odnosu na ulazne karakteristike dimnog gasa.

Tako je, pri uporednoj analizi razmatranih postupaka za sistem ODG (Odsumporavanje Dimnih Gasova) za TE-TO Kolubara B [8], jedan od bitnih faktora za prihvatanje vlažnog postupka kao referentnog, bio i mogućnost precizne regulacije dodavanja krečnjaka, u skladu sa varijacijama sadržaja sumpornih oksida u dimnom gasu.

Kao zaključak se može reći da se široki opsezi pojedinih parametara uglja obavezno moraju uzeti kao jedan od bitnih uslova pri projektovanju sistema za zaštitu životne sredine. Oni takodje mogu uticati i na povećanje investicionih i pogonskih troškova, ukoliko se želi striktno poštovanje propisa o dozvoljenim vrednostima emisija. U tom smislu, sužavanje granica karakteristika uglja bi znatno doprinelo stabilnom i efikasnom radu pomenutih sistema, kao i mogućnosti da se jasno definišu projektni parametri kojima bi se obezbedio i zahtevani nivo zaštite okoline u svim uslovima rada bloka i u čitavom veku njegove eksploatacije.

3. ZAKLJUČAK

Analizirajući dosadašnji rad termoenergetskih objekata u zemlji i podatke o kvalitetu goriva koje se koristilo i koje se trenutno koristi, može se zaključiti

da garantno gorivo praktično više ne postoji i može se sačiniti popis problema koji su nastali zbog uglja – njegove promene u procesu rada, nedovoljnog poznavanja u vreme izgradnje postrojenja, neuspelih konstrukcija kotlova i pomoćnih sistema itd. Ima i slučajeva kada, usled nedovoljne istraženosti, dolazi do iskorišćenosti ležišta uglja i pre isteka predviđenog radnog veka elektrane, pa time i prelaska na korišćenje drugih vrsta ugljeva.

Stoga, jedan od osnovnih preduslova za donošenje odluke o gradnji novih ili revitalizaciji postojećih termoelektrana, a kasnije i za uspešnost predloženih rešenja objekata i sistema sa tehničkog, ekonomskog i ekološkog aspekta predstavlja adekvatna podloga o sirovinskoj bazi.

Podloga o sirovinskoj bazi treba da sadrži sledeće:

- pouzdane podatke o rezervama uglja na kome se bazira rad novog ili revitalizovanog bloka/ova u narednom periodu eksploatacije (podloge o stepenu istraženosti bilansnih rezervi i ležišta u celini–geološke rezerve)
- podatke o planiranom razvoju i dinamici eksploatacije ležišta uglja, u cilju zadovoljenja sagledanih potreba za količinom uglja u narednom periodu eksploatacije starih, revitalizovanih i novih objekata.
- podloge o karakteristikama uglja koji će se eksploatirati u narednom periodu i granicama njihove promene po dubini i frontu otkopavanja, u cilju definisanja projektnog uglja za svaki sistem termoelektrane i načina njegovog obezbeđenja.

Karakteristike goriva, pre svega: vrsta uglja, donja toplotna moć, sadržaj vlage, sadržaj pepela i njegove karakteristike, sadržaj sumpora, sadržaj volatila, meljivost uglja itd. imaju uticaj na većinu postrojenja termoelektrane, kao što su kotao, sistem za dopremu uglja, sistemi za prečišćavanje dimnih gasova, sistem za odvođenje pepela i šljake itd.

Uspešnost u projektovanju, a kasnije u eksploataciji i održavanju kotlovskog postrojenja i pomoćnih sistema umnogome zavise od dobrog poznavanja navedenih karakteristika goriva i granica njihove promene. Što su granice uže, to su rešenja jednostavnija i kompaktnija, problemi u eksploataciji manji, manje oscilacije radnih parametara, veća efikasnost, raspoloživost i ekonomičnost rada.

S tim u vezi, kako je poznavanje karakteristika uglja koji će se koristiti u periodu rada blokova nakon produženja radnog veka, osnova za sve aktivnosti vezane za program revitalizacije bloka, sa direktnim uticajem na tehnička rešenja i obim rekonstrukcijskih zahvata, obezbeđenje reprezentativnih podloga za projektovanje revitalizacije termoelektrane predstavlja nephodan i kompleksan zadatak koji treba blagovremeno rešavati.

4. LITERATURA

- [1] Mićević Z., *RADIJACIONE KARAKTERISTIKE ČVRSTE DISPERZNE FAZE PLAMENA PRI SAGOREVANJU KOSOVSKOG LIGNITA*, Časopis EPK, br.4, 1987.

- [2] Tiykma T., Mićević Z., *THE STUDY OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BOILER FURNACE DEPOSITS*, First Baltic Heat Transfer Conference, Goteborg, Sweden, 26-30 August 1991.
- [3] Mićević Z., Đekić S., *METHODOLOGICAL APPROACH TO THE DEFINITION OF BOILER RECONSTRUCTION WHEN CHANGED COAL CHARACTERISTICS*, National Energy Conference, June 13-16, 1994, Romania
- [4] Đekić S., Mićević Z., Kharcenco V., *INITIAL SLAGGING TEMPERATURE WHEN BURNED PLJEVLJA LIGNITE*, National Energy Conference, September 1-5, 1996, Romania
- [5] *REKONSTRUKCIJA KOTLA I DELA POMOĆNE OPREME U TE "PLJEVLJA" 210 MW*, Prethodna studija opravdanosti, Knjiga 5: Rezultati izvršenih ispitivanja na kotlu i pomoćnoj opremi u TE „Pljevlja”, Sveska 2: Elaborat o ispitivanju kotla (Vinča), Energoprojekt-Entel, Beograd, april 1995.
- [6] *REKONSTRUKCIJA KOTLA I DELA POMOĆNE OPREME U TE "PLJEVLJA" 210 MW*, Prethodna studija opravdanosti, Knjiga 5: Rezultati izvršenih ispitivanja na kotlu i pomoćnoj opremi u TE „Pljevlja”, Sveska 5: Revizija predloga varijantnih rešenja (Mašinski fakultet), Energoprojekt-Entel, Beograd, april 1995.
- [7] *Studija MODERNIZACIJA I REKONSTRUKCIJA ELEKTROFILTARSKIH POSTROJENJA TERMOELEKTRANA EPS-a – Idejno tehnička rešenja*, Energoprojekt-Entel, 1993.
- [8] *KONCEPCIJSKO REŠENJE SISTEMA ZA ODSUMPORAVANJE DIMNIH GASOVA ZA TE-TO KOLUBARA B*, Energoprojekt-Entel, 1999.

Rad je primljen u uredništvo 10. 09. 2001. godine

*Ranko Rakanović, Jovan Nešović,
Dragan Petrović, Ljubiša Vujačić, Saša Dorđević*

Četvoroosovinski vagon za prevoz uglja u TE „Nikola Tesla”, Obrenovac

Stručni rad
UDK: 629.4.01; 656.223.2; 656.078

Rezime:

U radu je prikazan rezultat istraživanja mogućnosti izgradnje četvoroosovinskih kola za prevoz uglja. U postojećem okruženju (istovarna i utovarna mesta) sagedana je mogućnost uvođenja četvoroosovinskih kola za prevoz uglja.

Ključne reči: vagon za prevoz uglja, sanduk kola, gabarit vozila

Abstract:

FOUR – AXLE WAGGON FOR TRANSPORTATION OF COAL IN THERMAL POWER PLANT OBRENOVAC

This paper presents the result of research into the possibility of manufacturing four-axle waggons for transportation of coal. The possibility of introduction of the four-axle waggon for transportation of coal has been considered in the existing surroundings (unloading and loading places).

Key words: waggon for transportation of coal, waggon body, overall dimensions

1. UVOD

Za prevoz uglja u TENT-u Obrenovac danas se koristi četvoroosovinski dvojni dvoosovinski teretni vagon tipa Fbd. Po svojim tehničkim karakteristikama ovaj vagon ne zadovoljava neke zahteve koji se postavljaju prilikom transporta uglja. Glavni nedostaci vagona samoistresača odnose se na često pucanje gibnjeva, nemogućnost zakošenja točkova u krivini što izaziva velike poprečne sile na točkovima vagona, koje izazivaju intenzivno habanje kako točkova tako i glave šina. Da bi se smanjile ove poprečne sile, brzine kretanja vagona moraju biti manje, a zbog habanja, točkove ovih

vagona treba menjati češće nego obično. Zbog svih ovih nedostataka postoji potreba za projektovanjem, izradom i ispitivanjem novog vagona za transport uglja u TENT-u Obrenovac. Kod novog vagona pokušaćemo da prethodne nedostatke svedemo na minimum uz istovremeno povećanje količine tereta koji se transportuje. Konstrukcija novog vagona treba da bude takva da se istovar vagona može obavljati na postojećem mestu i sa postojećim mehanizmom za odbravljanje vrata na podu vagona. Ovaj vagon će obezbediti EPS-u mogućnost eksploatacije (prevoz uglja) u glavnom železničkom saobraćaju.

*Dr Ranko Rakanović, red. prof., Jovan Nešović, dipl. ing., mr Dragan Petrović – Mašinski fakultet 36000 Kraljevo
Ljubiša Vujačić, dipl. ing., Saša Dorđević, dipl. ing. – "EPS" JP TE „Nikola Tesla” 11500 Obrenovac, Bogoljuba Uroševića – Crnog b.b.*

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE I DIMENZIJE NOVOG VAGONA

Kao podloga idejnom rešenju novog vagona korišćena su dva tipa vagona i to:

- četvoroosovinski dvojni teretni vagon samoistresać tipa Fbd (koji se sada koristi za prevoz uglja), i
- Tdnss, vagon za prevoz rasutih tereta.

Novi vagon bi bio opremljen obrtnim postoljima Y25-Lsd, što bi omogućilo zakretanje točkova vagona u krivini. Time se smanjuju bočne sile koje deluju na točkove, a to dovodi do smanjenja habanja točkova i glave šina. Pored toga kod ovih obrtnih postolja povećana je nosivost po osovini (sa 20 t na 22,5 t), što daje mogućnost povećanju mase tereta koji se transportuje (ugalj) za 10 t. Pored ovoga, moguće je i povećanje brzine transporta sa sadašnjih 80 km/h na 120 km/h.

Istovar vagona se vrši automatski, otvaranjem vrata u podu vagona pri dejstvu fiksnog uređaja na vagon na mestu istovara, korišćenjem energije uglja koji se istovaruje i deluje na patosna vrata. Zatvaranje se vrši pomoću hidropneumatskog uređaja. Ovde treba videti da li postoji mogućnost da nekim izmenama konstrukcije mehanizma za istovar omogući istovremeno otvaranje svih podnih vrata, ako su za to ispunjeni određeni uslovi. Pre svega se misli na dužinu istovarne rampe, kao i mogućnost loma trakastog transportera koji odnosi ugalj iz bunkera, zbog velike količine materijala koja bi u trenutku pražnjenja materijala pala na njih.

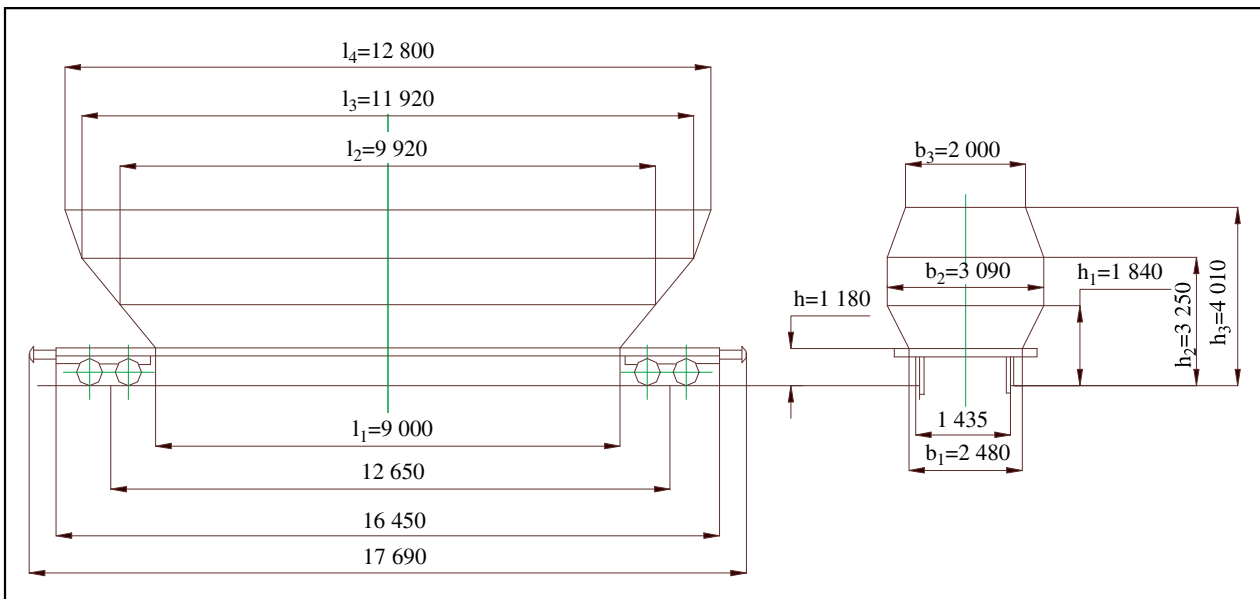
Kod novog vagona potrebno je zadovoljiti određene zahteve i ograničenja. Osnovni zahtevi kod ovog vagona su:

- obezbediti potrebnu zapreminu za nosivost od 67 t,
- obezbediti što kraću, kompaktniju konstrukciju, ali dovoljno čvrstu da može da izdrži sva opterećenja u toku eksploatacije.

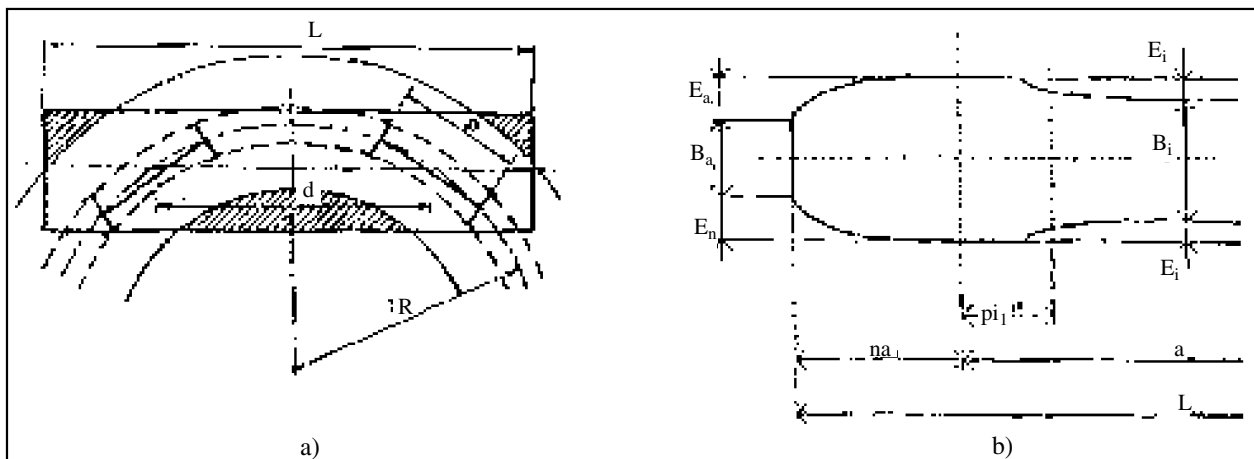
Osnovna ograničenja koja se postavljaju pred ovaj vagon su:

- broj otvora za istresanje u podu vagona mora biti četiri,
- rastojanje između dva susedna otvora koji se nalaze bliže obrtnim postoljima, kao i veličina tih otvora mora ostati ista kao kod četvoroosovinskog teretnog vagona samoistresaća, zbog postojećeg mehanizma za otvaranje vrata pri istresanju (ako se on bude primenjivao),
- oblik sanduka treba da je takav da omogući brz i potpun istovar uglja, što znači, nagib bočnih i čeonih strana sanduka je približno isti kao kod Fbd vagona,
- konstrukcija vagona mora biti upisana u kinematski profil vagona,
- držači vrata na koja se ona oslanjaju pri istresanju vagona moraju biti postavljeni toliko daleko od obrtnih postolja, da pri prolasku vagona kroz krivinu ne dođe do kontakta konstrukcije obrtnog postolja i držača.

Povećanje nosivosti vagona ugradnjom obrtnih postolja uslovljava promenu gabaritnih dimenzija vagona (slika 1).



Slika 1. Osnovne gabaritne dimenzije novog vagona



Slika 2. a) Upisivanje vagona u krivinu, b) idealni profil vagona

Ukupnu zapreminu novog vagona možemo dobiti iz izraza:

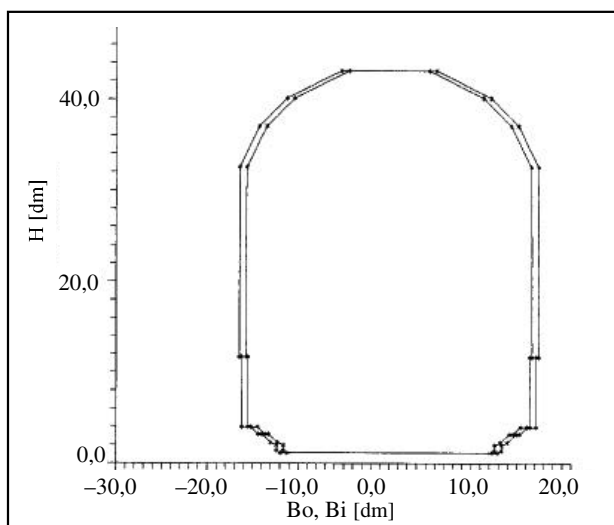
$$V_u = \frac{b_2 + b_3}{2} \left[(h_3 - h_2)l_3 + (h_3 - h_2) \frac{l_4 - l_3}{2} \right] + b_2(h_2 - h_1) \left[l_2 + \frac{l_3 - l_2}{2} \right] + \frac{b_1 + b_2}{2} \left[(h_1 - h)l_1 + (h_3 - h) \frac{l_2 - l_1}{2} \right] \quad (1)$$

Korisnu zapreminu vagona dobijamo iz jedna-
kosti:

$$V_k = V_u - V_s \quad (2)$$

gde je:

V_s – zapremina dela sanduka na sredini vagona ko-
jom omogućujemo potpuno pražnjenje vagona
($V_s \approx 3 \text{ m}^3$). Za dimenzije vagona sa slike 1 ukupna



Slika 3. Profil novog vagona u osnovnom UIC profilu

zapremina je $V_u = 89,61 \text{ m}^3$, a korisna zapremina $V_k \approx 87 \text{ m}^3$.

Ovde se može dobiti niz mogućih rešenja san-
duka menjanjem gabaritnih dimenzija i ugla
bočnih stranica, a koje omogućuju potpuno istresa-
nje uglja koji se transportuje.

3. PROVERA GABARITNIH DIMENZIJA VAGONA

Pravilan izbor osnovnih dimenzija vagona je
od velikog značaja, jer obezbeđuje minimalne ras-
hode za izgradnju i prevoz uz očuvanje stanja tere-
ta i bezbednosti saobraćaja. Osnovni i, za sada, je-
dini prilaz kod određivanja geometrijskih mera va-
gonu, bazira se na geometrijskom upisivanju vago-
na u krivinu (slika 2.a).

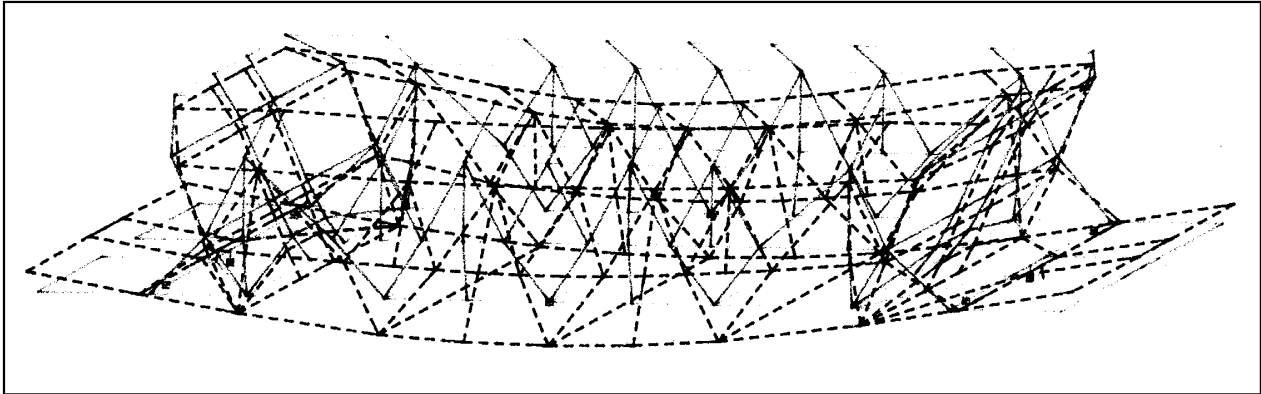
Parovi mera (širina i visina), propisani objava-
ma UIC 505-3, koji zadovoljavaju jednakosti za
maksimalno suženje širine kola E_a – na prepustu i
 E_i – na sredini vagona, su rešenja koja garantuju
maksimalno iskorišćenje gabaritnog prostora.

Na osnovu izraza za proračun geometrijsko-
kinematskih parametara koji su dati u pomenutoj
objavi napravljen je program za optimizaciju gaba-
ritnih dimenzija (za definisani profil vagona). Na
slici 3 je prikazan profil novog vagona u osnovnom
profilu.

Analizom je utvrđeno da nijedna od najjisture-
nijih tačaka vagona na crtežu, za karakteristične vi-
sine ne prelazi granicu profila vagona.

4. PROVERA ČVRSTOĆE VAGONA

Pri formiranju konstrukcije (raspored nosača i
njihov oblik) pošlo se od konstrukcija Tadmssa i
Fbd vagona. Raspored oblik i veličina nosača u če-
onom delu ista je kao kod Tadmssa, a ukrućenje san-
duka slično je Fbd vagonu.



Slika 4. Deformisana struktura vagona posle dejstva kombinovanog opterećenja

Što se tiče rasporeda nosača ispod sanduka vagona (srednji deo postolja), predlažu se dve varijante.

Kod prve varijante glavni podužni nosač je valjani profil I34, a ostali nosači izuzev srednjeg su identični nosačima Fbd vagona (zbog mehanizma za postavljanje i otvaranje vrata za istovar). Treba napomenuti da je poprečni presek srednjeg nosača kod novog vagona veći od poprečnog preseka srednjeg nosača Fbd vagona.

Kod druge varijante, glavni podužni nosači su isti kao kod Fbd vagona, a ostali su isti kao kod prve varijante.

Proračun ovako složene konstrukcije nezamisliv je bez računarske podrške. Napravljen je model za proračun konstrukcije vagona, a sama analiza urađena je pomoću MKE. Nosači su modelirani odgovarajućim štapovima, a opterećenje koje se uvodi u proračun predstavlja najnepovoljniji slučaj koji čini kombinacija vertikalnog kontinualnog opterećenja usled težina uglja koji se transportuje, i podužne sile koja deluje duž osa odbojnika. Na slici 4 prikazana je deformisana struktura vagona posle dejstva ove konstalacije opterećenja.

Naponskom analizom utvrđeno je da obe varijante konstrukcije sa stanovišta čvrstoće zadovoljavaju. Najveći radni uporedni napon dobijen proračunom je $\sigma_{u_{max}} = 24,11 \text{ kN} / \text{cm}^2$ (kod druge varijante), a dozvoljeni napon za materijal nosača $\sigma_{doz} = 34 \text{ kN} / \text{cm}^2$.

Deformacije su u granicama dozvoljenih, jer proračunom su dobijeni najveći ugibi na srednjem delu donjeg postolja.

Dozvoljena deformacija vagona se računa iz izraza $f_{doz} = 0,003 \cdot L = 3,7 \text{ cm}$, (L – raspon između svornjaka), i ona je veća od najveće deformacije dobijene proračunom ($f=1,65 \text{ cm}$).

5. ZAKLJUČAK

Sprovedena analiza pokazuje mogućnost projektovanja konstrukcije novog vagona za prevoz uglja u TENT-u Obrenovac. Osnovu konstrukcije predloženog vagona činila bi dva postojeća vagona, Tadnss i Fbd. Ovim novim vagonom povećala bi se nosivost (količina uglja koji se transportuje), smanjile velike bočne sile na točkovima, kao i njihov uticaj na habanje točka i šine, uz istovremeno povećanje brzine kretanja vagona.

6. LITERATURA

- [1] STATIČKO I DINAMIČKO ISPITIVANJE TADNSS-KOLA, Kraljevo, 1991.
- [2] Rakanović R. i dr. IDENTIFIKACIJA UZROKA LOMOVA GLAVNIH LISTOVA GIBNJEVA NA FBD VAGONU, Elaborat br. 67/83, OC FVK, Kraljevo, 1983.
- [3] Rakanović R. i dr. UPOREDNO ISPITIVANJE OGI-BLJENJA FBD KOLA, Elaborat br. 78/85, OC FVK, Kraljevo, 1983.
- [4] Rakanović R., Babić A., Petrović D., RACIONALIZACIJA TEHNOLOGIJE TRANSPORTA UGLJA U TERMOENERGETSKIM POSTROJENJIMA, Elaborat br. 1/94, Mašinski fakultet Kraljevo, februar 1994.

Hidraulične mašine

Miroslav Benišek

Dr Miroslav Benišek, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu, svetski priznati ekspert za hidraulične mašine, objavio je u ediciji Mašinskog fakulteta u Beogradu "Mehanika fluida i hidraulične mašine" izvanrednu knjigu o hidrauličnim mašinama. Ta obimna knjiga (410 strana, 110 bibliografskih navoda) predstavlja veoma uspehu sintezu naučnih saznanja u oblasti hidrauličnih turbina. Kao takva, knjiga je ne samo izvanredno životno delo ovog plodnog stvaraoca, već je i delo čije objavljivanje predstavlja značajan događaj u našoj nauci i struci. Prema najavi iz predgovora knjige, autor je ovu knjigu zamislio kao prvu u seriji od više knjiga. U njoj daje opštu teoriju hidrauličnih turbina, dok će ostale, koje se pripremaju, biti posvećene pojedinim tipovima savremenih turbina (cevne, Kaplanove, Fransisove i Peltonove turbine), sa naglaskom na specifičnostima hidrauličkih proračuna, projektovanja, ugradnje i eksploatacije.

Knjiga je podeljena u deset poglavlja. U prvom poglavlju se daje zanimljiv prikaz istorijskog razvoja hidrauličnih turbina, pri čemu se vrlo lepo dočarava geneza i postepena akumulacija znanja koja su dovela do osvajanja savremenih tipova turbina za najširi opseg primene. U drugoj glavi, preglednog karaktera, razmatraju se vrste hidroenergetskih postrojenja i hidrauličnih mašina koja se ugrađuju u njih. Naredna glava je posvećena klasifikaciji turbina, u zavisnosti od načina pretvaranja strujne energije u mehaničku, kao i prema pretežnom pravcu toka vode u

radnom kolu, odnosno, prema specifičnoj brzini obrtanja. Prikazani su, opisno i crtežima, svi savremeni sistemi turbina i razmatrane su oblasti njihove primene. U deo uvodnog karaktera spada i četvrta glava, u kojoj se razmatra iskorišćenje energije rečnog toka i osnovni parametri turbina. Razmatra se energija rečnog toka i definišu se osnovni parametri turbine: protok, bruto i neto pad, različite snage, stepeni korisnosti, brzine obrtanja, kavitacijski koeficijenti.

U centralnom, petom poglavlju knjige daju se teorijske osnove hidrauličnih turbina. Razmatraju se teorijske osnove strujanja vode kroz protočni trakt turbine, uslovi razmene energije u radnom kolu i zavisnost strujnih parametara od geometrije strujnog prostora reakcijskih turbina. Definišu se direktni i indirektni problemi proračuna turbinskih kola, kao i metode njihovog rešavanja. Ta teorijska razmatranja se nastavljaju i u narednoj glavi, u kojoj se analiziraju zakoni sličnosti hidrauličnih turbina. Karakteristični bezdimenzijski brojevi sličnosti, dobijeni iz geometrijske, kinematske i dinamičke sličnosti dva strujna polja, dovode se u vezu sa jediničnim parametrima turbine, sa ciljem da se nađe optimalna veza među jediničnim parametrima različitih tipova turbina. U tom poglavlju je detaljno prikazan postupak preračunavanja jediničnih parametara i hidrauličnog stepena korisnosti modela turbine i turbine prototipa, koja će se na osnovu modela realizovati.

Budući da je kavitacija pojava koja može da bude veoma neugodna, čak i ograničava-

juća za primenu pojedinih turbina, njenoj analizi je autor posvetio značajan deo knjige, u okviru sedmog poglavlja. Razmatrani su uzroci nastanka kavitacije, kao i zavisnost kavitacije od strujnih uslova u protočnom traktu turbine. Pomoću bezdimenzijske značice sličnosti raspodele pritiska po profilu lopatice definiše se koeficijent kavitacije. Definisana je veza između kavitacijskog koeficijenta i koeficijenta pritiska po lopaticama turbine. Daje se metodika za preračunavanje kavitacijskog koeficijenta modela na prototip turbine. Daju se metodika i kriterijumi za određivanje dubine potapanja (usisne visine) i izbor kavitacijskog koeficijenta turbine, kao i vrednosti koeficijenta kavitacijske rezerve.

U osmoj glavi se razmatraju funkcionalne zavisnosti dimenzijskih i bezdimenzijskih parametara turbina, način njihovog dobijanja, oblici prikazivanja i značaj za izbor turbina. Razmatraju se i načini regulisanja protoka u turbinama. Naredno poglavlje je posvećeno protočnim delovima turbina, koji imaju bitnu ulogu u stvaranju uslova za uspešnu energetsku razmenu energije fluida sa mehaničkim sistemom turbine. Razmatraju se uvodne komore, statorske lopatice, sprovodna kola i difuzori turbina. Prikazuju se postupci izbora i proračuna tih elemenata protočnog trakta i gubici strujne energije koje oni stvaraju u strujnom toku kroz turbinu.

Poslednja, deseta glava ima veliku aplikacionu vrednost. U njoj se razmatraju no-

menklature velikih turbina, na bazi sakupljenih iskustava optimalnih parametara turbina (geometrijskih, energetskih i kavitacijskih) ruskih proizvođača turbina. Odlično sistematizovani podaci o velikim savremenim turbinama omogućavaju vrlo operativan i pouzdan izbor najpogodnijih tipova turbina, što je od velikog značaja za konstruktore turbina, projektante hidroelektrana, kao i stručnjake koji rade na revitalizaciji i povećavanju snage postojećih hidroelektrana. Sistematizacija se zasniva na činjenici da su globalni geometrijski parametri oblika i energetski parametri turbina međusobno tesno povezani za radnu tačku visokog stepena korisnosti. To omogućava da se odaberu tipovi i oblici turbina najviših stepena korisnosti.

Bogat navod literature (110 bibliografskih jedinica) čini ovu monografiju još vrednijom. Pisana veoma pregledno, sistematično, ova monografija predstavila vrlo uspešan ishod želje autora da knjigu nameni širokom spektru čitalaca, od studenata turbomашinstva, do iskusnih inženjera u praksi. Sigurni smo da će ona postati onaj dobro poznat tip knjiga koje se stalno nalaze na dohvata ruke specijalista koji rade u toj oblasti. Sa nestrpljenjem iščekujemo i ostale najavljene knjige, koje će obraditi pojedine sisteme savremenih turbina.

Dr Branislav Đorđević

Prof. dr Miroslav Benišek, dipl. ing. građ.

Izdavač: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu