

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR



Cu

UDC 669.3

ISSN 0351-0212

Broj 1 Volumen 46 2021

BAKAR COPPER



BAKAR je časopis baziran na bogatoj tradiciji stručnog i naučnog rada ne samo iz oblasti dobijanja i prerade bakra, već i iz oblasti obojene i crne metalurgije, tehnologije, nanotehnologije, hemije, pripreme mineralnih sirovina, zaštite životne sredine, energetske efikasnosti, i primenjene informatike i povezanih srodnih oblasti.

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni i odgovorni urednik

Dr Milenko Ljubojev, *naučni savetnik, redovni član IAS*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: milenko.ljubojev@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-110

Zamenik glavnog i odgovornog urednika

Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-108

Urednik

Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

Prevodilac

Nevenka Vukašinović, *prof.*

Tehnički urednik

Suzana Cvetković, *teh.*

Priprema za štampu

Vesna Simić, *teh.*

Štampa

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Tiraž: 30 primeraka

Internet adresa

www.irmbor.co.rs

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.

Izdavač

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-101

Sva prava zadržana.

Uredivački odbor

Dr Mile Bugarin, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Milan Antonijević, *red. prof.*
Tehnički fakultet Bor
Prof. dr Tatjana Volkov Husović, *red. prof.*
Tehnološko-metalički fakultet Beograd
Doc. dr Bojan Jokić, *docent*
Fakultet primenjenih umetnosti u Beogradu
Dr Silvana Dimitrijević, *viši naučni saradnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Lidija Mančić, *naučni savetnik*
Institut tehničkih nauka SANU
Dr Dragan Milanović, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Aleksandra Milosavljević, *viši naučni saradnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Duško Minić, *red. prof.*
Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica
Dr Milanče Mitovski
Redovni član IAS
Dr Miroslav Sokić, *naučni savetnik*
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd
Dr Jasmina Stevanović, *naučni savetnik*
Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju Beograd
Dr Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Nemačka
Dr Nadežda Talijan, *naučni savetnik*
Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju Beograd
Dr Viša Tasić, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Dejan Trifunović, *naučni saradnik*
Tehnološko-metalički fakultet Beograd

COPPER is a journal based on the rich tradition of expert and scientific work not only in the field of copper production and treatment, but also in the field of non-ferrous and ferrous metallurgy, technology, nanotechnology, chemistry, mineral processing, ecology, energy efficiency, applied informatics, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

Editor-in-Chief

Ph.D. Milenko Ljubojev, *Principal Research Fellow, full member of ECS*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: milenko.ljubojev@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-110

Co-Editor

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-108

Editor

Vesna Marjanović, *B.Eng.*

English Translation

Nevenka Vukašinović

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs

COPPER is financially supported by

The Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic Serbia
Mining and Metallurgy Institute Bor

ISSN 0351-0212

Journal indexing in SCIndex and ISI.

Published by

Mining and Metallurgy Institute Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-101

All rights reserved.

Editorial Board

Ph.D. Mile Bugarin, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Prof.Ph.D. Milan Antonijević,
Technical Faculty Bor
Prof.Ph.D. Tatjana Volkov Husović
Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade
Ph.D. Bojan Jokić
Faculty of Applied Arts in Belgrade
Ph.D. Silvana Dimitrijević,
Senior Research Associate
Mining and Metallurgy Institute Bor
Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Ph.D. Lidija Mančić, *Principal Research Fellow*
Institute of Technical Science of SASA
Ph.D. Dragan Milanović, *Senior Research Associate*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Ph.D. Aleksandra Milosavljević,
Senior Research Associate
Mining and Metallurgy Institute Bor
Prof.Ph.D. Duško Minić
Faculty of Technical Sciences Kosovska Mitrovica
Ph.D. Milanče Mitovski
Full member of ECS
Ph.D. Miroslav Sokić, *Principal Research Fellow*
Institute for Technology of Nuclear and Other Raw Materials Beograd
Ph.D. Jasmina Stevanović, *Principal Research Fellow*
Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade
Ph.D. Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Germany
Ph.D. Nadežda Talijan, *Principal Research Fellow*
Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade
Ph.D. Viša Tasić, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Ph.D. Dejan Trifunović, *Research Associate*
Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 622.261.2(045)=163.41

Primljen: 28.05.2021.

NAUČNI RAD

Prerađen: 01.06.2021.

Oblast: Rudarstvo

Prihvaćen: 02.06.2021.

ANALIZA UTICAJA EKSPLOATACIJE LEŽIŠTA ČUKARU PEKI PODETAŽNOM METODOM OTKOPAVANJA NA POVRŠINU TERENA

ANALYSIS THE IMPACT OF THE ČUKARA PEKI DEPOSIT MINING USING THE SUBLVEL MINING METHOD ON THE FIELD SURFACE

Miloš Stojanović¹, Igor Svrkota¹, Dragan Šabaz¹, Pavle Stojković²

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor

²Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru,
Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor

E-mail: milos.stojanovic@irmbor.co.rs

Izvod

Pojave oštećenja objekata i pomeranja potkopanog terena zapažene su još u ranom rudarstvu. Pre izvođenja bilo kakvih rudarskih radova neophodno je obratiti pažnju na deformacije i oštećenja na objektima iznad eksploatacionog polja, kao i na mere prevencije i procenu štete ukoliko do oštećenja objekata na površini dođe. Ono što predstavlja najveći problem jeste to da se ležišta često nalaze u blizini i ispod naseljenih mesta, ili nekih drugih prirodnih i tehničkih objekata. Ležište Čukaru Peki, koje se nalazi u Srbiji, u neposrednoj blizini grada Bora, biće eksplorisano podzemnim rudarskim radovima. Cilj ovog rada je analiza uticaja eksploatacije ležišta Čukaru Peki metodom podetažnog zarušavanja, na površinu terena primenom numeričkih metoda na bazi geomehaničkih podataka. Aproximacijom ležišta i kalkulacijom zapremine zahvaćene zone zarušavanja, definisana je dubina ulegnuća na površini terena prouzrokovana rudarskim radovima.

Ključne reči: jamska eksploatacija, Čukaru Peki, zona zarušavanja, stabilnost

Abstract

Damage of structures and displacement of undermined terrain have been observed in early mining. Before performing any kind of mining operations, it is necessary to pay attention to deformations and structure damages above the exploitation field, as well as the preventive processes and damage assessment in case of damage to the structures on the surface. The biggest problem is that the deposits are often located near and below populated areas or other natural and technical facilities. The Čukaru Peki deposit, located in Serbia, near the town of Bor, will be mined by the underground mining operations. The goal of this paper is to analyze the impact of mining by the sublevel minig method of the Čukaru Peki deposit on the surface using the numerical methods based on the geomechanical data. Depth of depression on surface caused by the mining works is defined by an approximation of deposit and volume calculation of the affected subsidence zone.

Keywords: underground mining, Čukaru Peki deposit, subsidence zone, stability

1. UVOD

U svim slučajevima podzemnog otkopavanja moćnih rudnih tela na velikim dubinama (kakvo je i ležište Čukaru Peki - gornja zona) dolazi do deformacije terena na površini iznad rudnog tela, izuzev u slučajevima kada se ležište otkopava zasipavanjem otkopanog prostora sa očvršćavajućim zasipom i u slučaju kada se pri otkopavanju ostavljaju sigurnosni stubovi i plafoni, a otkopni prostor se zapunjava klasičnim zasipom.

Prema Preliminarnom ekonomskom izveštaju SRK kompanije [1] predviđeno je da će se rudno telo Čukaru Peki otkopavati masovnim metodama sa zarušavanjem. U Tehničkom izveštaju iz 2017. godine, SRK kompanija prvi put pominje dimenzije zone zarušavanja, koje su, usled primene metode sa zarušavanjem, u funkcionalnoj zavisnosti sa uglom parametara zarušavanja stenskog masiva. U uglovne parametre spadaju granični uglovi, uglovi sigurnosti, uglovi pukotina i ugao maksimalnih pomeranja [2]. Iste godine, SRK kompanija objavljuje i novi Preliminarni ekonomski izveštaj, dopunjeno geotehničkim parametrima i detaljnijim opisom predviđene metode otkopavanja gornje zone ležišta [3].

Širina gornje zone u horizontalnom preseku veća je od 350 m, dok je širina donje zone sa porfirskom mineralizacijom bakra i zlata veća od 1500 m. Orudnjeni prostor je u vertikalnom preseku grubo izometričnog, „bubrežastog“ oblika. Otkopavanjem ovako krupnog rudnog tela na velikoj dubini metodom sa zarušavanjem stvorice se prostrana zona zarušavanja. Svetska iskustva nalažu da se napredovanjem eksploracionih radova prema dubini, povećava i zona zarušavanja [4]. Na osnovu ove činjenice može se zaključiti da su veličina zone zarušavanja i intenzitet podzemnog pritiska međusobno uslovljene veličine i imaju veliki uticaj na tehnologiju i ekonomiku eksploracije. Prilikom izbora metode otkopavanja, na osnovu strukturno-geoloških, geomehaničkih i geometrijskih karakteristika ležišta, sadržaja korisne komponente i karakteristika stenske mase, kompanija SRK je za najpovoljniju metodu izabrala metodu podetažnog zarušavanja rude i pratećih stena [3]. Metoda podetažnog zarušavanja rude i pratećih stena, predstavlja jednu od najšire i najčešće primenjivih metoda otkopavanja metaličnih ležišta. Da bi metoda podetažnog zarušavanja rude i pratećih stena pravilno funkcionišala, potrebno je obezbediti da se nakon zarušavanja rude, koje se ostvaruje bušačko-minerskim radovima, ostvari i zarušavanje pratećih stena, odnosno krovine, koja bi u procesu otkopavanja trebala da se zarušava ravnomerno zajedno sa rudom [5]. Poslednji Tehnički izveštaj SRK kompanije, ujedno i Prethodna studija izvodljivosti otkopavanja ležišta objavljena avgusta 2018. godine, na sajtu kompanije Nevsun [6]. Pomenuta Studija ukazuje na to da predviđena metoda podetažnog zarušavanja rude i pratećih stena podrazumeva otkopavanje ležišta odozgo naniže po celoj površini ležišta. Po vertikali, ležište je podeljeno na podetaže

koje se razvijaju na svakih 20 m. Navedeni način otkopavanja i kontrole istakanja bitno utiče na okolnu stensku masu, odnosno vrši njenu deformaciju i direktno utiče na promenu konfiguracije terena na površini. Na osnovu vrednosti određenih vrsta deformacija moguće je izdvojiti granice između različitog intenziteta oštećenja i definisati kriterijume zaštite. Prema svetskim iskustvima instruktivno se koriste sledeći kriterijumi [7]:

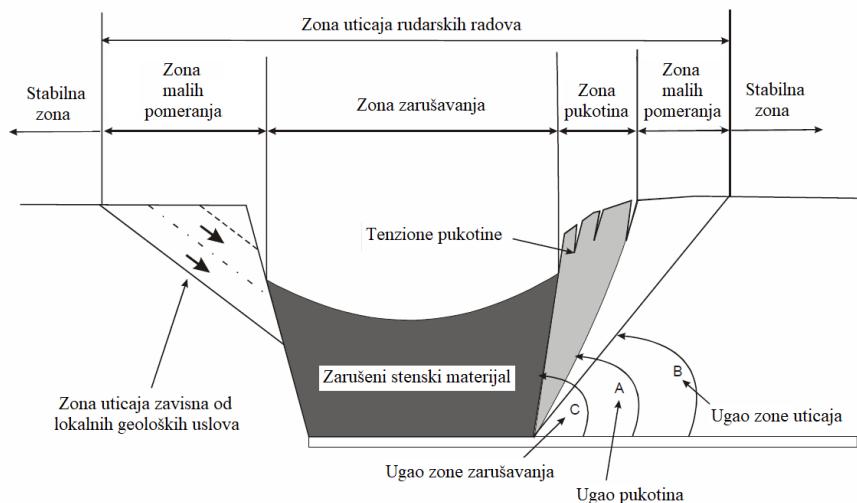
- kriterijum dozvoljenih deformacija, po kome se izdvajaju vrednosti deformacija koje izazivaju takva oštećenja koja se uz redovno održavanje objekta mogu sanirati, a da pritom objekat ne izgubi svoju funkcionalnost; i
- kriterijum kritičnih deformacija, po kome se izdvajaju vrednosti deformacija preko kojih nastaju havarije i potencijalna opasnost po život zaposlenih.

U skladu sa pomenutim kriterijumima neophodno je definisati ponašanje stenskog masiva koje nikada nije moguće u potpunosti predvideti pre početka eksploatacije. Iz tog razloga, razvijene su metode kojima je to moguće uraditi sa dovoljnom sigurnošću. U ovom, konkretnom slučaju, primenjena je metoda Laubšera [8], kojom se, na osnovu odnosa između karakteristika stenske mase i hidrauličkog radijusa otkopa definiše sklonost stenske mase ka zarušavanju.

Karakteristike stenske mase iskazane su kroz modifikovanu klasifikaciju Bijenavskog, odnosno parametar MRMR („Mining Rock Mass Rating“). Hidraulički radius (HR) predstavlja odnos između površine i obima otkopa [9]. U praksi, primena rezultata ove metode pokazuje koliko je ispusnih otvora potrebno aktivirati, odnosno koliko „lepeza“ izminirati, kako bi se otvorila dovoljna površina da krovinske stene počnu da se zarušavaju. U ovom slučaju, vrednost parametra MRMR kreće se u rasponu od 27 do 37. Da bi došlo do zarušavanja, hidraulički radius mora imati vrednost veću od 18 [10].

Na osnovu dobijenih vrednosti sledi da se dinamikom otkopavanja i istakanja mora obezbediti mogućnost formiranja potrebnog hidrauličkog radijusa. Dinamika otkopavanja obezbediće da se miniranjem potrebnog broja lepeza na podetaži otvorí dovoljno velika površina otkopavanja.

Istakanje rude u prvoj fazi, do početka zarušavanja krovine, bilo bi svedeno na minimum. Na ovaj način obezbeđeno je da zarušavanje krovine prati zarušavanje rude. Proces zarušavanja se prema istom principu razvija sve do površine terena. U procesu pomeranja potkopanog terena, u zavisnosti od obima pomeranja, javljaju se različite zone sa različitim uticajima procesa pomeranja na površini terena. Tipične zone koje se javljaju na površini terena prikazane su na slici 1.



Sl. 1. Zone uticaja na površini potkopanog terena [3]

Oblik i razmere različitih zona najčešće se definišu preko uglova zarušavanja, koji u vertikalnom preseku predstavljaju ugao između horizontale i linije koja spaja konturu ležišta i tačku na površini terena koja definije određenu zonu. Definisanjem uglova zarušavanja moguće je odrediti potreban broj tačaka na površini terena koje predstavljaju granicu određene zone. Spajanjem tih tačaka, grafički se može definisati zona uticaja podzemnih radova na površinu terena [6]. Ono što svakako treba napomenuti jeste to da je danas razvijen veliki broj teorija i metoda koje se bave određivanjem uglova zarušavanja.

Na osnovu ulaznih parametara izračunati su uglovi zone zarušavanja i zone uticaja u karakterističnim vertikalnim profilima, kao i horizontalna rastojanja od granica ležišta do granica zona. Uglovi su računati posebno za svaku geološku formaciju i dati su u tabeli 1. [3]

Tabela 1. Karakteristični uglovi i rastojanja – rezultati proračuna [3]

Smer	Uglovi zone zarušavanja	Uglovi zone uticaja	Rastojanje zone zarušavanja od konture	Rastojanje zone uticaja od konture ležišta
Sever	73°	63°	250	425
Jug	64°	54°	350	500
Zapad	72°	57°	225	475
Istok	71°	56°	225	450

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da nijedan od prethodno pomenutih dokumenata ne sadrži geometrijske karakteristike udubljenja koje će

nastupiti na površini terena usled otkopavanja gornje zone ležišta Čukaru Peki primenom metode podetažnog zarušavanja. Ovde se prvenstveno misli na dubinu levka koji će se javiti na površini terena. Iz tog razloga, ovaj rad ima za cilj definisanje zapremine i definisanje visine (dubine) obrnute zarubljene kupe koja će se pojaviti na površini.

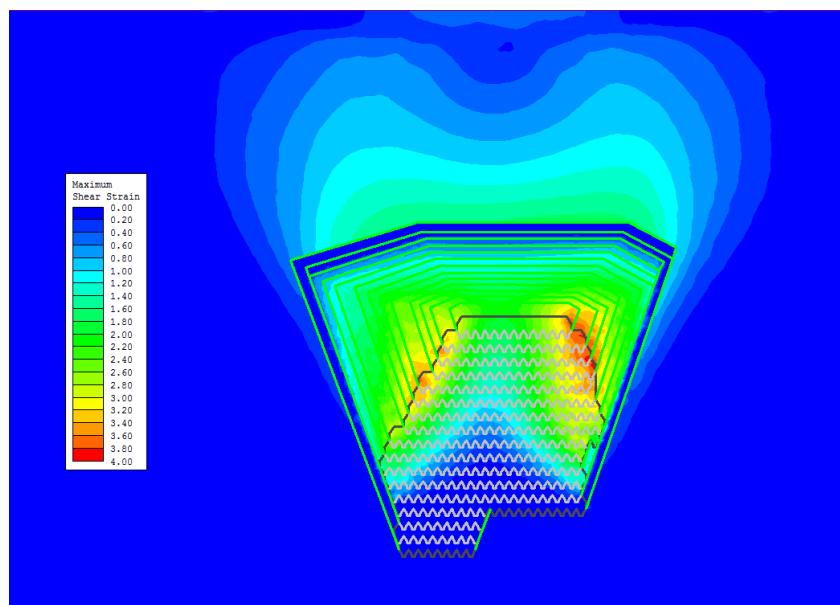
2. NUMERIČKA ANALIZA

Razvojem računarske tehnike sve više se razvijaju numeričke metode za rešavanje deformacije terena usled podzemne eksploatacije. Ovde se prvenstveno misli na metodu konačnih elemenata, sa kojom se može razmatrati model celokupnog naponsko-deformacionog procesa u uslovima složenog elastično-plastičnog ponašanja stenskog medija. Za potrebe određivanja zona zarušavanja u rudnom telu Čukaru Peki izvršena je numerička analiza stenskog masiva, primenom metode konačnih elemenata u softveru kompanije Rocscience „Phase“. Model ležišta je izrađen u karakterističnom vertikalnom preseku kako bi se dobila generalna slika stabilnosti stenskog masiva pri eksploataciji ovog rudnog tela. Prilikom izrade modela, posebna pažnja je posvećena geometrijskim karakteristikama otkopa za predviđenu metodu otkopavanja, geometriji površine terena, karakteristikama stenske mase, uključujući rudno telo i krovinu.

Definisanje ulaznih parametara za proračun izvršeno je na osnovu raspoloživih podataka o rudi i stenskom masivu, prikazanih u Studiji izvodljivosti SRK kompanije [6] i na osnovu svetskih istaknuta za slične uslove [4]. Za svaki materijal definisani su parametri kao što su jednoaksijalna čvrstoća na pritisak, Jungov modul elastičnosti, Poasonov koeficijent, kao i kriterijum loma. U konkretnom slučaju za kriterijum loma odabran je „Hoek-Brownov“ kriterijum [11]. Za ovaj kriterijum loma neophodno je odrediti vrednosti parametara koji figuriraju kao konstantne u osnovnoj formuli „Hoek-Brownovog“ kriterijuma loma, a predstavljaju karakteristike materijala. Zbog toga što definišu stensku masu, za određivanje vrednosti ovih parametara koriste se formule koje u sebi sadrže karakteristiku stenskog masiva, kao na primer, geološki indeks čvrstoće (GSI) ili vrednost kvaliteta stenske mase po Bijenavskom (MRMR – „Mining Rock Mass Rating“) ili po Bartonu (Q) [10]. Zbog ograničene raspoloživosti potrebnih podataka, iskorišćena je veza između parametara MRMR i Q sa vrednostima „mb“ i „s“ i dobijene su sledeće vrednosti za najnepovoljniji slučaj: $mb = 1,087$ i $s = 0,00019$.

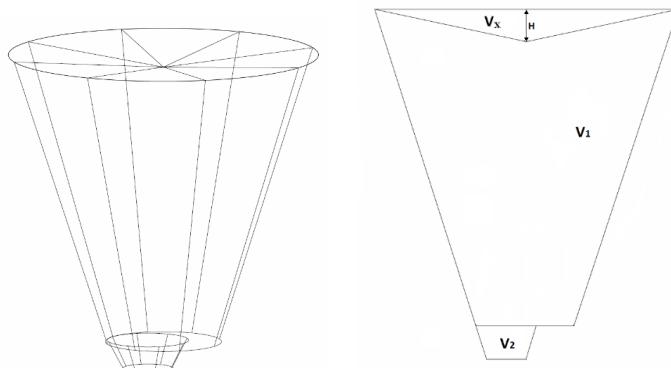
Numerička analiza, primenom metode konačnih elemenata u programu „Phase“, omogućava izračunavanje i grafički prikaz vrednosti brojnih parametara naponsko-deformacionog stanja stenskog masiva. Na ovaj način dobijaju se vrednosti glavnih napona, pomeranja u svim pravcima kao i ukupno

pomeranje, vektori pomeranja i faktor sigurnosti stenskog masiva u bilo kojoj tački stenskog masiva obuhvaćenog modelom. Takođe, u konkretnom slučaju, definisana je i zona zarušavanja nakon otkopavanja kompletne gornje zone ležišta, odnosno zona uticaja na površinu terena. Nakon otkopavanja gornje zone ležišta, maksimalna vrednost pomeranja, za nejnepovoljnije uslove u ležištu, dostiže vrednost od 32,1 m, a naponsko stanje u stenskoj sredini je drastično promenjeno. Smičući naponi koji se javljaju zarušavanjem stenske sredine u krovini, imaju vrednosti koje su obrnuto proporcionalne faktoru sigurnosti (slika 2).



Sl. 2. Vrednosti maksimalnih smičućih napona

Na veličinu parametara otpornosti na smicanje duž pukotina, najveći uticaj imaju oblik zidova pukotina (morphologija zidova pukotina i hrapavost) i mehaničke karakteristike pukotinskih ispuna. S obzirom da je ispučalost stenske sredine trenutno nepoznata, treba prihvatićti dobijene rezultate na ovom modelu, jer se primenom „Hoek-Brownovog“ kriterijuma loma, koji za konkretne uslove daje bolju aproksimaciju otpora prema smicanju, dobijaju veće vrednosti faktora sigurnosti [11]. Kako bi se što bolje definisala zona zarušavanja i dubina maksimalnog uleganja terena, izvršena je analiza svih elemenata koji svojim zapreminama utiču na površinu terena. Na slici 3 prikazani su pravilni geometrijski oblici koji su definisani aproksimacijom gornje zone ležišta Čukaru Peki i kompletnom zonom zarušavanja.



Sl. 3. 3D model zone zarušavanja

Sve dimenzije datih modela definisane su na osnovu Studije SRK kompanije [2] i na osnovu rezultata dobijenih analizom modela u softveru „Phase“.

Na slici su definisani sledeći geometrijski elementi:

- Zbir zapremina zarubljenih kupa V_1 i V_2 predstavlja ukupnu zapreminu zone zarušavanja; i
- Zapremina kupe V_x predstavlja zonu uleganja terena (pri čemu bi visina H date kupe bila maksimilna dubina uleganuća terena).

Proračunom zapremina ovih geometrijskih tela, dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati proračunatih zapremina

V_1	V_2	V_u
195 132 700 m ³	936 000 m ³	196 068 700 m ³

Nakon ovog proračuna neophodno je definisati kolika je zapremina materijala koji se zarušava. Da bi se došlo do tog podatka neophodno je izraziti zapreminu gornje zone ležišta Čukaru Peki do nivoa koji se eksplatiše. Prema Studiji SRK kompanije [3] eksplataciona zona u vertikalnom preseku se kreće od vrha ležišta (k-36 m.n.v.) do kote k-400 m.n.v. Ukupna zapremina gornje zone ležišta Čukaru Peki je 12 894 516 m³. Na osnovu ove vrednosti, može se izračunati količina materijala koji se zarušava, odnosno:

$$V_o = V_u - V_{cp} = 183 174 184 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Ono o čemu svakako treba voditi računa je da upravo materijal koji se zarušava ispunjava otkopani prostor ležišta Čukaru Peki, pa i od ove vrednosti (V_o) treba oduzeti vrednost zapremine ležišta (V_{cp}) kako bi se dobila vrednost

zapremine ulegnuća (V_x) na površini terena. Ako bi se za vrednost koeficijenta rastresitosti (k) usvojila vrednost $k = 1$, materijal koji se zarušava bi se, u tom specifičnom slučaju, ponašao kao fluid, pa bi zapremina ispunjenog otkopanog prostora odgovarala zapremini ulegnuća na površini, odnosno:

$$V_x = V_{cp} \quad (2)$$

Na osnovu ove činjenice, mogla bi da se izračuna maksimalna dubina ulegnuća na površini terena. Već je naglašeno da će oblik ulegnuća na površini terena biti najpribližniji obliku obrnute kupe. Visina te kupe, predstavljala bi, već pomenutu, najveću dubinu. Pošto je površina zone zarušavanja (B) na površini poznata, moguće je odrediti ovu visinu. Maksimalna dubina ulegnuća iznosi:

$$V_{cp} = \frac{B \cdot H}{3} \rightarrow H = \frac{3 \cdot V_{cp}}{B} = 77,15 \text{ m} \quad (3)$$

Izračunata visina zarubljene kupe zapravo predstavlja graničnu vrednost dubine ulegnuća na površini terena. Ako se uzme u obzir da je površina baze poznata ($B = 501,25 \text{ m}^2$) [6], može se zaključiti da ulegnuće na površini terena iznad ležišta Čukaru Peki zauzima veliku zapreminu, osnosno da je zapremina takvog oblika pogodna za veliku akumulaciju vode, odnosno da je pogodna za formiranje jezera, koje bi direktno ugrozilo širu okolinu grada Bora. S obzirom da su ovo maksimalne granične vrednosti, ovu činjenicu treba prihvatići sa određenom rezervom. Podatak koji direktno utiče na dubinu ulegnuća je upravo koeficijent rastresitosti materijala. Ako se pretpostavi da je softver „Phase“, koji se zasniva na metodi konačnih elemenata, dao potpuno tačnu vrednost dubine ulegnuća na površini terena, koja iznosi 32,1 m, računski se može izraziti vrednost koeficijenta rastresitosti za konkretnu dubinu.

Na osnovu već poznatih podataka ($H = 32,1 \text{ m}$ i $B = 501,25 \text{ m}^2$) sledi:

$$V_x = \frac{B \cdot 32,1}{3} = 5\,346\,688 \text{ m}^3 \quad (4)$$

U ovom slučaju, koeficijent rastresitosti bi se računao kao:

$$k = \frac{V_o - V_x}{V_o - V_{cp}} = 1,0443 = 4,43 \% \quad (5)$$

Ovaj rezultat ukazuje da će, ukoliko bi koeficijent rastresitosti materijala koji se zarušava bio 1,043, maksimalna dubina ulegnuća na površini terena biti 32,1 m kako je dobijeno u softveru „Phase“. Time je nedostatak pomenutog programa da prepozna koeficijent rastresitosti anuliran.

Ono što se takođe primećuje jeste to da je vrednost koeficijenta prilično manja u odnosu na vrednosti koje su očekivane. Da bi se definisala granična vrednost koeficijenta rastresitosti (k), postavljena je sledeća relacija:

$$V_{cp} + V_y = k \cdot V_y + V_x \rightarrow V_x = V_y \cdot (k - 1) - V_{cp} \quad (6)$$

Pošto su sve veličine poznate, primenom različitih vrednosti koeficijenta rastresitosti bila bi definisana njegova granična vrednost. Rezultati vrednosti zapremina i dubina ulegnuća predstavljeni su u tabeli 3.

Tabela 3. Dubina ulegnuća terena u zavisnosti od koeficijenta rastresitosti („Datamine“)

k	Vx (m ³)	H (m)
1	12 894 516	77,17
1,01	11 191 719,32	66,98
1,02	9 488 922,64	56,79
1,03	7 786 125,96	46,60
1,04	6 083 329,28	36,41
1,05	4 380 532,6	26,22
1,06	2 677 735,92	16,03
1,07	974 939,24	5,84
1,0757255	0	0

Prethodno izrađen, aproksimativni račun, kompletno je proveren i softverski, konkretno u programu „Datamine“. Tom prilikom definisana je tačna površina na terenu koja nije pravilnog kružnog, već elipsastog oblika. Kao površina baze usvojena je projekcija zone zarušavanja na površini terena iz studije SRK kompanije [6]. Na osnovu ostalih parametara koji uključuju dubinu ležišta, uglove zone zarušavanja, zapremine svih komponenti, u softveru „Datamine“ kreiran je model zone zarušavanja sa realnom geometrijom ležišta Čukaru Peki. Sve veličine koje figuriraju u konkretnom modelu su aktivnije i preciznije i mogu se usvojiti sa većom dozom sigurnosti. Zona zarušavanja dobijena u programu „Datamine“ obuhvata veću količinu stenskog materijala koji je sklon zarušavanju.

Istim redosledom računskih operacija kao u prethodnom delu ovog rada, a na osnovu parametara (dubina ležišta, uglovi zone zarušavanja, projekcija zone zarušavanja na površini terena, zapremina svih komponenti), dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti zapremina dobijenih u programu „Datamine“

V ₁	196 772 451 m ³
V ₂	993 832 m ³
V _u	197 766 283 m ³
V _{čp}	12 894 516 m ³
V _o	184 871 767 m ³
V _y	171 977 251 m ³
V _x (32,1)	5 346 688 m ³
k	1,0438 (4,38%)

Vrednost koeficijenta rastresitosti (k) je nešto niža u odnosu na aproksimativni proračun, ali se može usvojiti kao preciznija, s obzirom da je softver „Datamine“ uključio veću i detaljniju količinu materijala koji se zarušava u odnosu na aproksimativni proračun (tabela 5).

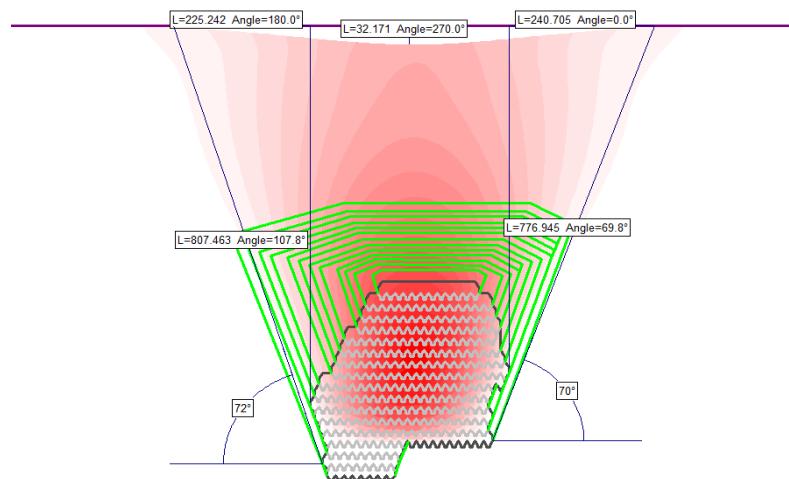
Tabela 5. Dubina ulegnuća terena u zavisnosti od koeficijenta rastresitosti („Datamine“)

k	Vx (m^3)	H (m)
1	12 894 516	77,17
1,01	11 174 743,49	66,88
1,02	9 454 970,98	56,59
1,03	7 735 198,47	46,30
1,04	6 015 425,96	36,00
1,05	4 295 653,45	25,71
1,06	2 575 880,94	15,42
1,07	856 108,43	5,12
1,074978	0	0

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Rezultati istraživanja prikazani u tabeli 3, ukazuju na to da rudarski radovi u gornjoj zoni ležišta Čukaru Peki ne bi imali uticaj na površinu terena ukoliko bi se materijal koji se zarušava zarušavao u otkopani prostor sa koeficijentom rastresitosti $k = 1,0757$ ($k = 7,57\%$). Na taj način, pomeranja na površini terena bila bi minimalna, odnosno zanemarljiva. Treba naglasiti da je vrednost ovog koeficijenta prognozirana na osnovu normalnih, predviđenih, odnosno očekivanih okolnosti.

Proces zarušavanja stenskog masiva razvija se postepeno i brzina ovog procesa zavisi od velikog broja faktora. U konkretnom slučaju, pažnja je usmerena na uticaj kvaliteta stenske sredine, gabarita ležišta i dubinu na kojoj se ležište nalazi ispod površine terena. Na osnovu raspoloživih podataka, analiziran je model čiji su rezultati predstavljeni grafički na slici 4. Detaljnom analizom rezultata dobijeno je da su uglovi zone uticaja na datom pravcu (zapad-istok) 72° sa zapadne, odnosno 70° sa istočne strane ležišta. Na osnovu dobijenih uglova, proračunate su horizontalne dužine zone zarušavanja (u metrima) projektovane na površini terena. Maksimalna vrednost koeficijenta rastresitosti prema ovom proračunu iznosi 7,49 %.



Sl. 4. Granice zone zarušavanja u odnosu na površinu terena („Phase 2D“)

Rastojanje zone zarušavanja od konture ležišta projektovano na površini terena sa zapadne strane iznosi 225 m, dok sa istočne strane ovo rastojanje ima vrednost 240 m. Nakon upoređivanja podataka sa podacima navedenim u tabeli 1, može se zaključiti da dobijene vrednosti odgovaraju vrednostima Studije izvodljivosti SRK kompanije (SRK Consulting 2018). Analiza rezultata u datoj radnoj sredini pokazuje da stenski masiv trpi velike deformacije i pomeranje. Ovo znači da bi se primenom podetažne metode otkopavanja monitoring morao vršiti svakodnevno. Maksimalna vrednost pomeranja, za nejnepovoljnije uslove u ležištu, nakon eksplotacije kompletne gornje zone ležišta Čukaru Peki, dostiže vrednost od 32,1 m.

4. ZAKLJUČAK

Zaštita životne sredine, u oblasti rudarstva, bazira se na zaštiti objekata na eksplotacionom polju rudnika i ima dva oblika: prevenciju i reparaciju. Prevencija je ograničena naučno-tehničkim mogućnostima i iscrpljuje se tehničkim rešenjima projekta otkopavanja, koja se uslovjavaju vrednostima dozvoljenih deformacija.

Pojava deformacija većih od dozvoljenih i projektom uslovljenih, dovodi do takvih oštećenja objekata koja zahtevaju reparaciju. Na osnovu podataka raspoložive tehničke dokumentacije, izvršen je izbor geomehaničkih parametara neophodnih za analizu uticaja na površinu terena. Rezultati analize pokazali su da bi otkopavanje ležišta Čukaru Peki podetažnom metodom otkopavanja imalo bitan uticaj na površinu terena. Deformacije pratećih stena izazvale bi stvaranje levka na površini terena koje bi bilo pogodno za akumulaciju vode, koja bi

svakodnevno ugrožavala životnu sredinu. Svakako, primenom bilo koje druge metode, neophodno je predvideti geodetska opažanja površine terena (posebno u periodima velikih kiša i otapanja leda), pre i u toku eksploatacije ležišta. Jedino na taj način je moguće obezbediti bezbedan rad, kako bi ekonomski ishod eksploatacije ležišta bio pozitivan.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, na finansiranju naučnoistraživačkog rada u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, prema ugovoru br. 451-03-9/2021-14/200052.

LITERATURA

- [1] SRK Consulting, Preliminary Economic Assessment of the Cukaru Peki Upper Zone Deposit, Sweden, 2016, 117-153; 167-203; 231-239.
- [2] SRK Consulting, Technical Report for Preliminary Economic Assessment Update for the Timok Project, Sweden, 2017a, 115-133; 141-156; 198-205.
- [3] SRK Consulting, Timok PEA Report, Geotechnical Engineering and Mining Method Selection, Sweden, 2017b, 92-107; 109; 121-141; 157-163.
- [4] Obert L., Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley and Sons Inc, New York, 1967, 359-388.
- [5] Stacey T., Practical Handbook for Underground Rock Mechanics, Trans Tech Publications, Germany, 1986, 101-122.
- [6] SRK Consulting, Technical Report – Timok, Copper-Gold Project Serbia, Upper Zone Prefeasibility Study and Resource of Estimate for the Lower Zone, Sweden, 2018, 97-154; 211-218; 232-256.
- [7] Riahi A., Hammah, E.R., Limits of Applicability of the Finite Element Explicit Joint Model in the Analysis of Jointed Rock Problems, Rocscience Inc, Ohio, 2008, 336-345.
- [8] Laubscher D., IRMR/MRMR Rock Mass Classification System for Jointed Rock Masses, 2000, 413-421.
- [9] Bieniawski Z.T., Rock Mass Classification in Rock Engineering, Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, Rotterdam, 1976, 97-106.
- [10] Barton N., The Shear Strength of Rock and Rock Joints, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Oslo, 1976, 121-140.
- [11] Saiang D, Gwynn X., Hoek-Brown vs. Mohr-Coulomb Results from a Three Dimensional Open Pit/Underground Interaction Model, SRK Consulting, Sweden, 2014, 1-10.

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 628.3:66.017(045)=163.41

Primljen: 28.05.2021.

NAUČNI RAD

Prerađen: 01.06.2021.

Oblast: Materijali i hemijske tehnologije

Prihvaćen: 02.06.2021.

NANOADSORBENSI NA BAZI METALA/METAL OKSIDA U FUNKCIJI PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA OD ZAGAĐIVAČA

NANOADSORBENTS ON THE BASIS OF METAL/METAL OXIDE IN A FUNCTION OF WASTEWATER TREATMENT FROM POLLUTANTS

Vesna Krstić^{1,2}, Vesna Marjanović¹, Branka Pešovski¹, Danijela Simonović¹

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju, Zeleni bulever 35, 19210 Bor

²Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, VJ 12, 19210 Bor

E-mail: vesna.krstic@irmbor.co.rs

Izvod

Sa naglim naučno-tehnološkim razvojem u svim granama privrede, povećana je emisija toksičnih mikroelemenata, koji su na taj način postali značajni zagađivači životne sredine. Sa povećanjem emisije teških metala, povećavaju se i njihove koncentracije u sedimentima, zemljištu i vodi. Neki od značajnih izvora zagađenja ovim elementima su atmosferski talazi, sagorevanje fosilnih goriva, upotreba mineralnih đubriva i pesticida, organskih đubriva, otpadne vode iz različitih industrija, rudarstvo i rudarska industrija, odlaganje i uništavanje urbanih i industrijskih otpadaka, posebno metalurška industrija, rudnici i topionice obojenih metala i njihove otpadne vode koje dospevaju u vodotokove i mnogi drugi. Na taj način su površinske i podzemne vode direktno ili indirektno ugrožene usled svakodnevnog zagađivanja industrijskim otpadnim vodama najrazličitijeg sastava. Adsorbensi na bazi nano-materijala, uključujući metal/metal oksidne nano-materijale, pokazali su se kao dobar izbor za prečišćavanje otpadnih voda od organskih i neorganskih zagađivača.

Ključne reči: nanoadsorbensi, nanomaterijali metal/metalnih oksida, tretman otpadnih voda, zaštita životne sredine

Abstract

With the rapid scientific and technological development in all branches of economy, the emission of toxic microelements is increased, which thus become the significant polluters of the environment. With the increasing emission of heavy metals, their concentrations in the sediments, soil, and water also increase. Some of the significant sources of pollution with these elements are the atmospheric precipitates, combustion of fossil fuels, use of mineral fertilizers and pesticides, organic fertilizers, wastewater from various industries, mining and mining industry, disposal and destruction of urban and industrial waste, in particular the metallurgical industry, mines and smelters of non-ferrous metals and their wastewater that reaches the watercourses and many others. In this way, surface and groundwater are directly or indirectly endangered due to the daily pollution of industrial wastewater of various compositions. Nano-material adsorbers, including the metal/metal oxide nanomaterials, have proven to be a good choice for the wastewater treatment from organic and inorganic pollutants.

Keywords: nanoadsorbers, metal/metal oxide nanomaterials, wastewater treatment, environmental protection

1. UVOD

U novije vreme ispitivani su brojni postupci za razvoj jeftinijih i efikasnijih tehnologija, načini smanjenja količine otpadnih voda i poboljšanje kvaliteta treiranih efluenata. Adsorpcija je jedan od alternativnih tretmana. Međutim, poslednjih godina interesovanje za jeftinim adsorbensima koji imaju bolje kapacitete metalnih veza izuzetno je intenzivirano [1]. Adsorbujući materijali mogu biti mineralnog, organskog ili biološkog porekla, zeoliti, industrijski nuzproizvodi, poljoprivredni otpad, biomasa, metali/metalni oksidi i polimerni materijali [2]. Membranske separacije nalaze sve veću primenu u tretmanu neorganskih efluenata zbog jednostavnosti upotrebe. Postoje različite vrste membranskih filtracija: ultrafiltracija (UF), nano filtracija (NF) i reversna osmoza (RO) [3]. Elektro-tretmani, kao što su elektrodijaliza [4], su takođe doprineli zaštiti životne sredine. Fotokatalitički proces je inovativna i obećavajuća tehnika za efikasno odstranjivanje zagađivača iz voda [5].

Biološko prečišćavanje otpadnih voda se široko primenjuje, ali je obično spor, ograničeno je zbog prisustva bionerazgradivih zagađivača i ponekad izaziva toksičnost za mikroorganizme usled nekih toksičnih kontaminanata [6]. Fizički procesi kao što je filtracija mogu ukloniti kontaminante transformacijom jedne faze u drugu, pri tome proizvodeći visoko koncentrovani mulj koji je toksičan i nepogodan za odlaganje. U tom kontekstu, postoji realna potreba za efikasnijim i moćnijim tehnologijama za tretman komunalnih i industrijskih otpadnih voda. Ovo se može postići bilo razvojem potpuno novih metoda ili poboljšanjem postojećih metoda kroz neke modifikacije.

Među različitim tehnologijama u razvoju, napredak u nanotehnologiji je pokazao neverovatan potencijal za sanaciju otpadnih voda i raznih drugih ekoloških problema [7,8]. Nanotehnologija je citirana u literaturi kao jedan od najnaprednijih procesa za prečišćavanje otpadnih voda. Klasifikacija je urađena na osnovu prirode nanomaterijala u tri osnovne kategorije: nanoadsorbensi, nanokatalizatori, nanomembrane, a navodi se takođe i integracija navedenih nanotehnologija sa biološkim metodama. U nanoadsorpciji nedavno su objavljeni brojni i značajni radovi i tehnologije, sa ciljem da se istraži uklanjanje zagađivača iz otpadnih voda upotrebom nanoadsorbenasa [9-12]. Nanoadsorbensi se mogu proizvesti korišćenjem atoma onih elemenata koji su hemijski aktivni i imaju visok kapacitet adsorpcije na površini nanomaterijala. Ovi materijali uključuju aktivni ugalj, silicijum, razne gline, zeolite, metalne okside, nanopolimere i modifikovana jedinjenja u obliku kompozita [13].

Iako se mnoge tehnike koriste za prečišćavanje otpadnih voda, odstranjanje teških metala treba da omogući ne samo tehnološki pogodan tretman u konkretnim uslovima rada već i mogućnost zadovoljenja maksimalno dozvoljenih koncentracija (MDK), koje su propisane usvojenim standardima.

Prema istraživanju Ujedinjenih Nacija, Srbija se nalazi na 47-om mestu od 180 zemalja po količini i kvalitetu vodenih resursa, a to znači da Srbija ne spada u zemlje siromašne vodom. Međutim, stepen istraženosti i eksploatacije prirodnih izvora je veoma mali. Smatra se da se Srbija prilično neekonomski i neekološki ponaša prema rezervama vode, jer se voda nemenski koristi, imajući u vidu relativno nisku cenu vode iz vodovoda. Najviše vode koja se koristi (45%) zahteva određen kvalitet, tj. ispunjenje samo nekih parametara biološke ispravnosti. Stvarna potreba za vodom najvišeg kvaliteta je tek oko 20% od ukupne potrošnje.

S obzirom da se broj stanovnika na našoj planeti ubrzano povećava, potreba za vodom je sve veća, a njena količina se ne menja, pa su procene da će se u bliskoj budućnosti, dve trećine čovečanstva suočiti sa ozbiljnim nedostatkom vode. Ove činjenice ukazuju na aktuelnost problema prečišćavanja otpadnih voda i potrebu za razvojem efikasnijih, jeftinijih i ekološki prihvatljivijih metoda za uklanjanje zagađujućih materija iz voda.

U ovom radu će se razmotriti mogućnost upotrebe nanoadrorbensa na bazi metala i metalnih oksida za prečišćavanje voda od različitih zagađivača.

2. NANOADSORBENSI NA BAZI METALA I METALNIH OKSIDA

Nanočestice metali/oksidi metala izuzetno dobro deluju na uklanjanje opasnih zagađivača zbog velike specifične površine, odličnih magnetnih svojstava i visokog potencijala adsorpcije [14-16]. Veća specifična površina, brojna mesta reakcije, pokazuju veću sposobnost adsorpcije, kao i bržu kinetiku reakcije. Pored toga, odvajanje zagađivača može se postići korišćenjem spoljnog magnetnog polja. Auffan i saradnici [17] su komentarisali „efekt nano čestica“ kao bitan značaj čestica veličine na nano nivou. Kada se smanjuje veličina čestica ispod 20 nm, tada se adsorpcioni kapacitet čestica na nano nivou povećava zbog povećanja specifične površine. Ovaj efekat su dokazali demonstrirajući proces adsorpcije arsena, As(III), na površini nanočestica magnetita (6 nm). Videlo se da se veličina nanočestica magnetita kondenzovala na manje od 20 nm, zatim adsorpcioni kapacitet je poboljšan usled promene na površins-

koj nanostrukturi što je dalje stvorilo nova upražnjena aktivna mesta kao visoko reaktivna mesta adsorpcije. Štaviše, obilje dostupnih prirodnih metala poput aluminijuma, gvožđa, titana i jednostavniji i jeftiniji postupak sinteze njihovih oksida, učinili su ove metale/metalne okside dobrim nano adsorbensima za teške metale i adsorpciju opasnih radio-nukleida.

Nedavno su He i saradnici [18] objavili podatak da je za uklanjanje nitrata i Cr(VI) iz podzemnih voda korišćeno nula valentno gvožđe (*Zero-valent Iron, nZVI*) bimetalnog zeolita, Z-Fe/Pd. Eksperiment je u velikoj meri zavisio od pH gde su kiseli uslovi (pH = 3,0) olakšavali proces sanacije sa vrlo visokim kapacitetom uklanjanja od 121, odnosno 95,5 mg g⁻¹ za Cr(VI) i nitrate, respektivno. Adsorpcija Cr(VI) iz podzemnih voda bila je rezultat procesa precipitacije i adsorpcije, dok je redukcija nitrata katalizovana katalitičkom kombinacijom Fe i Pd. Druga grupa je prijavila adsorpciju jona Pb²⁺ do 99,0% na površini nanokompozita zasnovanih na montmorionitu (*Montmorillonite, Mt*) i zeolitu (*Zeolite, Z*) koji su funkcionalizovani sa nZVI česticama u vrlo kratkom vremenu od 40 minuta [19]. Proučavali su uporednu adsorpcionu sposobnost jona Pb²⁺ na nanokompozitima Mt-nZVI, Z-nZVI i njihovim priorodnim materijalima, zeolitu, montmorionitu i nZVI. Veoma visok sorpcioni kapacitet postignut je na nanokompozitima Mt-nZVI i pripisan je sinergijskom efektu nanočestica gline i gvožđa. Zeolit modifikovani heksametilendiaminom (HMDA) obeležen kao HMDA-zeolit, korišćen je za saniranje anjonskih boja kao što su Reaktivno plavo 250 i Reaktivno crveno 239 iz otpadnih voda [20]. U ovoj površinskoj modifikaciji, molekuli HMDA prekrili su površinu zeolita da bi sprečili odbijanje između anjonskih molekula boje i negativno nanelektrisanog zeolita, povećavajući sposobnost adsorpcije.

Nula valentno gvožđe koristi se za redukciju selenijumovih oksijona u elementarni selen. Fero katjoni takođe mogu redukovati selenat u selenit, nakon toga ukloniti selenit adsorpcijom na gvožđe hidroksidu. U vodenoj sredini, nZVI može da se oksiduje u tro-valenti feri oblik Fe(III) i dvo-valentni fero oblik Fe(II). Ovi joni reaguju sa hidroksilnim jonima prisutnim u vodi i formiraju fери и fero hidrokside. Selenat se redukuje u selenit, dok se dvovalentno (fero) gvožđe oksidiše do trovalentnog (feri) gvožđa. Selenit se potom adsorbuje na fери и fero hidroksid i uklanja iz rastvora [21,22].

Etteieb i saradnici [23] dali su pregled tehnologija za uklanjanje Se iz vodenih rastvora redukcijom sa nula valentnim Fe, a nedostaci ove tehnologije su: rastvoreni kiseonik i drugi anjoni koji ometaju adsorbciju, povećana je upotreba hemikalija zbog nZVI, skladištenje i odlaganje mulja, potrebno je podešavanje temperature i pH vrednosti.

Mironyuk i saradnici [24] su proučavali efekte hemisorbovanih arsenatnih grupa na mezoporozne (metalne) nanočestice TiO_2 i otkrili su da se povećala sposobnost adsorpcije teških metalnih jona Sr(II). Mezoporozne nanočestice TiO_2 pokazale su bolji adsorpcioni kapacitet od osnovnog nemodifikovanog TiO_2 , što dalje sugerira bolju primenu metalnih nanočestica u uklanjanju jona teških metala iz otpadnih voda. Autori su takođe proučavali efekat mezoporoznih TiO_2 nano-adsorbenasa u uklanjanju jona Sr(II) iz vodenog rastvora i otkrili da je koncentracija od 4 mas% optimalni uzorak za uklanjanje Sr(II) [25]. U drugoj studiji, grupa istraživača radila je na adsorpciji jona teških metala Pb(II) i Cu(II) na nanočesticama metalnog oksida Al_2O_3 [26]. Rezultati istraživanja su pokazali da adsorpcija zavisi od pH vrednosti rastvora i prisutnih koloida koji poboljšavaju proces adsorpcije jona Pb(II) i Cu(II) promenom njihovih površinskih svojstava formiranjem $Al(OH)_3$ i jona metala. Ovim je pokazano da su sastav rastvora uzorka i prisustvo koloida u otpadnoj vodi, dva bitna parametra koji utiču na adsorpcioni kapacitet nanočestica Al_2O_3 .

U tabeli 1 su prikazani rezultati uklanjanja različitih zagađivača metalnim/metal oksidnim i nano-kompozitnim adsorbensima.

Tabela 1. Uklanjanje različitih zagađivača vode pomoću metalnih/metal oksidnih i kompozitnih nano adsorbenasa

Zagađivač	Matriks (Nanoadsorbens)	Maksimalni kapacitet adsorpcije (mg/g)	Model	Uslovi / Ključne karakteristike	Rastvor	Ref.
Cr(VI)	Nula-valento Z-Fe/Pd zeolit aktiviran bimetalom	121	-	- Zavisno od pH vrednosti (optimalna pH = 3) - Kiseli uslovi ublažavaju proces	Podzemne vode	[18]
Nitrat		95.5				
Pb(II)	Mt-nZVI	115.1 ± 11.0	Langmuir	- Vremenski zavisno (optimalno vreme 40 min) - Sinergetsko ponašanje između nanočestica gline i Fe rezultiralo je većim sorpcionim kapacitetima nanokompozita	Voden rastvor	[19]
	Z-nZVI	105.5 ± 9.0				
	Zeolit	68.3 ± 1.3				
	Mt	54.2 ± 1.3				
	nZVI	50.3 ± 4.2				
RR-239	HMDA-Z	28.57	Freundlich ($R^2 = 0.99$)	- Ne zavisi od pH vrednosti (nema značajnih promena u opsegu od 2 do 10)	Otpadne vode	[20]
RB-250		17.63				
Sr(II)	4As-TiO ₂	262.9	Langmuir ($R^2 > 0.993$)	- Optimalna adsorpcija sa 4 mas% uzorka - Uklanjanje Sr(II) iz vodenog medija olakšavaju grupe Ti (O_2AsOON) smeštene na površinama mezopora	Voden rastvor	[24]
	TiO ₂	92.1				

Sr(II)	2C-TiO ₂	170.4	Langmuir (R ² >0.98)	<ul style="list-style-type: none"> - Optimalna adsorpcija sa 4 mas% uzorka - Uklanjanje Sr(II) iz vodenog medija olakšavaju mezoporozni ugljenični nanoadsorbensi TiO₂ - Alkalni medijum podržava uklanjanje Sr(II) zbog stvaranja SrON⁺ katjona 	Vodeni rastvor	[25]
	4C-TiO ₂	204.4				
	8C-TiO ₂	190.8				
	TiO ₂	70.9				
Cu(II)	Al ₂ O ₃ nanočestice	Wenyu river: 8.75-15.09 Yellow river: 16.02-17.19	R ² >0.98	<ul style="list-style-type: none"> - Zavisno od pH vrednosti (optimalna pH) - Adsorpciju je promovisalo prisustvo koloidnih čestica u vodi reke Wenyu Data frakcija iz Žute reke (Yellow river) pokazala je veći adsorpcioni kapacitet zbog prisustva nižih koncentracija TOC i glavnih elemenata 	Rečna voda (Wenyu i Yellow reka)	[26]
		Wenyu river: 29.10-30.80 Yellow river: 34.10-36.97				
Radio J ⁻ anjoni	Nanokompozitne membrane od AuNPs i celuloznog acetata	~ 12 μmol	-	<ul style="list-style-type: none"> - Au-CAM filter je efikasan za jon-selektivnu separaciju radioaktivnog joda 	Vodeni rastvor	[27]
Cu(II)	Schiff baza DSDH ligand nanokompozit	173.62	Langmuir (R ² =0.982)	<ul style="list-style-type: none"> - Zavisno od pH vrednosti (optimalna pH = 7) - Visoko selektivni matriks - Vremenski zavisno (optimalno vreme 50 min) 	Otpadne vode	[28]
Pd(II)	THTB immobilizovani nanokompozit na bazi mezoporoznog silicijum-dioksida	171.65	Langmuir (R ² >0.98)	<ul style="list-style-type: none"> - Visoko selektivni matriks - Prisustvo konkurenčnih jona nije uticalo na adsorpciju 	Otpadne vode	[29]
Co(II)	Schiff baza ligand DDPD na osnovu nano-conjugavanog materijala	170.17	Langmuir	<ul style="list-style-type: none"> - Zavisno od pH vrednosti (optimalna pH = 7) - Veoma osetljiv i selektivan matriks - Višekratna upotreba do nekoliko ciklusa 	Otpadne vode	[30]
MB	PANI/ZrO ₂	77.51	Langmuir (R ² >0.97)	<ul style="list-style-type: none"> - Efikasnost uklanjanja se povećava sa povećanjem vremena kontakta - Efikasnost adsorpcije se povećava sa porastom temperature 	Vodeni rastvor	[31]
	PANI	192.30				
Pb(II)	MDA–Fe ₃ O ₄	333.3	-	<ul style="list-style-type: none"> - Zavisno od pH vrednosti (optimalna pH = 3-5) 	Vodeni rastvor	[32]
MB	PES/čestice biljnog otpada MMM	1055–1173	Langmuir (R ² =0.99)	<ul style="list-style-type: none"> - Niski materijalni troškovi - Odlična ponovna upotreba membrane - Zavisno od pH vrednosti (optimalna pH = 4) 	Sintetičke otpadne vode	[33]
Methyl violet 2B		1085–1244				

3. PREDNOSTI I NEDOSTACI METALNIH/METAL OKSIDNIH NANOADSORBENASA

Proučavani nanomaterijali, kao što su metalni/metal oksidi materijali, poseduju izvrsna fizikohemijska svojstva i kapacitete za uklanjanje zagađivača, što ukazuje na njihovu potencijalnu upotrebu u problemu sanacije vode. Iako nanočestice pokazuju izuzetno dobre rezultate u sanaciji otpadnih voda, ipak postoje neki još uvek nerešeni problemi, koji ograničavaju komercijalnu upotrebu nanočestica u raznim procesima. Ovi nedostaci uključuju odgovarajuću disperziju metalnih/metal oksidnih materijala, isplativost, upotrebu, recikliranje i ponovnu upotrebu nakon procesa recikliranja, unutrašnju toksičnost, gubitak aktivnosti tokom vremena, itd. [34,35]. Disperzija nano metalnih/metal oksida po dатој подлози uslovljava bolje karakteristike, ali kada se koriste u procesu prečišćavanja otpadnih voda, tada imaju tendenciju da se agregiraju, što uzrokuje njihove lošije karakteristike zbog smanjene efektivne površine. Potrebno je pravilno zadržavanje i recikliranje kako bi se ovi nano materijali mogli ponovo koristiti nakon procesa, čime bi se smanjili ukupni troškovi. Još jedan glavni problem je gubitak aktivnosti nano metala/metala oksida tokom dužeg vremenskog perioda, što povećava troškove prečišćavanja otpadnih voda.

Nanomaterijali imaju veći potencijal rizika, jer ih karakteriše mogućnost emisije u životnu sredinu, gde se mogu duže akumulirati i zagaditi region [36,37]. Metalni i metal oksidni nano-adsorbensi, kao što su nano-Ag, nano-ZnO, nano-CeO₂, nano-TiO₂ su ekonomski manje isplativi i zbog ograničene dostupnosti i trajnosti. Čak i nano-TiO₂ zahteva ultraljubičastu aktivaciju da bi započeo proces. Još jedno ograničenje upotrebe nanomaterijala u sanaciji vode je mogućnost ekstrakcije novih kompleksa ili zagađivača u vodi iz nanokompozita zbog tekućeg mehanizma sanacije. Ovi metalni oksidi, kao što je nano-TiO₂, teško da se mogu i biološki razgraditi, što dalje ugrožava život vodenih i kopnenih organizama. Obraštanje membrana za prečišćavanje voda je još jedan nedostatak ovih materijala, jer nakon višestruke upotrebe efikasnost opada. Ovo pitanje se može rešiti uključivanjem sredstava protiv obraštanja, kao što su nano Ag, Cu, Au, GO, CNT, TiO₂ i Zn [38].

4. ZAKLJUČAK

Zagađenje vode je nesumnjivo ozbiljan razlog za zabrinutost za život na Zemlji i treba ga razmatrati na siguran i održiv način. Od različitih metoda i tehnika korišćenih za tretman otpadnih voda, najnovija je upotreba funkcional-

nih nanomaterijala, od kojih su metal/metalni oksidi sve više razmatrani zadnjih godina. Među raznim tehnikama uklanjanja zagađivača utvrđeno je da su metode zasnovane na nanotehnologiji veoma efikasne.

Istraživani su različiti materijali na nano nivou za prečišćavanje otpadnih voda. Očekivanja od novosintetisanih nanomaterijala su vrlo velika, jer ih istraživači vide kao najprikladnije savremene materijale koji se koriste za tretman zagađenih voda. U radu je objedinjena većina funkcionalnih metal/metal oksidnih nanomaterijala. Razmatrani su različiti metal/metal oksidni materijali sa prikazanim efikasnim vrednostima adsorpcije organskih i neorganskih zagađivača iz otpadnih voda. Detaljno su razmotreni aspekti sanacije vode korišćenjem različitih metal/metal oksidnih nanomaterijala i njihove mogućnosti adsorpcije zagađivača. Takođe su pažljivo razmatrane prednosti i ograničenja ovih nanomaterijala.

U radu sa nanomaterijalima na bazi metal/metal oksida postoje određeni rizici po ljudsko zdravlje, pa bi trebalo obratiti dodatnu pažnju na razvoj nanomaterijala koji su ekološki prihvatljivi tokom njihovog životnog ciklusa. Neophodno je precizno istraživanje procene bezbednosti za izradu novih nanomaterijala. Potrebni su dodatni opisi novih i ažuriranje postojećih informacija o osobinama i karakteristikama nanomaterijala na bazi metal/metalnih oksida, kao i razmatranje pitanja rizika i toksičnosti, kako bi se bolje razumele i postavile najprikladnije nanotehnologije za njihovu sintezu i primenu. Pored toga, takođe je potrebna odgovarajuća procena rizika tokom životnog ciklusa nanometala/metalnih oksida, tj. praćenje i kontrola procesa od njihovog nastanka, upotrebe, rezaktivacije i odlaganja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike u okviru finansiranja naučnoistraživačkog rada u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, prema ugovoru br. 451-03-9/2021-14/200052, na čemu se autori zahvaljuju.

LITERATURA

- [1] Urošević T., Milivojević M., Petrović Z., Đordjevski S., Krstić V., Petrović N., Petrović J., Kinetika sorpcije arsena iz voda na sorbent titan dioksid dopovan gvožđem, Bakar 2(2014), 13-20.
- [2] Elezović N., Takić Lj., Jovanić P., New Approach for Water Quality Analysis and Modeling, Mining and Metallurgy Engineering Bor, 1/2015, 117-129

- [3] Kurniawan, T.A., Chan, G.Y.S., Lo, W.H., Babel, S., Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Chem. Eng. J.*, 118 (2006) 83-98.
- [4] Pedersen, A.J., Characterization and electrolytic treatment of wood combustion fly ash for the removal of cadmium, *Biomass Bioener.*, 25(4) (2003) 447-458.
- [5] Danijela Simonović, Branka Pešovski, Vesna Krstić, Electrochemical synthesis of ferrate (VI) for the wastewater treatment, *Mining and Metallurgy Engineering Bor* 3-4 (2018) 49-54.
- [6] Zelmanov G., Semiat R., Iron(3) oxide-based nanoparticles as catalysts in advanced organic aqueous oxidation. *Water Res.* 42 (2008) 492–498.
- [7] Sadegh, H., Shahryari-Ghoshekandi, R., Kazemi, M., Study in synthesis and characterization of carbon nanotubes de coratedby magnetic ironoxi de nanoparticles, *Int. Lett.*, 4 (2014)129-135.
- [8] Gupta, V.K., Tyagi, I., Sadegh, H., Shahryari-Ghoshekand, R., Makhlouf, A.S.H., Maazinejad, B., Nanoparticles as adsorbent; a positive approach for removal of noxious metal ions: A review, *Sci. Technol. Dev.*, 34 (2015) 195.
- [9] Zhang, Q., Xu, R., Xu, P., Chen, R., He, Q., Hong, J., Gu, X., Performance study of ZrO₂ ceramic micro-filtration membranes used in pre-treatment of DMF wastewater, *Desalination*, 346 (2014) 1-8.
- [10] Zhang, Y., Yan, L., Xu, W., Guo, X., Cui, L., Gao, L., Wei, Q., Du, B., Adsorption of Pb(II) and Hg(II) from aqueous solution using magnetic CoFe₂O₄ reduced grapheme oxide, *J. Mol. Liq.*, 191 (2014) 177-182.
- [11] Tang, X., Zhang, Q., Liu, Z., Pan, K., Dong, Y., Li, Y., By loofah fibers as a natural low-cost adsorbent from aqueous solutions, *J.Mol.Liq.*, 199 (2014) 401-407.
- [12] Shamsizadeh, A.A., Ghaedi, M., Ansari, A., Azizian, S., Purkait, M.K., Tin oxide nanoparticle loaded on activated carbon as new adsorbent for efficient removal of malachite green-oxalate: non-linear kinetics and isotherm study, *J. Mol. Liq.*, 195 (2014) 212-218.
- [13] Kyzas, G.Z., Matis, K.A., Nano adsorbents for pollutants removal: A review, *J. Mol. Liq.*, 203 (2015) 159-168.
- [14] Hua, M., Zhang, S.J., Pan, B.C., Zhang, W., Lv, L., Zhang, Q., Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 211-212 (2012) 317-331.

-
- [15] Giamar, D.E., Maus, C.J., Xie, L.Y., Effects of particle size and crystalline phase on lead adsorption to titanium dioxide nanoparticles. *Environ. Eng. Sci.*, 24(1) (2007) 85-95.
 - [16] Zheng, Y.M., Yu, L., Wu, D., Paul Chen, J., Removal of arsenite from aqueous solution by a zirconia nanoparticle. *Chem. Eng. J.*, 188 (2012) 15-22.
 - [17] Auffan, M., Rose, J., Proux, O., Borschneck, D., Masion, A., Chaurand, P., Bottero, J.Y., Enhanced adsorption of arsenic onto maghemites nanoparticles: As (III) as a probe of the surface structure and heterogeneity, *Langmuir*, 24(7) (2008) 3215-3222.
 - [18] He, Y., Lin, H., Luo, M., Liu, J., Dong, Y., Li, B., Highly efficient remediation of groundwater co-contaminated with Cr(VI) and nitrate by using nano-Fe/Pd bimetal-loaded zeolite: Process product and interaction mechanism, *Env. Pollut.*, 263(A) (2020) 114479.
 - [19] Arancibia-Miranda, N., Baltazar, S.E., García, A., Muñoz-Lira, D., Sepúlveda, P., Rubio, M.A., Altbir, D., Nanoscale zero valent supported by zeolite and montmorillonite: Template effect of the removal of lead ion from an aqueous solution, *J. Hazard. Mater.*, 301 (2016) 371-380.
 - [20] Alver, E., A. Egül Ü. Metin, Anionic dye removal from aqueous solutions using modified zeolite: Adsorption kinetics and isotherm studies, *Chem. Eng. J.*, 200-202 (2012) 59-67.
 - [21] Huang, Y.H., Peddi, P.K., Tang, C., Zeng, H., Teng, X., Hybrid zero-valent iron processes for removing heavy metals and nitrate from flue-gas-desulfurization wastewater, *Separ. Purif. Techn.*, 118 (2013) 690-698.
 - [22] Yoon, I.H., Bang, S., Kim, K.W., Kim, M.G., Park, S.Y., Choi, W.K. Selenate removal by zero-valent iron in oxic condition: the role of Fe(II) and selenate removal mechanism, *Environ. Sci. Pollut. Resear.*, 23(2) (2016) 1081-1090.
 - [23] Etteieb, S., Magdouli, S., Zolfaghari, M., Brar, S.K., Monitoring and analysis of selenium as an emerging contaminant in mining industry: A critical review, *Sci. Total Envir.*, 698 (2020) 134339.
 - [24] Mironyuk, I., Tatarchuk, T., Vasylyeva, H., Gun'ko, V.M., Mykytyn, I., Effects of chemisorbed arsenate groups on the mesoporous titania morphology and enhanced adsorption properties towards Sr (II) cations, *Gun. J. Molecul. Liq.*, 282 (2019) 587-597.

- [25] Mironyuk, I., Tatarchuk, T., Naushad, M., Vasylyeva, H., Mykytyn, I., Highly efficient adsorption of strontium ions by carbonated mesoporous TiO₂, *J. Molecul. Liqu.*, 285 (2019) 742-753.
- [26] Sun, W., Yin, K., Yu, X., Effect of natural aquatic colloids on Cu (II) and Pb (II) adsorption by Al₂O₃ nanoparticles, *Chem. Eng. J.*, 225 (2013) 464-473.
- [27] Mushtaq, S., Yun, S.J., Yang, J.E., Jeong, S.W., Shim, H.E., Choi, M.H., Jeon, J., Efficient and selective removal of radioactive iodine anions using engineered nanocomposite membranes, *Environ. Sci. Nano*, 4(11) (2017) 2157-2163.
- [28] Awual, M.R., Eldesoky, G.E., Yaita, T., Naushad, M., Shiwaku, H., Al Othman, Z.A., Suzuki, S., Schiff based ligand containing nanocomposite adsorbent for optical copper (II) ions removal from aqueous solutions, *Chem. Eng. J.*, 279 (2015) 639-647.
- [29] Awual, M.R., Hasan, M.M., Naushad, M., Shiwaku, H., Yaita, T., Preparation of new class composite adsorbent for enhanced palladium (II) detection and recovery, *Sens. Actu. B*, 209 (2015) 790-797.
- [30] Awual, M.R., Alharthi, N.H., Hasan, M.M., Karim, M.R., Islam, A., Znad, H., Khaleque, M.A., Inorganic-organic based novel nanoconjugate material for effective cobalt (II) ions capturing from wastewater, *Chem. Eng. J.*, 324 (2017) 130-139.
- [31] Agarwal, S., Tyagi, I., Gupta, V.K., Golbaz, F., Golikand, A.N., Moradi, O., Synthesis and characteristics of polyaniline/zirconium oxide conductive nanocomposite for dye adsorption application, *J. Mol. Liquids*, 218 (2016) 494-498.
- [32] Sharahi, F.J., Shahbazi, A., Melamine-based dendrimer amine-modified magnetic nanoparticles as an efficient Pb (II) adsorbent for wastewater treatment: Adsorption optimization by response surface methodology, *Chemosph.*, 189 (2017) 291-300.
- [33] Lin, C.-H., Gung, C.-H., Sun, J.J., Suen, S.-Y. Preparation of polyether-sulfone/plant-waste-particles mixed matrix membranes for adsorptive removal of cationic dyes from water, *J. Membran. Sci.*, 471, (2014) 285-298.
- [34] Krstić, V., Pešovski, B., Đordjevski, S. Simonović, D., Urošević, T., The possibility of reducing the hardness of drinking water by using zeolites on the example of a pilot plant by Chinese researchers, *Bakar* 45 (1) (2020) 13-22.

- [35] Pešovski, B., Simonović, D., Krstić, V., Different types of nanomaterials for the wastewater treatment, *Bakar* 43 (2) (2018) 65-80.
- [36] Zhang, Y., Zhu, C., Liu, F., Yuan, Y., Wu, H., Li, A., Effects of ionic strength on removal of toxic pollutants from aqueous media with multifarious adsorbents: A review, *Sci. Total Environ.*, 646, (2019) 265-279.
- [37] Zhu, Y., Liu, X., Hu, Y., Wang, R., Chen, M., Wu, J., Zhu, M., Behavior, remediation effect and toxicity of nanomaterials in water environments, *Environ. Resear.*, 174 (2019) 54-60.
- [38] Homaeigohar, S., Botcha, N.K., Zarie, E., Elbahri, M., Ups and downs of water photodecolorization by nanocomposite polymer nanofibers, *Nanomaterials*, 9(2) (2019) 250.

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 669.05(045)=163.41

Primljen: 04.02.2021.

NAUČNI RAD

Prerađen: 11.03.2021.

Oblast: Metalurško inženjerstvo

Prihvaćen: 08.04.2021.

UNAPREĐENJE ODRŽAVANJA METALURŠKOG POSTROJENJA PRAĆENJEM PARAMETARA TEHNOLOŠKOG PROCESA

IMPROVEMENT OF THE METALLURGICAL PLANT MAINTENANCE BY MONITORING THE TECHNOLOGICAL PROCESS PARAMETERS

Krsta Brčić

Industrijski sistemi automatskog upravljanja – ISAU, Beograd

E-mail: krsta.brcic@gmail.com

Izvod

Svaki ispad piro-metalurškog agregata iz funkcije zbog havarije može imati veoma štetan uticaj na rezultate poslovanja preduzeća i životnu sredinu. Zbog toga je neohodna pravovremena i planirana reakcija održavanja postrojenja, u cilju eliminisanja rizika od nastanka havarije. U ovom članku ćemo razmatrati primenu softvera eksperetskog tipa i održavanje metalurškog postrojenja kao dela proizvodnog procesa.

Ključne reči: piro-metalurško postrojenje, održavanje, životna sredina, ekspertni sistem

Abstract

Any outage of a pyro-metallurgical unit due to a breakdown can have a very detrimental effect on the operating results of company and harmful impact on the environment. Therefore, a timely and planned response of the plant maintenance is necessary, in order to eliminate the risk of accidents. This paper considers the application of an expert-type software and maintenance of a metallurgical plant as a part of the production process.

Keywords: pyro-metallurgical plant, maintenance, environment, expert system

1. UVOD

Rast produktivnosti je danas glavni cilj svake proizvodnje. U tim uslovima pravi je izazov kako prilagoditi proizvodnju, a istovremeno da sve funkcioniše bez štetnih posledica po radnu i životnu sredinu. Danas korištene tehnologije ispunjavaju visoke ekološke standarde, ali bilo koji kvar metalurškog postrojenja može dovesti do curenja štetnih materija u životnu sredinu. Ovo je realnost sa kojom se susreće stanovništvo u blizini metalurških postrojenja. Pored toga i lokalna ekonomija u velikoj meri zavisi od područnog rudnika, odnosno, od rada metalurških postrojenja. Sve to pokazuje koliko je bitno da se održi visoka produktivnost, odnosno, raspoloživost postrojenja, ali i visoki stepen zaštite životne sredine.

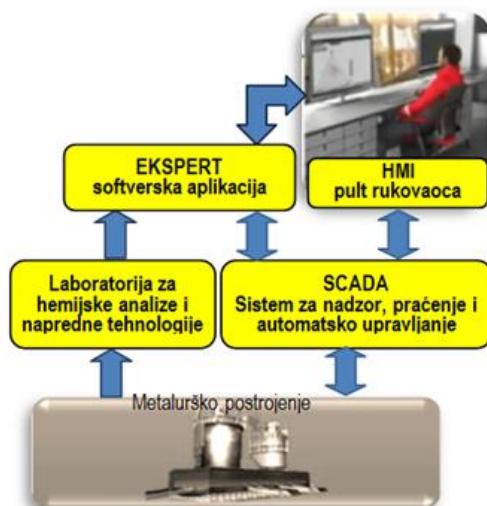
Obično proizvođači uz isporučene delove postrojenja dostavljaju i planove održavanja istih. Međutim, realni uslovi eksploracije i druge okolnosti mogu biti i različiti od projektnih, pa je neophodno da se stanje i funkcionisanje postrojenja prati u realnim uslovima. Danas se sve više razmatraju i primenjuju ekspertske sisteme kako u sistemima za nadzor, praćenje i upravljanje industrijskim procesima tako u održavanju postrojenja kao dela proizvodnog procesa. Sa aspekta održavanja veoma je bitno pravovremeno otkrivanje neispravnosti, pre nego što dođe do prekida proizvodnje zbog havarije.

2. NADZOR, PRAĆENJE I UPRAVLJANJE PROCESOM SA ASPEKTA ODRŽAVANJA

Danas je imperativ primena koncepta „pametne fabrike“ koji se zasniva na savremenim sistemima za nadzor, praćenje i upravljanje proizvodnim procesima, što se odnosi i na metalurške procese. Za proizvodnju je bitan kvalitet proizvoda, ali za poslovanje fabrike, bitna je i raspoloživost i sigurnost funkcionisanja postrojenja, što je u domenu održavanja.

Hardverski i softverski deo sistema za nadzor, praćenje i upravljanje (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA) prvenstveno obezbeđuje da postrojenje stabilno funkcioniše, ali i da se donose optimalne odluke i efikasno rešavaju sistemski problemi [1], uključujući i održavanje.

Rukovalac postrojenja (operator) na osnovu vizuelnog prikaza i dostupnih komandi (Human Machine Interface – HMI) na panelu ili ekranu sa sinoptičkom šemom tehnološkog procesa – postavlja režim rada postrojenja, vrši nadzor i po potrebi interveniše. Prikaz sadrži parametre procesa i alarne, tj. upozorenja kada se pojave neregularna stanja. Sistem za automatsko upravljanje održava odabrani režim rada postrojenja. Sistem SCADA/HMI, pored prikaza podataka u realnom vremenu, ima i funkciju skladištenja prikupljenih podataka, kao i njihovo dostavljanje u više formata (word, excel, pdf, i dr.). Za složenije tehnološke procese pokazalo se da je pored velikog iskustva i veštine rukovaoca postrojenja, potrebna analiza od strane ekspertskog tima na osnovu čega se vrše određena prilagođavanja parametara procesa, a i da menadžment fabrike doneše određene poslovne odluke. Danas se i ti problemi rešavaju primenom naprednih softverskih aplikacija, nazvani ekspertskim sistemima. Oni se integrišu u sistem za nadzor, praćenje i upravljanje tehnološkim procesom. Sam pristup primeni ekspertskog softvera može se predstaviti kao na slici 1. Prema prirodi i dinamici autogenih metalurških procesa za upravljanje je najpogodnije primeniti matematičke modele. Matematički modeli obezbeđuju vizuelizaciju (repräsentativno predstavljanje), analizu, optimizaciju i unapređenje tehnološkog procesa. U skladu s tim, ostvaruje se bolja raspoloživost postrojenja, uspešnije vođenje poslovne strategije fabrike [2] i unapređenje zaštite radne i životne sredine sprečavanjem havarija.



Sl. 1. Blok šema integracije ekspertske aplikacije u SCADA

Primena ekspertske aplikacije u metalurgiji proučava se već više decenija, a od pre više od dve decenije ekspertni sistemi su u širokoj primeni [3]. Softverska aplikacija ekspertskega tipa integrisana sa softverom za nadzor, praćenje i automatsko upravljanje omogućava analizu prikupljenih podataka, prilagodavanje režima rada postrojenja, osiguranje donošenja optimalnih odluka i generisanje upozorenja u vezi održavanja postrojenja i delova postrojenja. Time se sprečava dobijanje proizvoda čija svojstva odstupaju od očekivanih, ali se sprečavaju i havarije.

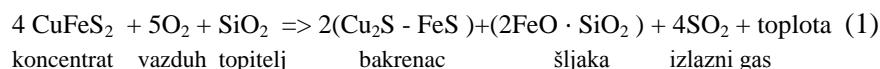
Korišćenje HMI/SCADA sistema je lako i udobno ne samo za tehnički orijentisani osobe, već i za ljude sa različitim profesionalnim fokusima. Informacije koje pružaju SCADA/HMI sistemi u realnom vremenu uz podršku ekspertskega softvera sistematskom prverom proračuna – može obezbediti optimalno podešavanje parametara procesa, ažuriranje softvera kao i sva potrebna podešavanja i da se sve to odvija u realnom vremenu.

Softverska aplikacija ekspertskega tipa se ne zasniva samo na raspoloživim podacima i simbolima već i na skupu pravila algoritamskog i nealgoritskog tipa. Sami proračuni za donošenje odluka vrše se na osnovu statističkih i determinističkih modela tehnološkog procesa. Praćenje, nadzor i automatsko upravljanje se odnosi na parametre tehnološkog procesa, radni status pojedinačnih uređaja i automatsko podešavanje tehnoloških parametara, alarme i sigurnosni start i zaustavljanje postrojenja. U konkretnom slučaju se pod ekspertskim sistemom podrazumeva računarska softverska tehnologija proistekla iz istraživanja

veštačke inteligencije. Ekspertska sistem u okviru nadzora obuhvata alarme, dijagnostičke programe i sigurnosni prekid rada – sigurnosna isključivanja radi sprečavanja havarija [4]. Aplikacija ekspertskega tipa sadrži tabele i pravila koje se odnose na optimalno doziranje koncentrata, doziranje topitelja, proračun sadržaja bakra u bakrenču, sastav šljake, temperaturu u reakcionaloj komori fleš peći i druge relevantne informacije.

Firma Outotec je 2014. godine plasirala onlajn model ekspertskega sistema kao integralnog dela sistema za nadzor, praćenje i upravljanja [4] koji obuhvata sve bitne parametre procesa koji se odvijaju u fleš peći počev od reakcione komore, separacije bakrenca i šljake sve do izdvajanja otpadnih gasova sa velikim sadržajem SO₂. Softver predstavlja dobro poznati i dokazani model dinamike i ravnoteže mase i energije. Može se kalibrirati pomoću procesnih merenja i podataka dobijenih laboratorijskim ispitivanjima.

Dominantne reakcije koncentrata halkopirita u reakcionaloj komori fleš peći uz dodatak topitelja mogu se opisati sledećom relacijom [5]:



Koncentrat bakra, zajedno sa topiteljem, vazduhom i povratnom prašinom, ulazi u reakcionalnu komoru kroz šaržirne gorionike, a postoje i posebni uljni gorioni. Ovu relaciju možemo izraziti preko bilansa materijala i energije. Kao bitne jednačine odvijanja gasne faze uključuju se jednačine kontinuiteta, propagacije, materije i energije. Opšti oblik jednačine održanja materije i energije bio bi:

$$\nabla(\rho_g V_\varphi) = \nabla(\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S_\varphi + S_{p\varphi}, \quad (2)$$

gde je:

S_φ – topotna energija gasne faze,

$S_{p\varphi}$ – topotna energija generisana interakcijom kontinualne i diskontinualne faze.

Odgovarajući matematički model tehnološkog procesa je osnov za projektovanje ekspertskega softvera. Prvobitno su u te svrhe korišćeni programski jezici FORTRAN i MATLAB, a kasnije i drugi programski jezici – kako komercijalni (ANSYS-CFX) tako i specijalni programski jezici.

S obzirom na prirodu i dinamiku procesa, u praktičnoj primeni su uglavnom modeli ustaljenog režima rada u prostoru stanja. Primer matematičkog modela koji je jednostavan, ali dovoljno reprezentativan, izведен u prostoru stanja korišćenjem programskog jezika MATLAB (The System Identification Toolbox) je:

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t), \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t), \quad (4)$$

gde su:

A, B, C, D i K – matrice modela procesa i modela merenja u prostoru stanja,

$x(t)$ – vektor stanja,

$y(t)$ – izmerene izlazne veličine u trenutku t ,

$u(t)$ – postavljene ulazne veličine u trenutku t ,

$e(t)$ – poremećaj tipa belog šuma.

Navedene parametre karakterišu njihove nominalne, dopuštene i granične vrednosti [6], kao i vrednosti fizičkih promenljivih koje karakterišu tehnološki proces postrojenja. Kao ključni indikator procesa za procenu performansi procesa topljenja je sadržaj bakra u bakrenu. Stoga je dinamički model u realnom vremenu veoma važan za proizvodni proces sa poželjnim pokazateljem kvaliteta, kao što su: sadržaj bakra u bakrenu, tempertura bakrenca i zadati maseni odnos Fe prema SiO_2 u šljaci. Matematički model obezbeđuje određivanje bitnih promenljivih procesa koje se mogu izmeriti, a i za projektovanje efikasnih algoritama za upravljanje procesom topljenja. Za potrebe upravljanja režimom rada fleš peći uradene su studije kojima je za određivanje oksidacionog uklanjanja sumpora iz koncentrata bakra u funkciji vremena primjenjen model [6]:

$$(1 - \nu)^{1/3} = k_{\text{app}} \cdot t \quad (5)$$

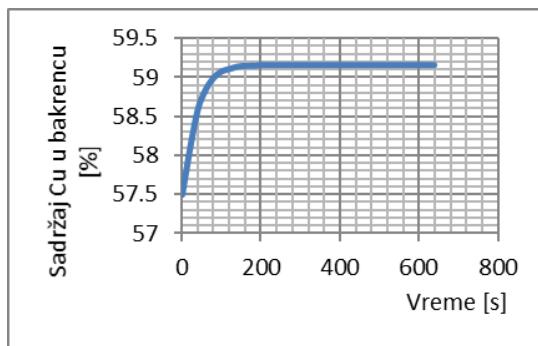
gde je:

ν – procenat uklanjanja sumpora (%),

t – vreme odvijanja reakcije (s) u reakcionoj komori,

k_{app} – konstanta brzine reakcije.

Rezultati simulacije su pokazali da model može poslužiti za procenu sadržaja bakra u bakrenu i da se u reakcionoj komori ustaljeni sadržaj bakra u bakrenu uspostavi za relativno kratko vremene (slika 2) u poređenju sa vremenom uspostavljanja ustaljenog režima drugih veličina koje su specifične za tehnološke procese koji se odvijaju u fleš peći.



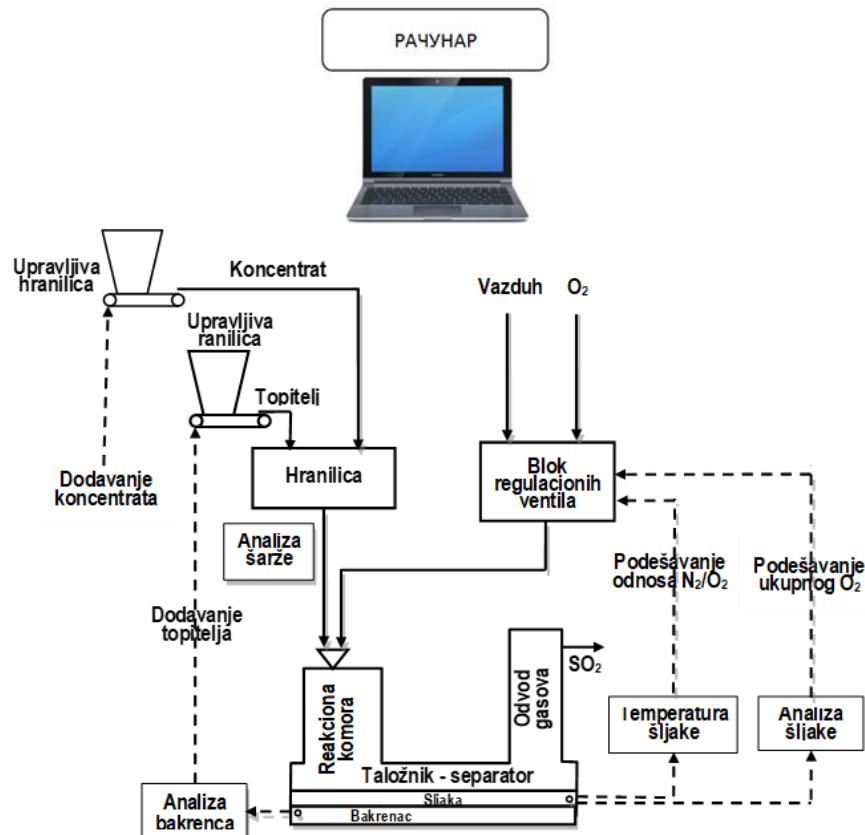
Sl. 2. Dijagram odsumporavanja

Metode optimizacije parametara su uglavnom zasnovane na modelu, jer su pokazale visoku efikasnost u postizanju postavljenih ciljeva. Ti modeli su iz praktičnih razloga uglavnom modeli stacionarnih stanja. Međutim, upotreba modela stacionarnih stanja zahteva rešavanje dva problema. Prvi je: neophodnost adaptacije parametara, zbog dinamike procesa. Drugi je: ključne promenljive procesa se ne mere kontinualno, već u intervalima uzorkovanja koji je od približno 60 minuta. S obzirom da se regulacija vrši na osnovu podataka o sadržaju bakra u bakrenu, postoji neizvesnost šta se događa u vremenu između uzorkovanja i to u velikoj meri utiče na performanse optimizacije procesa zasnovane na modelu stacionarnih stanja [6]. Operator unosi analizu sirovina i ciljani sadržaj bakra u bakrenu u program. Izračunati parametri se nakon odobrenja operatera automatski prenose kao nove zadate vrednosti za upravljanje procesom i proces može da otpočne ili nastavi ako je u toku. Stacionaran režim funkcionisanja fleš peći podrazumeva:

- konstantan intenzitet unosa koncentrata i ostalih materijala određenog sastava,
- određeni intenzitet odvođenja otpadnog gasa bogatog sadržajem SO₂,
- ujednačeno istakanje bakrena,
- istakanje šljake kada dostigne određeni nivo.

Primer tehnološke šeme fleš peći sa osnovnim okruženjem za obezbeđenje stabilnog (stacionarnog) režima rada u smislu napred navedenog može se predstaviti kao na slici 3. Ključne upravljačke petlje, kojima se obezbeđuje stabilan režim rada su:

1. sastav bakrenca,
2. sastav šljake, i
3. temperatura šljake.



Sl. 3. Primer tehnološke šeme sa upravljačkim petljama

Temperatura šljake se reguliše podešavanjem rada gorinika u reakcionej komori, a fino podešavanje vrši pomoću gorionika u prostoru separacije. Da bi tehnološki proces u fleš peći bio stacionaran, tj. da bi se stabilno odvijao, koncentrat bakra mora biti ustaljenih osobina i šaržiranje mora biti regulisano. Rezultat toga je da:

- bakrenac ima propisani sadržaj bakra,
- šljaka ima određeni sadržaj SiO₂, i
- šljaka ima zadatu temperaturu.

Kada izmerene vrednosti parametara prelaze graničnu vrednost, dalja upotreba tehničkog sistema, tj. postrojenja, mora imati niske efikasnosti i visoki rizik od višestrukih šteta (sigurnosnih, bezbednosnih, ekonomskih, i dr.). Ovde

nije naznačeno, ali pomoćni delovi postrojenja moraju isto imati ustaljene režime rada, uključujući i da zaštitna obloga ima svoju funkciju.

Praćenje funkcije postrojenja u realnom vremenu podrazumeva i izračunavanje parametara modela, a svako odstupanje znači degradaciju funkcije postrojenja. Ako to odstupanje izlazi iz opsega dozvoljenih tolerancija, onda je to znak da treba bezbedno prekinuti rad postrojenja i otkloniti uzrok. Ukoliko postrojenje nastavi sa radom – efikasnost postrojenja izuzetno opada, a postoji i rizik od havarije sa katastrofalnim posledicama. To važi i za funkcije prateće opreme na postrojenju.

Inteligentna aplikacija, na osnovu prikupljenih podataka, vrši analizu i generiše informacije o stanju opreme [7]. Ako se proceni da može doći do otkaza bilo kod dela postrojenja, ekspertska sistem generiše i predlog rešenja. Time se obezbeđuje efikasno planiranje neophodnog materijala i izvođenje aktivnosti održavanja dok je postrojenje još u funkciji. A ako postoji rizik od havarije, onda sistem bezbedno automatski prekida tehnološki process, i pristupa otklanjanju utvrđenih nedostataka.

3. DIJAGNOSTIČKI SISTEM

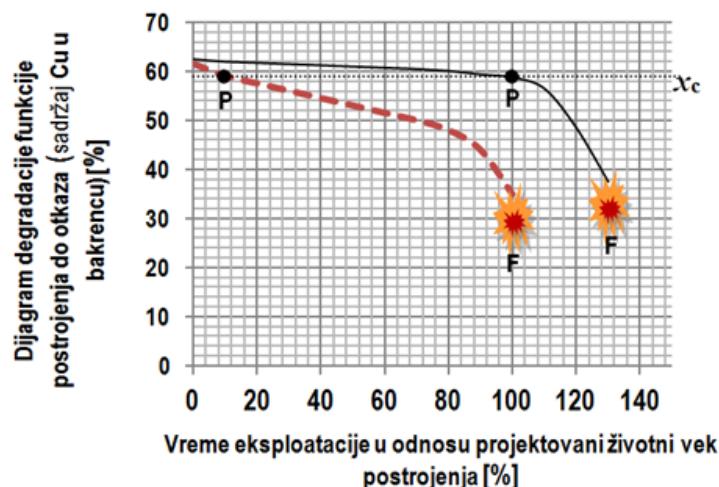
Metode dijagnoze neispravnosti postrojenja u oblasti autogene tehnologije prerade koncentrata bakarne rude primenjuju se tek od pre nešto više od dve decenije, a koriste se sve više. I u te svrhe model procesa ima osnovnu ulogu. Postrojenje se projektuje tako da se tehnološki proces odvija prema odabranom matematičkom modelu. Ukoliko dođe do neke neispravnosti to će se odraziti na odvijanje procesa – realno stanje neće odgovarti projektovanom. Slično obradi izmerenih fizičkih veličina radi uravljanja tehnološkim procesom, može se obradom podataka izvršiti identifikacija uzroka nastalog odstupanja u odvijanju tehnološkog procesa.

Integrисани ekspertska sistem u delu za dijagnostiku sadrži module baze podataka procesa, klasifikacije stanja procesa, generisanje simptoma, baze podataka procesne opreme, baze pravila donošenja odluka i korisnički interfejs. Integralno se prate karakteristike procesa i vrši dijagnostika kvara procesne opreme i kombinacijom usvojenih metoda generiše se predlog odluka, uključujući i bezbedno zaustavljanje tehnološkog procesa. Razvoj pouzdanog i jednostavnog dijagnostičkog sistema ostaje izazov, a odgovarajuće modeliranje, predstavljanje i upotreba osnovnih znanja o procesu su ključni za rešavanje ovog problema. U proteklom periodu u ovu svrhu su predložene različite tehnike, koje koriste procesno znanje iz različitih oblasti, u literaturi su nazvani metodama zasnovanim na modelu. Definicija „ekspertskega sistema u realnom vremenu“ je zasnovana na integrисanom heurističkom i analitičkom algoritmu i

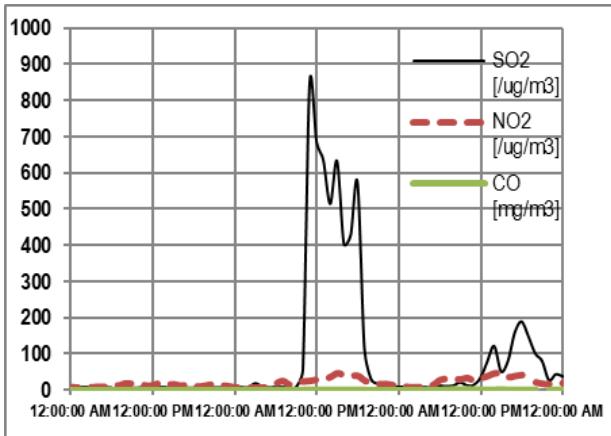
potpunu objektivno orijentisani predstavu sa dubokim poznavanjem strukture procesa, prvi put je primenjena u rafinerijama. Upotrebovi više oblasti znanja, uključujući ne samo pravila, već i modele materijalnog bilansa, energetskog bilansa i kinetike hemijskih reakcija može se spojiti u ekspertske sisteme.

Kvarovi i opadanje efikasnosti delova piro-metalurških postrojenja su izuzetno specifični, jer su delovi postrojenja izloženi mehaničkom, termičkom i hemijskom delovanju, kao i taloženju materijala. Fizičko stanje koje se identificiće kao potencijalni kvar ukazuje na to da je funkcionalni kvar neizbežan. Prateći funkciju postrojenja tokom eksploatacije možemo ustanoviti njenu degradaciju sve do otkaza [8].

Na dijagramu sa slike 4 je ilustracija mogućeg scenarija degradacije funkcije postrojenja koja je manifestovana smanjenjem sadržaja bakra u bakrencu. U slučaju preopterećanja, tj. neadekvatnog održavanja režima rada postrojenja, degradacija je intenzivnija. Interval P – F je interval u kome je identifikovana potencijalna greška (potential failure) i kada je moguće preuzeti aktivnosti za prevenciju greške i izbegavanje katastrofalne posledice te greške. Trenutak F je trenutak nastanka funkcionalne greške (functional failure), zbog kojeg postrojenje više nije u funkciji, a može doći do havarije. Kakve su posledice havarije po životnu sredinu može se videti sa dijagrama na slici 5.



Sl. 4. Dijagram degradacije funkcije



Sl. 5. Aero zagajenje u Boru 17. decembra 2020. godine [9]

Dakle, bitno je da se problem otkrije pre nego što se događaj razvije u „neki od nepoželjnih događaja“. Analitički i/ili heuristički modeli izračunavaju očekivano odvijanje tehnološkog procesa. Ekspertske sisteme zatim upoređuju očekivane performanse sa izmerenim performansama postrojenja.

Služeći se oznakama iz prikazanih relacija (3) i (4), znači – da se upoređuju izračunate vrednosti parametara stanja A_t ($A_t = \|a_{ij}\|$, $i, j = n$) na osnovu praćenja procesa i izmerene vrednosti promenljivih X_t ($X_t = \|x_i\|$, $i = n$) sa vrednostima prethodno izračunatim ili unapred zadatim graničnim vrednostima parametra stanja A_c ($A_c = \|a_{c_{ij}}\|$, $i, j = 1, n$) i graničnih vrednosti promenljivih X_c ($X_c = \|x_{c_i}\|$, $i = 1, n$). Postrojenje funkcioniše stabilno u skladu sa zadatim radnim uslovima koje je postavio rukovaoc postrojenja sve dok je zadovoljeno:

$$(\text{Abs}\{\delta_{Aij}\} \leq \|\delta_{Aij}^{max}\|, i, j = 1, n) \vee (\text{Abs}\{\delta_{Xi}\} \leq \|\delta_{Xi}^{max}\|, i = 1, n) \quad (6)$$

gde su:

$\delta_{Aij} = \|A_t - A_c\|$, $\delta_{Xi} = \|X_t - X_c\|$, a δ_{Aij}^{max} и δ_{Xi}^{max} matrice maksimalno dopuštenih odstupanja.

Integracija ekspertskega sistema u sistem za nadzor, praćenje i upravljanje tehnološkim procesom - pruža i kontinuirani uvid u stanje postrojenja. Degradacija performansi postrojenja tokom eksploatacije nije linearna funkcija i ona u stadijumu mogućeg otkaza pokazuje trend divergencije kako je prikazano na primeru dijagrama sa slike 4. Razvijen je čitav niz metoda za estimaciju trenda kao indikatora mogućeg otkaza, a vrlo često se koristi probabilistički pristup [10] (primena teorije verovatnoće).

4. ZAKLJUČAK

Svaki ispad piro-metaluršog postrojenja iz funkcije zbog havarije – može imati veoma štetne posledice. Posebno je složen problem u slučaju više vezanih otkaza, jer pored materijalne štete može doći do nekontrolisane emisije štetnih gasova i lebdećih čestica u atmosferu. Zbog toga je neophodna pravovremena dijagnostika, procena rizika od nastanka havarije i bezbedno zaustavljanje proizvodnog procesa radi rešavanja rizika od havarije, tj. otklanjanja otkrivene neispravnosti.

Klasični sistemi održavanja koriste samo baze podataka, a ekspertske sisteme koriste i baze znanja (model objekta održavanja, tehnike obrade informacija, iskustva, formule, simbole i dr.).

Korišćenjem ekspertskega sistema poboljšava se tehnička i fizička sigurnost postrojenja, smanjuje se verovatnoća nastanka loših scenarija, a u slučaju otkaza funkcije postrojenja – proizvodni proces se bezbedno zaustavlja bez havarija. Ustanovljena neispravnost se efikasno otključava po utvrđenom planu sa već specificiranim resursima u pogledu kadrova, materijala i potrebama za angažovanje trećih lica. Razmatrana mogućnost unapređenja održavanja fleš peći primenom ekspertskega sistema je veoma pogodno kako sa stanovišta poslovanja preduzeća tako i sa stanovišta materijalnih troškova. Nisu neophodne velike izmene u organizacionoj šemi preduzeća osim u sadržaju rada. Što se tiče postrojenja potrebna je izrada i implementacija ekspertskega softvera dodavanjem postojećem softveru za nadzor, praćenje i upravljanje.

LITERATURA

- [1] Fully Integrated SCADA Features, <https://www.vtscada.com/what-is-vtscada/#features>
- [2] E. Požega, L. Gomidželović, V. Trujić; HSC chemistry: Vizualizacija procesa topljenja bakra, Bakar, Vol. 35, 2 (2010) 33-40.
- [3] E.K. Jusoo, K. Leivisak; Adaptive Expert Systems for Metallurgical Processes, IFAC Expert Systems in Mineral and Metal Processing, Espoo, Finland 1991.
- [4] Outotec's proprietary ACT platform,
https://www.outotec.com/globalassets/products/analyzers-and-automation/ote_act_platform_eng.pdf
- [5] R. Haywood, D. J. Ranasinghe, S. Chen; The Development and Application of a CFD Model of Copper Flash Smelting, Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 7-9 December 2015.

- [6] J. Liu , W. Gui, Y. Xie, C. Yang; Dynamic Modeling of Copper Flash Smelting Process at a smelter in China, Applied Mathematical Modelling, Volume 38, Issues 7–8, 1 April 2014, Pages 2206-2213.
- [7] Sol. Jamsa-Jounela, E. Vapaavuori, T. Salmi, M. Gronbarj, M. Vermasvuori; Fault Diagnosis System for the Outokumpu Flash Smelting Process, IFAC Future Trends in Automation in Mineral and Metal Processing, Finland, 2000.
- [8] R. Riddell; The Reliability Impact with P – F Curve,
<https://reliabilityweb.com/articles/entry/the-reliability-impact-within-the-p-f-curve>
- [9] Objedinjeni prikaz automatskog monitoringa kvaliteta vazduha u Republici Srbiji, <http://www.amskv.sepa.gov.rs>
- [10] T. Dong, D. An, N. H. Kim; Efficient Bayesian-Based Prognostics Algorithm in MATLAB,
<https://www.intechopen.com/books/fault-detection-diagnosis-and-prognosis/prognostics-102-efficient-bayesian-based-prognostics-algorithm-in-matlab>

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 622.012:669.013:681.5.01(045)=163.41

Primljen: 25.05.2021.

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Prerađen: 27.05.2021.

Oblast: Ekonomija i menadžment

Prihvaćen: 31.05.2021.

UTICAJ DIGITALNE TEHNOLOGIJE NA ORGANIZACIONE PROMENE U RUDARSKO-METALUŠKIM KOMPANIJAMA U SRBIJI

THE IMPACT OF DIGITAL TECHNOLOGY ON ORGANIZATIONAL CHANGES IN THE MINING AND METALLURGICAL COMPANIES IN SERBIA

Slavica Miletić¹, Dejan Bogdanović², Miroslav Ignjatović³,
Zdenka Stanojević Šimšić¹, Ana Kostov¹

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor, Srbija,
E-mail: slavica.miletic@irmbor.co.rs

²Tehnički fakultet Bor, Univerzitet u Beogradu, VJ 12, 19210 Bor, Srbija

³Privredna komora Srbije, Resavska 13-15, 11000 Beograd, Srbija

Izvod

Digitalna tehnologija je jedan od glavnih trendova za današnje poslovanje koje prouzrokuje duboke promene u društvu i u organizacijama. Korišćenjem novih društvenih mreža, mobilnih uređaja, digitalne tehnologije omogućavaju velika poslovana poboljšanja i stvaranja novih organizacionih promena. Organizacije se usredsređuju na organizacione promene kroz digitalnu transformaciju kako bi bolje zadovolje promenljive potrebe potrošača. U ovom radu autori imaju za cilj da ilustriju pozitivan i negativan odnos između razvoja digitalne tehnologije i organizacionih promena.

Ključne reči: digitalne tehnologije, organizacione promene, rudarsko-metaluške kompanije

Abstract

Digital technology is one of the main trends for today's business causing the profound changes in society and organizations. Using the new social networks, mobile devices, digital technologies enable the major business improvements and creation of the new organizational changes. Organizations are focused on making the organizational changes through digital transformation to better meet the changeable needs of consumers. The aim of the authors in this paper is to illustrate the positive and negative relationship between the development of digital technology and organizational change.

Keywords: digital technologies, organizational changes, mining and metallurgical companies

1. UVOD

U današnje savremeno poslovanje digitalne tehnologije su efikasna sredstva za obavljanje svih organizacionih procesa, uključujući proizvodne, nabavne, distributivne i uslužne delatnosti. Digitalne tehnologije za vreme pandemije COVID-19 postigle su visok procenat održivosti i konkurentnosti orga-

nizacija. Digitalni razvoj je doneo novo doba poslovanja, digitalno poslovanje. Digitalna transformacija uključuje manje ili više duboke promene u poslovnom modelu organizacija. Digitalno poslovanje menja procese, resurse, organizacionu strukturu i kulturu, jednostavno menja strategiju organizacija.

Digitalizacija je donela nezabilazne promene u ekonomiji i menja način na koji preduzeća danas posluju [1]. Glavna svrha organizacionih promena je poboljšanje misije i vizije u cilju prilagođavanja globalnim promenama [2]. Digitalna transformacija je bogata tema istraživanja jer pokreće mnogo pitanja.

Jedno od pitanja istraživača je uticaj razvoja digitalne tehnologije na organizacione promene. U ovom radu zadatak autora je da ilustruju približna zapožanja organizacionih promena u rudarsko-metalurškim organizacijama u Srbiji razvojem digitalne tehnologije.

2. PREGLED LITERATURE

Svedoci smo vremena neprekidnih promena usled narušavanja digitalnih tehnologija koje uzrokuju transformaciju u načinu na koji tržište i organizacije uopšte posluju [3]. Tako da, današnje poslovanje ne može da se odvija bez digitalne tehnologije. Organizacije sprovode niz inicijativa za istraživanja blagodati pojave digitalne tehnologije poput internet stvari, društvenih mreža i mobilnih uređaja [4]. Po autoru Parviainen i njegovih saradnika [5], digitalizacija je jedan od glavnih trendova koji uzrokuje brze i radikalne promene u društvu i organizacijama. Digitalna transformacija donosi nezaobilazne organizacione i kulturne promene organizacije. Organizacione promene donose značajno poboljšanje strateškog odlučivanja i planiranja organizacija. Strategije digitalne transformacije su važne, jer odražavaju sve veću prisutnost promena koje su digitalne tehnologije donele u nekoj organizaciji [6]. Otuda, organizacije moraju da promene tradicionalne poslovne modele, koji su bili robusni već decenijama, i transformišu svoje organizacije kako bi se prilagodile tim trendovima [7,8].

Organizacije se bore da razviju i primene različite vrste promena kako bi odgovorile na brzi razvoj spoljnog okruženja (izazvanog tehnološkim, socijalnim, ekonomskim i političkim snagama) [9]. Organizacije primenom digitalne tehnologije menjaju organizaciono okruženje na način na koji bi mogле da odgovore na interne i eksterne uticaje zainteresovanih strana (korisnika, potrošača, zaposlenih, distributera, menadžera, vlasnika, sindikata, akcionara i države). Sa druge strane, organizacije moraju efikasno da deluju na različite izazove donešene razvojem digitalne tehnologije i da iskoriste prilike, jer se digitalizacija shvata kao osnovni prelaz društva za „digitalne“ generacije za koje su digitalne tehnologije duboko ukorenjene u svojoj svakodnevnoj praksi i kulturi [10]. Organizacione promene su takođe, povezane sa velikim očekivanjima od poboljšanja učinka [11].

Digitalna transformacija organizacije primorava da se preduzmu

korektivne mere, poput restrukturiranja kako bi ostale održive i konkurentne. Uspešna organizaciona promena zahteva prihvatanje zaposlenih [12]. Pozitivne organizacione promene kod zaposlenih donose zadovoljstvo u poslu. Pored pozitivnih organizacionih promena, javljaju se i negativne, gde se kod zaposlenih javlja strah od gubitka posla. Gubitak posla kod zaposlenih izaziva stres. Komunikacija o nastalim promenama može pomoći na umanjenju stresa i nesigurnosti među zaposlenim, što utiče na njihov odgovor na organizacione promene [13].

U postojećoj literaturi je omogućen opis upotrebe digitalne tehnologije poput velikih podataka i kao napredak digitalne tehnologije. Digitalna transformacija je donosila više ili manje duboke promene u poslovanju sadašnjih organizacija. Razvojem digitalne tehnologije, digitalizacijom je došlo do velikih organizacionih promena. Menjaju se ljudski resursi i organizacioni razvoj, promene nastaju i kod procesa proizvodnje, proizvoda i usluga. Digitalna transformacija je ključ poslovne konkurentnosti na promenljivom i sve zahtevnjem tržištu. Međutim, da bi se ova tehnološka reforma uspešno završila, potrebna je korporativna kultura koja promoviše inovacije i kreativnost u organizacijama. Od vitalnog je zanačaja da organizacije u toku pripreme digitalne transformacije stvore inovativnu i kreativnu kulturu.

U trenutnoj literaturi postoje radovi koji su obradili transformaciju digitalne tehnologije. Kao na primer, Albert i saradnici [3] su istraživali uticaj digitalne elektronike na automobilsku industriju; Henriette i saradnici [10] su istraživali izazove digitalne transformacije, Pieter de Groen i njegovi saradnici su dali studiju o uticaju digitalizacije i ekonomije na zahtev tržišta rada i posledice po zapošljavanje i industrijske odnose, itd.

3. ILUSTRACIJA UTICAJA DIGITALNE TEHNOLOGIJE NA ORGANIZACIONE PROMENE

Istraživanje se zasniva na osnovu prethodnog pregleda literature.

AHP (Analitički Higerarhijski Proces) metoda je jedna od najprimenljivih metoda višekriterijumskog odlučivanja (MCDM). AHP metoda ima jaku matematičku osnovu i izabrana je za kvalitetnu procenu pozitivnih i negativnih kriterijuma u radu.

Nalazi metodama višekriterijumske analize pokazuju da ocenom razvoja digitalne tehnologije pozitivni kriterijumi doprinose uspešnoj organizacionoj promeni digitalizacijom.

Pozitivne organizacione promene su:

- Prevazilaženje zastarele i stvaranje nove tehnologije rada;
- Stvaranje elektronskog poslovanja i plaćanja;
- Stvaranje novih načina poslovanja organizacije;

- Stvaranje spretne i okretne organizacione strukture i kulture;
- Postojeći modeli se menjaju u inovacione modele;
- Uklanjanje nedostataka u veštinama zaposlenih;
- Digitalno povezivanje korisnika sa kompanijom;
- Stvaranje poverenja korisnika u proizvode i usluge;
- Donošenje odluke na bazi podataka;
- Smanjenje ručnog rada;
- Smanjenje troškova;
- Razvijanje nove digitalne strategije;
- Povećanje profita i performansi kompanija;
- Održivost kompanija;
- Konkurentnost; i
- Povećanje zadovoljstva korisnika.

Na osnovu Analitičkog hijerarhijskog proces (AHP) proračuna pozitivnih kriterijuma, najvišu ocenu ima kriterijum C6 i zauzima prvo mesto, pošto njegov težinski koeficijenat iznosi 0,23597. Digitalna tehnologija donosi nove organizacione promene koje sa novim promenljivim okruženjem stvaraju zadovoljstva korisnika. Organizacije i korisnici se međusobno povezuju i izgrađuju poverenje. Današnje digitalno poslovanje ne podržava tradicionalne postupke već nalazi najbolje načine poslovanja gde se provodi proizvode u korist proizvođača i kupaca.

Pored toga, rezultati ukazuju na značajnu negativnu vezu sa primenom digitalne tehnologije u organizacijama. Istraživanja pokazuju da digitalizacija donosi i negativne organizacione promene.

Negativne organizacione promene su:

- Smanjenje broja zaposlenih;
- Obučavanje i prekvalifikacija zaposlenih;
- Ukidanje starih i stvaranje novih digitalizovanih radna mesta;
- Menjanje organizacione strukture i kulture;
- Stvaranje poteškoća i napetosti kod zaposlenih od nastalih digitalnih promena; i
- Razvijanje percepcije kod zaposlenih za upotrebu digitalnih sredstava, digitalizaciju.

AHP analiza kod negativnih kriterijuma, pokazuje da kriterijum C2 (nesigurna radna mesta) je ocenjen sa najvišom vrednošću, pošto je njegov težinski koeficijenat 0,44255. Digitalizacija transformiše organizaciono poslovanje, redefiniše proizvodne procese, celokupnu potrošnju, nabavku i distribuciju. Ovakvo poslovanje stvara nove proizvode i novo tržište, ali stvara poteškoće i

pretnje i za poslodavce i za zaposlene. Novi način zapošljavanja predstavlja nove izazove, stvara stres licima koji traže posao. Novo promenljivo tržište stvara neizvesnost, umesto potencijalnu korist. Uticaj digitalizacije menja staru organizacionu strukturu i kulturu, zatvara stara neprofitna radna mesta, a otvara nova profitna.

Istraživanja pokazuju pozitivnu vezu između organizacione promene i digitalne tehnologije. Pozitivna veza kao pozitivna promena zaposlenim donosi zadovoljstvo u poslu što smanjuje stres nastao digitalnim promenama. Digitalne promene posle pozitivnih operacija promene organizacije povećavaju zadovoljstvo korisnika i smanjuju nivo stresa zaposlenih na poslu. Negativni kriterijumi ukazuju na značajnu negativnu vezu između digitalne tehnologije i organizacione promene. Smanjuje se zadovoljstvo korisnika a pojačava stres zaposlenih na poslu.

Istraživanja dobijena SWOT (akronim engleskih reči: - *{Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats}* - snage, slabosti, prilike, pretnje) analizom pokazuju da konstantna komunikacija između menadžera i zaposlenih i odgovarajuća obuka o digitalnim promenama može pomoći u smanjenju stresa i nesigurnosti među zaposlenim (slika 1).

SWOT Matrix



27-Oct-11

www.Business-Docs.co.uk

5

Sl. 1. Matrica SWOT analize [14]

Komunikacija i obuka zaposlenih smanjuje otpor prema organizacionim promenama. Tako da, uticaj nadređenih na smanjenje stresa u jednoj organizaciji sprovedena SWOT analizom kao studija slučaja iznosi 2,91. Ovakav rezultat uvođenjem digitalne tehnologije organizacije primorava da se preduzmu korektivne mere. Organizacija menja pristup, uvodi sistem menadžmenta

kvalitetom (QMS), stalno koristi matematičke metode pri donošenju odluka, stvara digitalnu strategiju organizacije, itd. Jedna od metoda koja se najčešće koristi je SWOT analiza koja služi da prikaže snage, slabosti, prilike i pretnje organizacione promene. Sistem menadžmenta kvalitetom od menadžera organizacija zahteva čestu izradu SWOT analize u toku digitalne transformacije. Na osnovu dobijene SWOT analize menadžeri organizacija uspešnije grade digitalnu strategiju.

4. ZAKLJUČAK

Zaključci o uticaju digitalne tehnologije na organizacione promene u rudarsko-metaluškim organizacijama u Srbiji pokazuju:

- Da je neophodno uvođenje odgovarajućih mera u prevazilaženju negativnih organizacionih promena.
- Kod pozitivnih organizacionih promena potrebno je napraviti organizacione modele za efikasno prilagođavanje digitalnoj transformaciji.
- Digitalna organizaciona promena proizvođačima donosi veći profit, produktivnost, konkurentnost i održivost.
- Što se tiče potrošača, digitalne promene donose povećanom broju korisnika i boljim proizvodima i uslugama, kao i veće zadovoljstvo potrebama.
- Digitalna tehnologija je stvorila ogromne organizacione mogućnosti za promenu ljudskih resursa, promenu strategije, pojavljivanje novih procesa, proizvoda i usluga.
- Uticaj digitalne tehnologije na organizacione promene doneo je novi način zapošljavanja, nova radna mesta, a i nove izazove za zaposlene i poslodavce.
- Što je najvažnije digitalne organizacione promene stvaraju veću interakciju između kupaca, proizvođača i zaposlenih.

Digitalna transformacija je za autore bogata i zanimljiva tema za istraživanje, jer pokreće mnogo značajna pitanja u vezi današnjeg savremenog poslovanja.

ZAHVALNOST

Istraživanja predstavljena u ovom radu su urađena uz finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru finansiranja naučnoistraživačkog rada u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, prema ugovoru br. 451-03-9/2021-14/200052 i na Univerzitetu u Beogradu, Tehničkom fakultetu u Boru, prema ugovoru br. 451-03-9/2021-14/200131.

LITERATURA

- [1] Osmundsen, K., Iden, J., Bygstad, B., Digital transformation drivers, success factors, and implications, The 12th Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS), Korfu, Greece, 2018.
- [2] Castillo, C., Fernandez, V., Sallan, J.M., The six emotional stages of organizational change, *Journal of Organizational Change Management*, 31(3) (2018) 468-493.
- [3] Albert, C.L., Rubio, F., Valero, F., Impact of digital transformation on the automotive industry, *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, Vol. 162(C), (2021) 1-10.
- [4] Fitzgerald, M., Kruschwitz, N., Bonnet, D., Welch, M., Embracing Digital Technology: A New Strategic Imperative. *MIT Sloan Management Review*, 55(2) (2014) 1.
- [5] Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., Teppola, S., Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice, *International Journal of Information Systems and Project Management*, 5(1) (2017) 63–77.
- [6] Chanias, H., Understanding digital transformation strategy formation: insights from Europe's automotive industry, *Proceedings, PACIS 2016*, p. 296., <http://aisel.aisnet.org/pacis2016/296>.
- [7] Riasanow, T., Galic, G., Böhm, M., Digital transformation in the automotive industry: towards a generic value network, *European Conference on Information Systems (ECIS)*, Guimaraes, Portugal, 2017, Vol. 25.
- [8] Kotarba, M., Digital transformation of business models, *Found. Manag.*, 10 (2018) 123-142.
- [9] Hayajneha, N., Suifana, T., Obeidata, B., Abuhasheshc, M., Alshuridehd, M., Ra'ed Masa'deh, The relationship between organizational changes and job satisfaction through the mediating role of job stress in the Jordanian telecommunication sector, *Management Science Letters*, 11 (2021) 315–326.
- [10] Henriet, E., Feki, M., Boughzala, I., Digital Transformation Challenges, 10th Mediterranean Conference on Information Systems, Paphos, Cyprus, 2016.
- [11] Schneider, B., Brief, A.P., Guzzo, R.A., Creating a climate and culture for sustainable organizational change, *Organizational Dynamics*, 24(4) (1996) 7-19.

- [12] Fairbrother, K., Warn, J., Workplace dimensions, stress and job satisfaction, *Journal of Managerial Psychology*, 18(1) (2003) 8-21.
- [13] Wright, B.E., Christensen, R.K., Isett, K.R., Motivated to adapt? The role of public service motivation as employees face organizational change, *Public Administration Review*, 73(5) (2013) 738-747.
- [14] Pieter de Groen, V., Lenaerts, K., Romain Bosc, R., Pakuier, P., Impact of digitalisation and the on-demand economy on labour markets and the consequences for employment and industrial relations, Study, European Economic and Social Committee, Published by: Visits and Publications, Unit EESC-2017-71-EN, 2017, www.eesc.europa.eu,
<http://www.poljoklub.com/wp-content/uploads/2017/09/swot.jpg>

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 33:505/504(045)=163.41

Primljen: 31.05.2021.

NAUČNI RAD

Prerađen: 02.06.2021.

Oblast: Ekonomija i menadžment

Prihvaćen: 03.06.2021.

DRUŠTVENI FAKTORI ODRŽIVOG RAZVOJA TOPLIČKOG OKRUGA I METODE VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA ZA IZBOR OPTIMALNOG MODELA RAZVOJA

SOCIAL FACTORS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE TOPLICA DISTRICT AND MCDM FOR SELECTION THE OPTIMAL DEVELOPMENT MODEL

Marija Milenković¹, Jane Paunković², Violeta Jovanović², Vesna Krstić^{3,4}

¹Univerzitet u Nišu, Univerzitetski trg 2, Niš, Srbija

²Fakultet za menadžment Zaječar, Park šuma Kraljevica bb, 19000 Zaječar

³Institut za rudarstvo i metalurgiju, Zeleni bulaver 35, 19210 Bor

⁴Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, VJ 12, 19210 Bor

E-mail: majamil75@gmail.com; vesna.krstic@irmbor.co.rs

Izvod

Održivi razvoj uključuje uspostavljanje strateške ravnoteže između ekonomskih, socijalnih i ekoloških faktora razvoja na lokalnom, regionalnom, kao i globalnom nivou. Prilikom uspostavljanja ravnoteže između pomenutih faktora donosioci odluka se suočavaju sa brojnim ograničenjima. Ovo se može rešiti primenom i modifikovanjem faktorske analize i kombinovanjem sa metodama višekriterijumske analize MCDA (Multiple Criteria Decision Analysis) i metodama višekriterijumskog odlučivanja MCDM (Multiple Criteria Decision Making). Tako dobijena rešenja u obliku rangiranja, predstavljaju dobru podršku donosiocima odluka u pogledu izrade planova razvoja. U radu se analizira primena metoda višekriterijumskog odlučivanja kao pomoć prilikom izbora najpovoljnijih alternativa za održivi regionalni razvoj na primeru Topličkog okruga. Ispitivanja su pokazala da u okolini Kuršumlige ima olova, cinka i zlata i da bi u budućnosti moglo da dođe do eksploatacije, što bi uticalo na ekonomski rast Topličkog okruga. Rezultati istraživanja su pokazali da primena MCDA analize može da da podršku lokalnim vlastima prilikom donošenja odluka i izrade razvojnih planova.

Ključne reči: održivi razvoj, metode višekriterijumskog odlučivanja, Toplički okrug

Abstract

Sustainable development involves establishing a strategic balance between the economic, social and environmental factors of development at the local, regional as well as global levels. When balancing these factors, the decision makers face a number of limitations. This can be solved by applying and modifying a factor analysis and combining it with the MCDA (Multiple Criteria Decision Analysis) and MCDM (Multiple Criteria Decision Making) methods. The resulting solutions in the form of rankings, represent a good support to decision makers in terms of making the development plans. This paper analyzes the application of multi - criteria decision - making methods as an aid in selection the most favorable alternatives for the sustainable regional development on an example of the Toplica

District. Investigations have shown that there is lead, zinc and gold in the vicinity of Kuršumlija and that exploitation could occur in the future, what would affect the economic growth of the Toplica District. The results of investigation showed that the application of MCDA analysis can support the local authorities in making decisions and development plans.

Keywords: sustainable development, multi-criteria decision-making (MCDM), Toplica District

1. UVOD

Neravnomeren regionalni razvoj predstavlja kompleksan problem sa kojim se suočavaju zemlje u razvoju. Takođe, ovaj problem nije zaobišao ni Srbiju. Regionalni razvoj je tema koja se često pominje u ekonomiji, ali i među različitim subjektima, donosiocima odluka koje utiču na prosperitet i očuvanje vrednosti određenog regiona. Jedna od ovih vrednosti je prirodna osnova razvoja. Ekonomski gledano, prirodni resurs je nešto što može stvoriti dodatnu vrednost [1-3]. U ekološkom pogledu ovo je opravдан cilj, ali samo ako ta novostvorena dodatna vrednost doprinosi očuvanju životne sredine i njenom potencijalnom poboljšanju i unapređenju. Nema sumnje da postoji interakcija između prirodnog okruženja i ekonomskog sistema. Prirodni resursi se koriste za proizvodnju različitih dobara koje ljudi koriste za zadovoljavanje svojih potreba. Ali da bi se postigla održivost, neophodno je ulagati u očuvanje prirodnog okruženja, a ne samo uzimati iz okruženja i neplanski eksplorativati resurse koji se u prirodi mogu naći. Spoj ekologije i ekonomije koji treba da naprave ljudi (društvo) jedini je način za postizanje skladnog razvoja [4,5].

Na području opštine Kuršumlija otkrivene su pojave mnogih ruda metala i nemetala. Međutim, kolike se količine kriju u utrobi zemlje i kakav je kvalitet rudnog blaga još uvek nisu u potpunosti istraženi. Znatan broj ovih pojava i dalje je nepoznanica, tako da sistematska istraživanja tek treba da daju odgovore na ova pitanja.

U gornjotopličkom kraju postoji niz pojava olova i cinka, koja nisu sistemske istražene i ispitane. Na ovom području su otkriveni tragovi rude zlata, koja se nalazi na površinskim slojevima, u vidu kvarencih žica, u sastavu olova, cinka, bakra i srebra. Takođe, ovde ima značajnih količina nemetala bazalta.

Mnoga pitanja koja se odnose na regionalni razvoj već su utvrđena, ali ne u dovoljnoj meri i istražena. Ipak, pored brojnih poznatih pitanja, u praksi se ne prestano otkrivaju i nova, koja zahtevaju teorijsko istraživanje i praktičnu verifikaciju, što sugerise da je opšte pitanje regionalnog razvoja veoma složeno i još uvek neistraženo [6,7]. Prema dostupnim teorijskim i praktičnim saznanjima, postoji više pristupa analizi stanja i izboru rešenja regionalnog održivog razvoja. Najčešće istaknuti pristupi uključuju faktorski pristup, industrijski sektor i regionalni pristup, kao i pristupe zasnovane na praćenju osnovnih odrednica stopa

ekonomskog rasta i održivog razvoja koje su važne za podizanje životnog standarda [3,8,9].

Na bilo koji od posmatranih pristupa, uključujući i rudna bogatstva, utiču brojni parametri, koje treba analizirati, sistematizovati i obraditi pre nego što se iskoriste za kreiranje planova razvoja. Uz pravilnu modifikaciju, faktorski model je najbliži sistemskom pristupu koji podjednako analizira sve relevantne faktoare razvoja. Ono što trenutni faktorski model čini nepotpunim i nedovoljno istraženim jeste njegova nedovoljna metodološka jasnoća u pogledu koordinacije svih faktora koji utiču na izbor najpovoljnijeg scenarija regionalnog održivog razvoja. Uvođenjem metoda višekriterijumske analize i optimizacije faktorski pristup dobija status pogodnog integrisanog modela za istraživanje i planiranje regionalnog održivog razvoja.

U radu je dat pregled osnovnih društvenih faktora održivog razvoja Topličkog okruga, kao i metoda višekriterijumskog odlučivanja koje mogu poslužiti donosiocima odluka u ovom regionu prilikom izbora najpovoljnijeg rešenja za razvoj.

2. METODOLOGIJA

2.1. Koncept održivog razvoja

Koncept održivog razvoja postao je nezaobilazan faktor u analizama i planiranju regionalnog razvoja. U osnovi, koncept se zasniva na vezi koja se mora uspostaviti između ekonomskog razvoja, socijalnog prosperiteta i kvaliteta životne sredine. Ovi zahtevi bili su predmet mnogobrojnih istraživanja koja su sprovodili stručnjaci iz odgovarajućih oblasti, što je na kraju dovelo do konstituisanja Svetske komisije za životnu sredinu i razvoj [10], kako je predložila Generalna skupština UN-a, a kojom je predsedavala Gro Harlem Brundtland. Komisija je 1987. godine pripremila i objavila izveštaj pod nazivom Naša zajednička budućnost u kojem je data najkorišćenija definicija održivog razvoja.

Na samitu Zemalja u Brazilu u Rio de Žaneiru 1992. godine, ovaj dokument je označen kao ključni dokument za usvajanje Rio deklaracije o životnoj sredini i razvoju, kojom je zvanično uveden pojam održivi razvoj koji povezuje ekološka pitanja sa najznačajnijim socijalnim aspektima razvoja. U Izveštaju Komisije održivi razvoj se definiše kao „razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe“. Definicija jasno ističe tri osnovne komponente održivog razvoja: ekonomsku, socijalnu i ekološku, koje su sve povezane i međusobno zavisne. To stvara potrebu za

njihovom objedinjenom analizom i donošenjem odluka koje uzimaju u obzir sve tri komponente. Na samitu u Riju je usvojeno još nekoliko pomoćnih dokumenata koji su, u pogledu svog sadržaja i ciljeva, ostali aktuelni do danas. Dokument pod nazivom „Agenda 21“, se posebno ističe, jer sveobuhvatno razrađuje koncept održivog razvoja i strategiju neophodnih promena u odnosu prema prirodi i razvoju, a odnosi se na dvadeset i prvi vek. Ovaj dokument poziva lokalne vlasti da rade zajedno sa svojim lokalnim zajednicama na pripremi Lokalne Agende 21, odnosno lokalnih strategija za održivi razvoj.

Republika Srbija je bila aktivni učesnik u donošenju i primeni dokumenata, deklaracija, strategija i drugih dokumenata usvojenih na pomenutim samitima i konferencijama posvećenim životnoj sredini i održivom razvoju. Kada je u pitanju nacionalno zakonodavstvo i zakoni i strategije koje se odnose na održivi razvoj i zaštitu životne sredine, mogu se izdvojiti sledeći dokumenti: Zakon o zaštiti životne sredine [11] sa posebnim naglaskom na vodne resurse, šume, poljoprivredno zemljište, ribu i divljač, nacionalne parkove i opasne materijale; Nacionalna strategija održivog razvoja Republike Srbije 2007-2017, sa Akcionim planom za njeno sprovodenje [12] i Nacionalna strategija za održivu upotrebu prirodnih dobara i resursa [13]. Ovi dokumenti uključuju sve Milenijumske razvojne ciljeve (2000) koji obuhvataju borbu protiv siromaštva i nerazvijenosti, promovišu dalji ekonomski rast i zdravu životnu sredinu, kao i uopšte poboljšanje socijalnog standarda (zdravstvo, obrazovanje i socijalno osiguranje). Nakon Milenijumskih razvojnih ciljeva, Ujedinjene nacije su na samitu održanom septembra 2015. godine usvojile rezoluciju *A/RES/70/1 – Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Agenda 2030 je univerzalna strategija i od država potpisnica se očekuje da mobilišu sve resurse kako bi ciljevi bili ostvareni do 2030. godine. Agenda 2030, sa svih 17 ciljeva, uključuje tri dimenzije održivog razvoja: ekonomski rast, socijalnu inkluziju i zaštitu životne sredine. Vlada Republike Srbije je direktno učestvovala u razvoju i pisanju Agende održivog razvoja učešćem predstavnika države na globalnim forumima na kojima su definisani ciljevi održivog razvoja. Nalazi analiza monitoring izveštaja „Srbija 2030 – Pripremljenost za sprovođenje Agende 2030“ [14] ukazuju na to da su određeni procesi, koji su značajni za sprovodenje Agende 2030, započeti i u Srbiji. Započeti procesi uključuju i mapeiranje ciljeva održivog razvoja u odnosu na

postojeće planske dokumente. U svrhu mapiranja, 17 ciljeva održivog razvoja podeljeno je u četiri grupe:

1. Ekonomski rast (ciljevi 8 i 9);
2. Razvoj ljudskih resursa (ciljevi 1, 2, 3, 4, 5 i 10);
3. Životna sredina i klima (ciljevi 6, 7, 11, 12, 13 i 15);
4. Institucije, finansije i partnerstva (ciljevi 16 i 17).

Ova klasifikacija se koristi u nastavku pri odabiru ključnih faktora (ciljeva) regionalnog održivog razvoja potrebnih za analizu i metodologiju koja daje najpovoljnija rešenja za održivi razvoj Topličkog okruga. Toplički okrug je odabran kao ciljni region za upotrebu predložene metodologije, jer predstavlja gotovo idealan primer regiona koji se suočava sa izazovima održivog razvoja. Demografski, to je regija opterećena negativnim rastom stanovništva i migracijama. Ekonomski, to je jedan od okruga sa najnižim dohotkom po stanovniku sa nerazvijenom i nedovoljno diverzifikovanom ekonomijom.



Sl. 1. Geografski položaj Topličkog okruga [15]

U ekološkom smislu, to je okrug u Republici Srbiji sa bogatim biodiverzitetom i šumskim resursima i skromnim specifičnim prinosom vodnih resursa po stanovniku. Makro-lokacija Topličkog okruga prikazana je na slici 1. Toplički okrug se nalazi u južnom delu Srbije i dobio je ime po reci Toplici, čiji sliv gotovo u potpunosti odgovara administrativnim granicama okruga. To je ne razvijeno područje sa izraženom demografskom depopulacijom, ali je takođe bogato prirodnim resursima za razvoj poput tla i pošumljenog zemljišta pogodnog za razvoj poljoprivrede i prerađivačke industrije, kao i izvorima termalne i mineralne vode. Takođe, ovaj okrug karakterišu dobre infrastrukturne veze, pojave mnogih ruda metala i nemetala, niz pojava olova i cinka, koja nisu sistemske istražena i ispitana, tragovi rude zlata u vidu kvarcnih žica, u sastavu olova, cinka, bakra i srebra, i značajnih količina nemetala bazalta.

2.2. Faktori održivog regionalnog razvoja

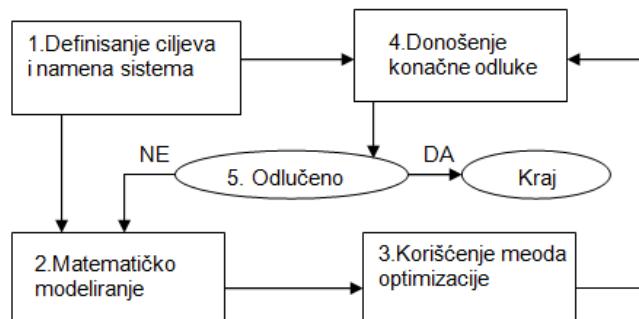
Savremeni pristup regionalnom održivom razvoju zahteva stvaranje ravnoteže između ekonomskih, socijalnih i ekoloških komponenti. Ekonomске komponente održivog razvoja definišu se rastom, produktivnošću i pravednom raspodelom bogatstva. Socijalne komponente uključuju učešće u donošenju odluka i podsticanje socijalnih dobrobiti za sve grupe stanovništva određenog regiona, u ovom slučaju Topličkog okruga. Komponente životne sredine uključuju očuvanje fizičke i biološke raznolikosti i zaštite prirodnih resursa.

Prema dostupnim informacijama [12,14] i praktičnom iskustvu u vezi sa upotrebljom faktorske analize za planiranje regionalnog održivog razvoja, sledeće grupe uticajnih faktora treba koristiti za pokrivanje gore pomenutih komponenti održivog razvoja: (1) Prirodni faktori (zemljište, šume, voda, mineralne sirovine), (2) Ljudski faktori (struktura stanovništva prema obrazovnoj kvalifikaciji i nivo obrazovanja), (3) Ekonomski faktori (poljoprivreda, prerađivačka industrija, usluge i turizam), (4) Društveni faktori (infrastruktura, zdravstvo, obrazovanje i kultura) i (5) Ekološki faktori i životna sredina (zaštita zemljišta, vode i šuma i odlaganje čvrstog otpada).

Većina ovih faktora je merljiva i podložna je numeričkoj analizi. Kvantificirani se obično procenjuju i izražavaju iskustveno. Analiza integrisanog uticaja gore pomenutih i drugih faktora na razvoj, kako u pogledu njihovog broja, tako i u pogledu fizičke varijanse veličina, trenutno je moguća samo pomoću nekih metoda faktorskih analiza, koje su razvijene u skladu sa principima MCDA i optimizacije. Na ovaj način se faktorska analiza može koristiti zajedno sa rezultatima koji su vremenom dobijeni, čime pružaju jasniji smer za regionalno planiranje održivog razvoja Topličkog okruga.

2.3. Višekriterijumska analiza faktora regionalnog razvoja

Planiranje regionalnog razvoja zasnovano na principima održivosti trebalo bi da se zasniva na analizi stanja i mogućnosti svake lokalne zajednice odnosno opštine i regiona u celini, uključujući i Toplički okrug, pod uticajem odabranih ekonomskih, socijalnih i ekoloških faktora razvoja [16,17]. Od brojnih matematičkih metoda razvijenih u svrhu rešavanja višekriterijumske problema, koji uključuju regionalni razvoj, ovaj rad se fokusira na grupu metoda višekriterijumske analize (MCDA), tj. metoda višekriterijumskog odlučivanja (MCDM). Najistaknutije metode iz ove grupe uključuju PROMETHEE, analitički hijerarhijski proces (AHP), ELECTRE i VICOR, koji nude rešenja u obliku rangiranja alternativa, pružajući najbolju alternativu ili skup alternativa koji ispunjavaju navedene uslove [9]. Dijagram osnovnih faza rešavanja problema procesom optimizacije prikazan je na slici 2. Svaka od ovih metoda definiše početni problem (npr. Regionalni održivi razvoj) putem matrice početnih odluka, koja sadrži moguće alternative sa faktorima (kriterijumi) koji utiču na njihov razvoj [18].



Sl. 2. Šematski prikaz procesa optimizacije [9]

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Vrednovanje efekata ekonomskog razvoja meri se njegovim doprinosom u unapređenju životnog standarda i uslova života stanovništva. Zdravstveno osiguranje, obrazovanje i infrastrukturna opremljenost, spadaju u najvažnije pokazatelje ostvarenog društvenog razvoja nekog regiona. Za Toplički okrug su upravo ovi pokazatelji izabrani kao uticajni faktori društvenog razvoja. Njihova merljivost i vrednovanje definisana je ostvarenim rezultatima u izgrađenim objektima od zajedničkog interesa kao i u pruženim uslugama u delu unapređenja zdravstvenog, obrazovnog, kulturnog i ukupnog standarda života

stanovnika. U tabeli 1 prikazan je društveni standard stanovništva kao faktor održivog razvoja Topličkog okruga.

Prevodenje početne matrice sa različitim fizičkim veličinama u normalizovani ili bezdimenzionalni oblik matematički se razlikuje kod navedenih metoda višekriterijumskog odlučivanja. Dakle, za svaku metodu postoji standardizovani matematički postupak prevodenja početne matrice u normalizovanu matricu. Međutim, ovo može stvoriti nesigurnost u pogledu korišćene metode i prikladnosti i sigurnosti predloženog najpovoljnijeg alternativnog rešenja za razvoj, pa se zbog toga preporučuje da se početni problem reši pomoću najmanje dve MCDA metode. To bi eliminisalo neizvesnost i verifikovalo rešenje za dalju upotrebu u praktičnom planiranju regionalnog održivog razvoja, kako je prikazano u tabeli 2. Za potrebe ovog rada izabrane su ELECTRE I metoda i VICOR metoda.

Tabela 1. Društveni standard stanovništva kao faktor održivog razvoja Topličkog okruga

Opštine Društveni standard	Kuršumlija	Blace	Prokuplje	Žitorađa	Toplički okrug
Opšti podaci					
Broj stanovnika	19213	11754	44419	16368	91754
Broj naselja	93*	40	107	30	270
Zdravstvena zaštita					
Broj lekara	34	19	165	17	235
Faktor razvoja - standard	11/565ct=0,0018	11/618ct=0,0016	11/269ct=0,0037	11/963ct=0,0010	11/390ct=0,0026
Obrazovanje					
Osnovno - broj škola	14	19	32	20	85
Faktor razvoja - (gustina škola)	14/90=0,16	19/40=0,48	32/107=0,3	20/30=0,67	85/270=0,32
Srednje - broj škola	2	1	4	1	8
Faktor razvoja - (gustina škola)	2/90=0,22	1/40=0,025	4/107=0,037	1/30=0,033	8/270=0,030
Više - broj škola	-	1	1	-	2
Faktor razvoja - (gustina škola)	-	1/40=0,025	0,009	-	0,007
Infrastruktura					
Dužina puteva (km)	556,85	200,20	339,57	94,00	1190,68
Faktor razvoja - izgrađenost (km/st.)	556,85/19213=0,029	0,017	0,008	0,006	0,014

*3 naselja su bez stanovnika, Izvor: RZS, Opštine i regioni u Republici Srbiji

Primena ELECTRE metode započinje početnom matricom odlučivanja i

sastoji se od sledećih koraka:

1. Izračunavanje normalizovane matrice odlučivanja;
2. Izračunavanje težinske normalizovane matrice odlučivanja;
3. Određivanje skupova saglasnosti i nesaglasnosti;
4. Određivanje matrica saglasnosti i nesaglasnosti;
5. Određivanje matrica saglasne i nesaglasne dominacije;
6. Određivanje matrice agregatne dominacije; i
7. Eliminisanje manje poželjnih akcija, tj. izbor najboljih alternativa.

Matematički proračun kod VICOR metode započinje se formiranjem matrice odlučivanja, a metoda se sastoji od sledećih koraka:

1. Normalizacija matrice;
2. Izračunavanje težinskih koeficijenata;
3. Izračunavanje matrice konačne odluke;
4. Rangiranje alternativa; i
5. Izbor najpovoljnijeg rešenja [18].

Rezultati ukazuju na nesporan položaj najbolje rangirane opštine Prokuplje (varijanta 3) u pogledu društvenog standarda stanovništva kao faktora održivog razvoja, u odnosu na ostale opštine (varijante 1, 2, 4). Opštine Kuršumlija i Blace (varijante 1 i 2) imaju određenu prednost u pogledu održivog razvoja u odnosu na najslabije rangiranu opštinu Žitorađa (varijanta 4) [18].

Zbog prednosti koje nudi predstavljeni model višekriterijumske analize, može se zaključiti da je model primenljiv i na druge probleme koji su relevantni za izradu razvojnih planova. Kada je u pitanju Toplički okrug, sve opštine ovog okruga (prikazane u tabeli 1) sigurno bi imale koristi od preporuka za donošenje odluka koje se zasnivaju na rangiranju prioritetnih privrednih grana koje treba razviti kako bi se poboljšalo trenutno stanje održivog razvoja [19,20].

Sledeće grupe razvojnih faktora su posebno istaknute u posmatranom okrugu: obrazovna kvalifikacija aktivnog stanovništva, poljoprivredno i obradivo zemljište i održivo korišćenje prirodnih resursa. Istaknute grane ekonomskog razvoja uključuju poljoprivredu, stočarstvo, preradivačku industriju, uslužni sektor i turizam. Matrice početnih odluka za rangiranje privrednih grana u koje bi trebalo ulagati i razvijati ih kreiraju se odvojeno za svaku opštinu u okrugu, a njihova numerička transformacija i obrada vrši se pomoću MCDA, tačnije ELECTRE [7] i VICOR [8] metode. Ovo na kraju rezultira rangiranjem privrednih grana koje bi trebalo razviti u svakoj opštini [19].

4. ZAKLJUČAK

Rezultati rangiranja alternativnih rešenja upotrebom metoda višekriterijumskog odlučivanja za postizanje održivog razvoja u opština Topličkog okruga i privrednih grana koje bi u njima trebalo razvijati ističu najpovoljnije rešenje. Dobijeni rezultati omogućavaju donosiocima odluka da ih koriste kao osnovne smernice prilikom kreiranja plana održivog razvoja za svoju zajednicu. Predstavljeni model višekriterijumske analize za planiranje razvoja Topličkog okruga, zasnovan na principima održivosti korišćen je za analizu više uticajnih faktora sa više alternativnih rešenja za razvoj opštine.

Obzirom da se u Topličkom okrugu, na području opštine Kuršumlija nalaze minerali metala, ispitivanja u ovom pravcu mogu obezbediti budući razvoj ekonomije ovog dela Srbije. Da bi se rešenja rangirala, a prema početnoj matrici odlučivanja, potreбно je koristiti najmanje dve metode višekriterijumske analize. Metode omogućavaju rangiranje predloženih alternativa i donošenje najboljeg kompromisnog rešenja. Prilikom rangiranja prvoplasirane alternative obično predstavljaju najpovoljnije rešenje za analizirani problem. Dobijeni rezultati pokazali su da je ova metodologija takođe pogodna i praktično primenljiva za rešavanje problema koji se odnose na regionalni, ekonomski, socijalni i ekološki razvoj Topličkog okruga. Održivi razvoj u odnosu na raspoložive prirodne resurse u regionu Topličkog okruga, može se planirati i primeniti pod uslovom da postoji mehanizam za efikasno praćenje i kontrolu procesa. Rezultati su pokazali da se predstavljeni MCDA model višekriterijumske analize može koristiti u ove svrhe.

LITERATURA

- [1] Yarnall, K., Olson, M., Santiago, I., Zelizer, C., Peace engineering as a pathway to the sustainable development goals. *Technological Forecasting and Social Change* 168 (2021) 120753.
- [2] Krstić, V., Radotić, M., Paunković, J., Jovanović, V., Pešovski, B., Upravljanje otpadom uvođenjem evropskih regulativa na primeru opštine Kragujevac, Bakar 1 (42) (1) (2017) 37-48.
- [3] Stojanović R., Optimalna strategija privrednog razvoja, Savremena administracija Beograd, 27, 1986.
- [4] RZS, Opštine i regioni u Republici Srbiji, Sl. Glasnik Republike Srbije, pp. 222-287, 2016.
- [5] Krstić, V., Paunković, J., Radotić, M., Jovanović, V., Upravljanje otpadom na primeru opštine Kragujevac, Bakar 42 (2) (2017) 29-38.

- [6] Volkan Oral, H., Ehsan Kakar, A., Saygin, H., Feasible Industrial Sustainable Development Strategies for the Herat Province of Afghanistan. *Technology in Society* 65 (2021) 101603.
- [7] Bernard R., Classement et choix en présence de points devue multiples (la méthode ELECTRE), Revue d'informatique et recherche opérationnelle, 6 (8), 57, 1968.
- [8] Opricović S., Tyeng G.-H., Extended VICOR method in comparison with outranking methods, *European Journal of Operational Research*, 178 (2007) 514-529.
- [9] Opricović S., Multi-criteria Optimization in Construction, Faculty of Civil Engineering, Beograd, pp. 119-171, 1998.
- [10] The World Commission on Environment and Development, "Our common Future", Oxford, New York, Oxford University Press, 1997.
- [11] Zakon o zaštiti životne sredine, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 135/2004, 36/2009, 72/2009, 43/2011.
- [12] Nacionalna strategija održivog razvoja Republike Srbije, Službeni glasnik Republike Srbije br. 57/2008.
- [13] Nacionalna strategija održivog korišćenja prirodnih resursa i dobara, Službeni glasnik Republike Srbije br. 32/2012.
- [14] Government of the Republic of Serbia, Public Policy Secretariat, Serbia and Agenda 2030, Beograd, 2019.
- [15] <http://www.toplicki.okrug.gov.rs/wp-content/uploads/2015/12/mapa.png>
- [16] Frankowski P., Zbierska J., Stansisewski R., Kayzer D., Effect of Newly Created Water Reservoirs on Agricultural Landscape Stability, *Pol. J. Environ. Stud.*, 28 (5), (2019) 3173.
- [17] Golumbeanu M., Nenciu M., Teohareva M., Stepanova K., Rubel O., Dyachenko A., Goriup N., Gilca A., Bilashvili K., Environmental Sustainable Tourism within the Black Sea Region, *J Environ Prot. Ecol.*, 15 (2), (2014) 574.
- [18] Milenković, M., Vaseashta, A., Vasović, D., Strategic Planning of Regional Sustainable Development Using Factor Analysis Method. *Pol. J. Environ. Stud.* 30 (1) (2021) 1-7.

- [19] Vujić, D., Karabašević, D., Maksimović, M., Novaković, S., The Role of Leaders in Creating an Organizational Culture that Fosters the Concept of Preservation the Natural Resources. *Mining and Metallurgy Engineering Bor* 1-2 (2019) 61-72.
- [20] Ignjatović, M., Miletić, S., Evaluation of the Sustainable Development Benefits in the Serbian Mining Companies. *Mining and Metallurgy Engineering Bor* 1-2 (2019) 61-72.

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 621.316(045)=163.41

Primljen: 18.01.2021.

NAUČNI RAD

Prerađen: 01.03.2021.

Oblast: Energetika

Prihvaćen: 05.04.2021.

PREDPROCESIRANJE U ANALIZI UTICAJA KAPACITIVNIH PARAMETARA VODOVA NA RAD ELEKTROENERGETSKE MREŽE

PRE-PROCESSING IN AN ANALYSIS THE IMPACT OF CAPACITIVE PARAMETERS OF LINES ON OPERATION THE ELECTRIC POWER NETWORK

Nenad Marković¹, Slobodan Bjelić², Filip Marković²

¹Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska,
Odsek Uroševac - Leposavić, 38218 Leposavić, Srbija

²Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini,
Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija

E-mail: nen.mark74@yahoo.com

Izvod

Pri projektovanju prenosnih električnih mreža i izboru parametara elemenata električnih šema, matematičkom modelu je potrebna računarska podrška algoritmima dobijenim analitičkim metodama i programima za simulaciju. Važan zadatak je izbor parametara i tipa mreže i sistema uzemljenja radi regulacije napona. Adaptirani paket programa psbtriphaselinbg.mdl MATLAB Simulink i predložena šema u radu su fleksibilni, jer se mogu prikazati režimi poremačaja u izabranom modelu električne mreže. Pored tačnosti u simulaciji napona i struja u tri faze, on omogućava i unapređenje modela mreže i programa kao i izmene koje ne sadrže ostali raspoloživi programske paketi.

Ključne reči: električna mreža, jednopolni metalni kratak spoj, parametar, kapacitivnost, uzemljenje

Abstract

In designing the transmission electrical networks and selection the parameters of elements of electrical circuits, the mathematical model needs a computer support in a form of algorithms obtained using the analytical methods and simulation programs. The selection of parameters and type of network and also selection of adequate grounding system for voltage regulation is considered to be an important task. The adapted package of the psbtriphaselinbg.mdl MATLAB Simulink program and scheme, proposed in this paper, are considered as flexible due to their ability to display the fault processes in selected electrical network model. In addition to the accuracy in voltage and current simulation in three phases, this package also enables the improvement of network and program models, as well as the other changes not included in similar available software packages.

Keywords: electrical network, single pole metal short circuit, parameter, capacitance, grounding

1. UVOD

Kratak spoj je slučajan ili nameran spoj provodnika, preko male otpornosti ili impedanse, između dve ili više tačaka, obično pod različitim naponom, a struja kratkog spoja je prekomerna struja stvorena zbog kvara ili pogrešnog spoja u električnom kolu. Ako kratak spoj nastaje neposrednim kontaktom provodnih delova sa različitim potencijalima, onda se takav kratak spoj naziva „metalni“ kratak spoj. Spojevi sa zemljom (zemljospojevi) su prolaznog karaktera [1].

Dozvoljena promena napona je do $\pm 5\%$ nominalnog napona na visokom naponu (VN) i srednjem naponu (SN) propisana IEC i nacionalnim standardima [2,3]. Važno pitanje koje se postavlja pred nama je na kom naponu (visokom, srednjem ili niskom naponu) treba ostvariti regulaciju napona? Regulacija napona zavisi od strukture mreže (IT, TN,...) i karakteristika opreme iako režim rada određuje faktor snage opterećenja [4,5,6].

Mreže sa izolovanom neutralnom tačkom (IT mreže) su u prednosti u odnosu na mreže sa uzemljenom neutralnom tačkom jer mogu da rade bez prekida i udara ako nastane zemljospoj [7]. U kablovskim mrežama kapacitivne struje su velike i stacionarni rad mreže nije pouzdan. Nedostatak tih mreža je pojava prenapona koje stvaraju kapacitivne struje i struje električnih lukova uspostavljenih između faznih provodnika i zemlje. Prenaponi mogu da izazovu proboj izolacije na ostalim fazama i stvore dvofazne i trofazne kratke spojeve [8].

U mrežama sa neposredno uzemljenom neutralnom tačkom, neutralne tačke se spajaju sa zemljom da se izbegne povećanje napona zdravih faza prema zemlji ako na nekoj fazi nastane zemljospoj. Prekomerne struje u kablovskim mrežama mogu da oštete kabl grejanjem aktivnih provodnika i metalnih delova omotača kroz koje dotiču delovi povratne struje [9]. U nadzemnim mrežama veće struje električnih lukova prostiru se ka susednim fazama stvarajući kratke spojeve. Ako se neutralne tačke spajaju sa zemljom može se odrediti impedansa uzemljenja prema dva kriterijuma: kompenzaciji struje zemljospaja i maloj impedansi uzemljenja.

Rešenja po ovim kriterijumima obezbeđuju pouzdan rad mreže pri proširenju, i način da se iz sistema IT mreže pređe u TN sistem uzemljene neutralne tačke. Kompenzacija struje zemljospaja i određivanje male impedanse odnosi se na definisanje parametara elemenata koji zavise od uslova rada. Zadate vrednosti su:

- ekstremne vrednosti (minimalna i maksimalna) struje zemljospaja u nesimetričnom sistemu,
- padovi napona i povećani naponi – prenaponi na faznim provodnicima.

2. ZEMLJOSPOJ-UTICAJ KAPACITIVNE KOMPONENTE STRUJE I NJENA KOMPENZACIJA U SLUČAJU ZEMLJOSPOJA FAZE C

Metod simetričnih komponenti se koristi u analizama jednostavnijih kvarova (kratki spojevi) i smetnji (prekidi faza) i može se verifikovati simulacijom na računaru i merenjem. Kao vektorski koncept je značajan za elektrotehniku i za trofazne mreže sa linearnim parametrima. Vektori se predstavljaju u Dekartovom sistemu sa realnom i imaginarnom osom [10].

U nesimetričnoj realnoj trofaznoj mreži je Z -impedansa na mestu zemljospoja a uslovi rada su:

$$I_A = I_B = 0, \quad V_C = ZI_C, \quad V_C = ZI_C \quad (1)$$

Jednačine faznih i simetričnih komponenti važe za sva nesimetrična stanja:

$$V_A = V_d + V_i + V_0, \quad V_B = a^2 V_d + aV_i + V_0, \quad V_C = aV_d + a^2 V_i + V_0 \quad (2)$$

Za jednofazni zemljospoj, struje u fazama jednofaznog kratkog spoja su:

$$\begin{aligned} I_A = 0 &\Rightarrow I_d + I_i + I_0 = 0, \quad I_B = 0 \Rightarrow a^2 I_d + aI_i + I_0 = 0, \\ I_C &= aI_d + a^2 I_i + I_0 \\ (1-a^2)I_d + (1-a)I_i &= 0 \Rightarrow (1-a)(1+a)I_d + \\ + (1-a)I_i &= 0 \Rightarrow I_i = -(1+a)I_d = a^2 I_d \\ I_A = 0 &\Rightarrow I_d - (1+a)I_d + I_0 = 0 \Rightarrow I_0 = aI_d \end{aligned} \quad (3)$$

Zatim je:

$$\begin{aligned} I_C &= aI_d + a^2 I_i + I_0 = aI_d - a^2(1+a)I_d + aI_d = 3aI_d - (1+a+a^2)I_d = 3aI_d \\ aV_d + a^2 V_i + V_0 &= Z \cdot I_C = Z \cdot 3aI_d \Rightarrow aV_d + a^2 V_i + V_0 = ZI_C \end{aligned} \quad (4)$$

Prema uslovima u sistemu faza, na osnovu sistema jednačina (2) formira se ekvivalentna šema simetričnih komponenti, slika 1.

Ako je $a^2 - a = -j\sqrt{3}$, $1 + a^2 = -a$, $a^2 + a = -1$, simetrične komponente napona su:

$$V_0 = (1/3)[V_A + V_B + V_C] = (1/3)[(1+a^2)V_d + (1+a)V_i + 2V_0 + 3Z \cdot aI_d]$$

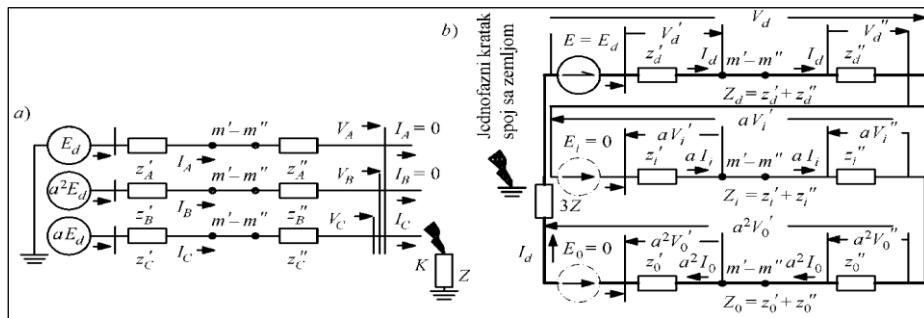
$$\begin{aligned}
3V_0 &= (1+a^2)V_d + (1+a)V_i + 2V_0 + 3Z \cdot aI_d \Big|_{aI_d=I_0} \Rightarrow \\
&\Rightarrow -V_0 = -(1+a^2)V_d - (1+a)V_i - 3Z \cdot aI_d \\
&- V_0 = aV_d + a^2V_i - 3Z \cdot aI_d / \cdot a^2 \Rightarrow -a^2V_0 = V_d + aV_i - 3ZI_d \Rightarrow \\
&\Rightarrow V_d + aV_i + a^2V_0 - 3ZI_d = 0
\end{aligned} \tag{5}$$

Iz osnovnih jednačina simetričnih komponenti [10], dobija se:

$$\begin{aligned}
E_d &= V_d + Z_d I_d \Rightarrow E_d = V_d + Z_d I_d \\
V_d &= E_d - Z_d I_d / \cdot a \Rightarrow aV_d = aE_d - aZ_d I_d \\
0 &= V_i + Z_i I_i, 0 = V_i + Z_i a^2 I_d \Rightarrow 0 = aV_i + Z_i I_d \\
V_i &= -Z_i a^2 I_d / \cdot a^2, a^2 V_i = -Z_i \cdot aI_d \\
0 &= V_0 + Z_0 I_0, 0 = V_0 + Z_0 \cdot aI_d \Rightarrow 0 = a^2 V_0 + Z_0 I_d \\
V_0 &= -Z_0 \cdot aI_d, V_C = aV_d + a^2 V_i + V_0 = a[E_d - (Z_d + Z_i + Z_0)I_d]
\end{aligned} \tag{6}$$

Prema relacijama (5) i (6) samo su impedanse Z_d , Z_i , Z_0 u rednoj vezi, ali se u mnogim referencama matematički nekorektno navodi redna veza tri simetrična sistema: direktnog, inverznog i nultog redosleda. Zbog toga su u ekvivalentnoj šemi, slika 1.a,b, u simetričnim komponentama unesene korigovane vrednosti:

$$\begin{aligned}
E_d, V_d, I_d, aV_i, I_d &= aI_i, I_i = a^2 I_d, \\
a^2 V_0, I_d &= a^2 I_0, I_0 = aI_d
\end{aligned} \tag{7}$$



Sl. 1. Ekvivalentne šeme jednofaznog kratkog spoja-zemljospoja:
a) faznih komponenti, b) simetričnih komponenti [10]

Kapacitivne struje teku ka zemlji i njihove vrednosti zavise od tipa električnog opštег distributivnog sistema (General Distributive System GDS). Poznato je da električne mreže 110 kV imaju direktno uzemljenu neutralnu tačku, a mreže 6-35 kV imaju izolovanu ili kompenzovanu neutralnu tačku uz pomoć Petersenovih prigušnica. Prema IEC standardu električna mreža može da ostane u radnom stanju (pogonu), ako kapacitivne struje imaju sledeće vrednosti u odnosu na napone: 6 kV, $I \leq 30$ A; 10 kV, $I \leq 20$ A; 35 kV, $I \leq 10$ A, 110 kV, $I \leq 10$ A. Ako su struje veće od datih vrednosti moraju se ugraditi neki uređaji za njihovo ograničenje (kompenzatori).

Fazne komponente su u odnosu na simetrične komponente definisane relacijama [10]:

$$\begin{aligned} V_A &= V_d + V_i + V_0, V_B = a^2 V_d + a V_i + I_0, V_C = a V_d + a^2 V_i + I_0 \\ I_C &= a I_d + a^2 I_i + I_0, V_g = -Z_g I_0 \end{aligned} \quad (8)$$

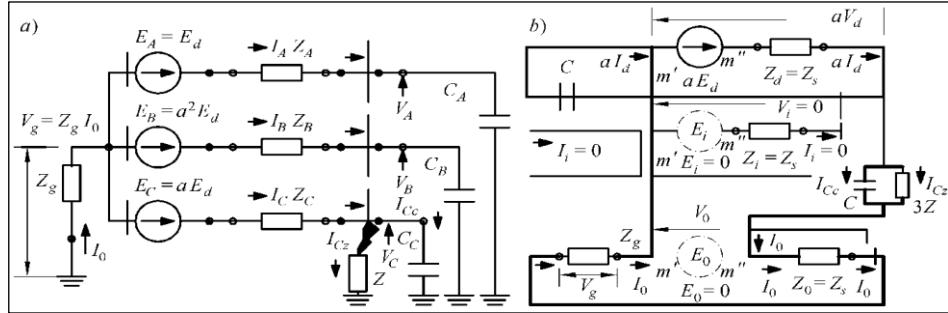
Na mestu poremećaja uslovi su:

$$\begin{aligned} I_A &= j\omega C_A V_A, I_B = j\omega C_B V_B, I_C = j\omega C_C V_C + \frac{V_C}{Z} = \left(\frac{1 + j\omega C_C Z}{Z} \right) V_C \\ V_C &= \frac{Z}{1 + j\omega C_C Z} I_C, V_C = Z I_{Cz} \\ j\omega C_A \cdot V_A &= I_d + I_i + I_0, j\omega C_B \cdot V_B = a^2 I_d + a I_i + I_0 \\ I_C &= \left[1 - \frac{j}{\omega C_C Z} \right] \cdot j\omega C_C V_C = j\omega C_C V_C + \frac{V_C}{Z} \end{aligned} \quad (9)$$

Rešavanjem sistema jednačina (9) gde su $Z_A = Z_B = Z_C = Z_s$ i $E_A + E_B + E_C = [1 + a^2 + a] E_d = 0$, dobija se:

$$I_0 = \frac{1}{3} [I_A + I_B + I_C] = \frac{1}{3} j\omega C [V_A + V_B + V_C] + \frac{V_C}{3Z} = j\omega C V_0 + \frac{V_C}{3Z} \quad (10)$$

Iz izvedenih relacija formirana je šema faznih i simetričnih komponenti, slika 2.



Sl. 2. Ekvivalentne šeme jednofaznog kratkog spoja faze C:
a) faznih komponenti sa uslovima, b) simetričnih komponenti [10]

U konačnom obliku, prema šemi na slici 2, veličina struje i napona nultog redosleda koja u sebi sadrži i kapacitivnu komponentu je:

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{aE_d}{(1 + j\omega CZ_s)[3Z + (1 + j\omega CZ)(Z_g + Z_s)]} \\ V_0 &= \frac{aV_d(Z_g + Z_s)}{[3Z + (1 + j\omega CZ)(Z_g + Z_s)]} \end{aligned} \quad (11)$$

Prema II Kirhofovom zakonu konačne vrednosti napona su:

$$\begin{aligned} V_A &= V_d + V_i + V_0 = E_d \frac{(1 - a^2)Z_i + (1 - a)Z_0 + 3Z}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \\ V_B &= a^2V_d + aV_i + V_0 = E_d \frac{(a^2 - 1)Z_i + (a^2 - a)Z_0 + a^2 3Z}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \\ V_C &= aV_d + a^2V_i + V_0 = E_d \frac{(a - a)Z_i + (a - a)Z_0 + a 3Z}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} = \\ &= E_d \frac{a 3Z}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \end{aligned} \quad (12)$$

Jednofazni kratak spoj bez zemljospoja $Z = 0$ -struja kratkog spoja je:

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_d + I_{i|I_i=0} + I_0 = I_d + I_0 \\
 I_A &= j\omega CV_A = j\omega C \frac{E_d}{1 + j\omega CZ_s} \left[1 - \frac{a(Z_g + Z_s)}{3Z + (1 + j\omega C3Z)(Z_g + Z_s)} \right] \\
 I_B &= a^2 I_d + aI_{i|I_i=0} + I_0 = a^2 I_d + I_0 \\
 I_B &= j\omega CV_B = j\omega C \frac{a^2 E_d}{1 + j\omega CZ_s} \left[1 - \frac{a^2(Z_g + Z_s)}{3Z + (1 + j\omega C3Z)(Z_g + Z_s)} \right] \quad (13) \\
 I_C &= aI_d + a^2 I_{i|I_i=0} + I_0 = aI_d + I_0 \\
 I_C &= j\omega CV_C = j\omega C \frac{aE_d}{1 + j\omega CZ_s} \left[1 - \frac{(Z_g + Z_s)}{3Z + (1 + j\omega C3Z)(Z_g + Z_s)} \right]
 \end{aligned}$$

Struja zemljospoja faze C koja sadrži i kapacitivnu komponentu $V_C = ZI_{cz}$ je:

$$I_{cz} = \frac{V_C}{Z} = \frac{aV_d + V_0}{Z} = \frac{1}{Z} \frac{a^2 E_d}{1 + j\omega CZ_s} \left[1 - \frac{(Z_g + Z_s)}{3Z + (1 + j\omega C3Z)(Z_g + Z_s)} \right] \quad (14)$$

Uslove rada mreže, u principu određuje raspodela struja I_0 . Pri zemljospojevima jedne faze na vodu, u ovom slučaju faze C (na primer u tački K) na mestu kvara nastaje napon nultog redosleda V_C , pod čijim dejstvom protekne struja nultog redosleda I_0 , koja se zatvara kroz kapacitivnost (faznu) svakog voda.

Kapacitivna struja nultog redosleda prolazi kroz sve „zdrave“ i vodove u kvaru. Kroz zdrave fazne vodove A i B prolaze kapacitivne struje nultog redosleda ($3I_{0A}$, $3I_{0B}$) usmerene ka sabirnicama, i zatvaraju se kroz fazne kapacitivnosti tih vodova CA = C i CB = C.

Kapacitivna struja kroz vod u kvaru C, I_{C_c} , je usmerena od sabirnica ka mestu zemljospoja, tj. suprotna je smeru struje u zdravim vodovima. Raspodela struja pokazuje da se u nekompenzovanoj mreži mogu koristiti usmerene zaštite koje reaguju na reaktivnu snagu nultog redosleda, uslovljenu kapacitivnom strujom.

3. SIMULACIJA ANALITIČKIH PRORAČUNA I REZULTATI

Za simulaciju rada mreže pri zemljospoju koristi se šema na slici 2.a. Za verifikaciju modela i algoritma poslužio je adaptirani MATLAB program psbtriphaselinbg.mdl [11] i šema na slici 2.a sa sledećim parametrima:

Sistem: $S_{nS} = 250$ (MVA), $U_{nS} = 15.75$ (kV), R_S (p.u) = 0.01, X_S (p.u) = 1.2.

Transformator: $S_{nT} = 250$ (MVA), $U_{n1} = 15.75$ (kV), $U_{n2} = 220$ (kV), $r = 3$ (%), $x = 12$ (%).

Vod: $R_1 = 0.057$ (Ω/km), $X_1 = 0.419$ (Ω/km), *Dužina:* $l = 100$ (km).

Opterećenje: $P = 5$ (MW), $Q = 4$ (MVAr).

Za $S_b = S_n = S_{nS} = 250$ (MVA), $U_b = U_n = 220$ (kV), ostale bazne vrednosti su:

$$R_{base} = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{220^2 \cdot 10^6}{250 \cdot 10^6} = 193.6 \text{ } (\Omega), R_{pu} = \frac{R(\Omega)}{R_{base}} = \frac{R(\Omega)}{193.6(\Omega)}$$

$$L_{base} = \frac{R_{base}}{2\pi \cdot f_n} = \frac{193.6}{314} = 0.617 \text{ } (\text{H}), L_{pu} = \frac{L(H)}{L_{base}} = \frac{L(H)}{0.617(H)}$$

$$C_{base} = \frac{1}{R_{base} 2\pi \cdot f_n} = (193.6 \cdot 314)^{-1} = 16.45 \cdot 10^{-6} \text{ } (F) = 16.45 \text{ } (\mu\text{F}),$$

$$C_{pu} = \frac{C(\mu\text{F})}{C_{base}} = \frac{C(\mu\text{F})}{16.45(\mu\text{F})}$$

Pošto su otpornosti direktnog i inverznog redosleda sistema jednake i iznose $R_{1s} = R_{2s} = R_s$, kao i reaktanse direktnog i inverznog redosleda $X_{1s} = X_{2s} = X_s$, to su odgovarajuće otpornosti i induktivnosti:

$$Z_{1s} = Z_{2s} = R_s + jX_s \text{ } (\Omega)$$

$$R_{1s} = R_{2s} = R_{s,pu} R_{base} = 0.01 \cdot 193.6 = 1.936 \text{ } (\Omega)$$

$$L_{1s} = L_{2s} = L_{s,pu} L_{base} = 0.12 \cdot 0.617 = 0.074 \text{ } (\text{H})$$

Za Al-Fe uzemljeni jednostruki 220 kV vod $S = 3 \times 150/15$ (mm^2), direktna i inverzna komponenta impedanse su jednake i iznose $Z_{1,2} = l(R_{1,2} + jX_{1,2}) = 100 \cdot (0.057 + j0.419)$ (Ω/km), dok su otpornost i reaktansa:

$$R_v = l \cdot R' = 100 \cdot 0.057 = 5.7 \text{ } (\Omega), \quad R'_{1,2} = 0.057 \text{ } (\Omega/\text{km})$$

$$X_v = l \cdot X' = 100 \cdot 0.419 = 41.9 \text{ } (\Omega)$$

$$L'_{1,2} = X'_{1,2} / 2\pi \cdot f_n = 0.419 / 314 = 0.00133 \text{ } (\text{H/mm})$$

Nulta impedansa je:

$$Z_0 = 1.2 \cdot Z_{s,1,2} = 1.2 \cdot l(R'_0 + jX'_0) = 100 \cdot (0.0684 + j0.0016) \text{ } (\Omega/\text{km})$$

Konduktansa je određena iz sledeće formule:

$$B = bl = 3.67 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 3.67 \cdot 10^{-4} \text{ } (\text{S/km})$$

$$B = \omega C \Leftrightarrow C_{1v} = C_{2v} = \frac{B}{\omega} = 11.66 \cdot 10^{-9} \text{ } (\text{F/km}),$$

$$C_{0v} = \frac{2}{3} C_{1v} = 7.8 \cdot 10^{-9} \text{ } (\text{F/km})$$

Za transformator ABB, $P_{Sn} = 250 \text{ MVA}$, $U' / U'' = 15.75 / 220 \text{ kV}$, D1Yn

je:

$$R_{1t} = \frac{1}{2} u_{kr\%} \frac{U_t^2}{S_t} = \frac{1}{2} \cdot 0.03 \cdot \frac{220^2 \cdot e^6}{250 \cdot e^6} = 2.9 = R_{2t} \text{ } (\Omega),$$

$$R_{1t} = R_{2t} = 0.015 \text{ (p.u)}$$

$$X_{1t} = \frac{1}{2} u_{kr\%} \frac{U_t^2}{S_t} = \frac{1}{2} \cdot 0.12 \cdot \frac{220^2}{250} = 11.61 = X_{2t} \text{ } (\Omega)$$

$$L_{1t} = L_{2t} = 0.037 \text{ (H)}, \quad L_{1t} = L_{2t} = \frac{0.037}{0.617} = 0.06 \text{ (p.u)}$$

Reaktansa nultog redosleda zavisi od spoja namotaja transformatora. Spoj namotaja na strani generatora je trougao, pa se nulta komponenta u njemu ne može zatvoriti. Prema IEC standardu [2] ako je namotaj spojen na uzemljenu zvezdu na strani sistema, nulta reaktansa transformatora je:

$$R_{01t} = R_{02t} = 0.85R_{1t} = 2.465 \text{ } (\Omega),$$

$$R_{01t} = R_{02t} = 0.85R_{0t} = \frac{2.465}{193.6} = 0.0273 \text{ (p.u)}$$

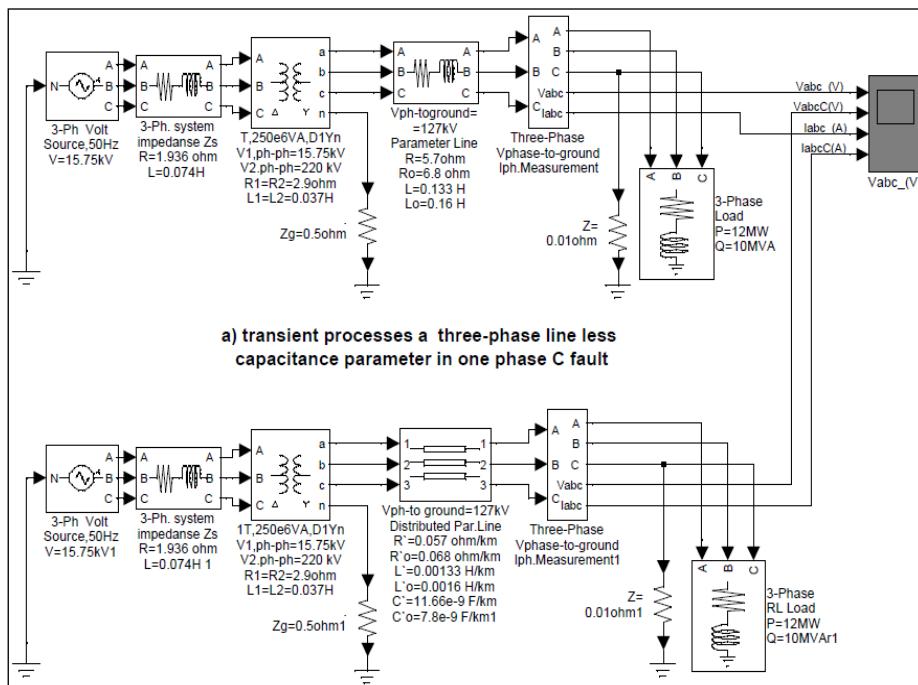
$$L_{01t} = L_{02t} = 0.85L_{1t} = 0.03145 \text{ } (\Omega), \quad L_{01t} = L_{02t} = 0.85L_{1t} = 0.051 \text{ (p.u)}$$

4. MODEL SIMULACIJE I DIJAGRAMI SIMULACIJE

U cilju provere prethodno izvedenih jednačina zemljospojeva izvedena je simulacija u delu programa MATLAB Simulink Power Sym paketa pod nazivom psbtriphaselinbg.mdl, slika 3 (prema razvijenom matematičkom modelu u delu 2) [11]. Dobijeni dijagrami, slika 4, potvrđuju da su izvedene relacije u saglasnosti sa zadatim vrednostima u modelu simulacije.

MATLAB Simulink programi dosta tačno simuliraju zemljospojeve, ali sopstveni razvoj kako modela, tako i programa, ima posebne prednosti kao što je detaljan uvid u sve komponente modela i programa i unošenje različitih izmena koje se inače ne bi mogle uneti u raspoložive programske pakete.

Prednost simulacije u odnosu na praktičan model (eksperiment) je u tome što je ona potpuno bezopasna za pogonski sistem i personal, a pri tome se dobijeni rezultati veoma dobro slažu sa realnim stanjem i procesima.



Sl. 3. Šema za simulaciju zemljospoja faze C: a) bez uticaja parametra kapacitivnosti faze C, b) sa uticajem parametra kapacitivnosti faznog provodnika C na vrednosti napona i struja

U šemci na slici 3.a simuliran je tranzijentni proces pri zemljospoju faze C bez uticaja parametra kapacitivnosti faznog foda C, a na slici 3.b tranzijentni proces pri zemljospoju faze C kada je uzet u obzir uticaj parametra kapacitivnosti faznog provodnika C na vrednosti napona i struja. Naponi napajanja faznih vodova A, B i C su isti u oba slučaja: $220/\sqrt{3} \approx 127$ kV kao i dužine deonica $l = 100$ km. Parametri ostalih elemenata „jake“ električne mreže su prethodno opisani u ovom delu rada i prikazani na slici 3.

U režimu rada radikalne mreže kada su tri faze VN prenosnog voda jednako opterećene, mera za povećanje kvaliteta je veća pouzdanost, ali je ona tehnički ograničena. Razlog ograničenja su nejednakе fazne struje i struje koje otiču ka zemlji u slučaju zemljospoja, i dr.

Na slici 4 su dati simulacioni dijagrami lutajućih struja i napona.

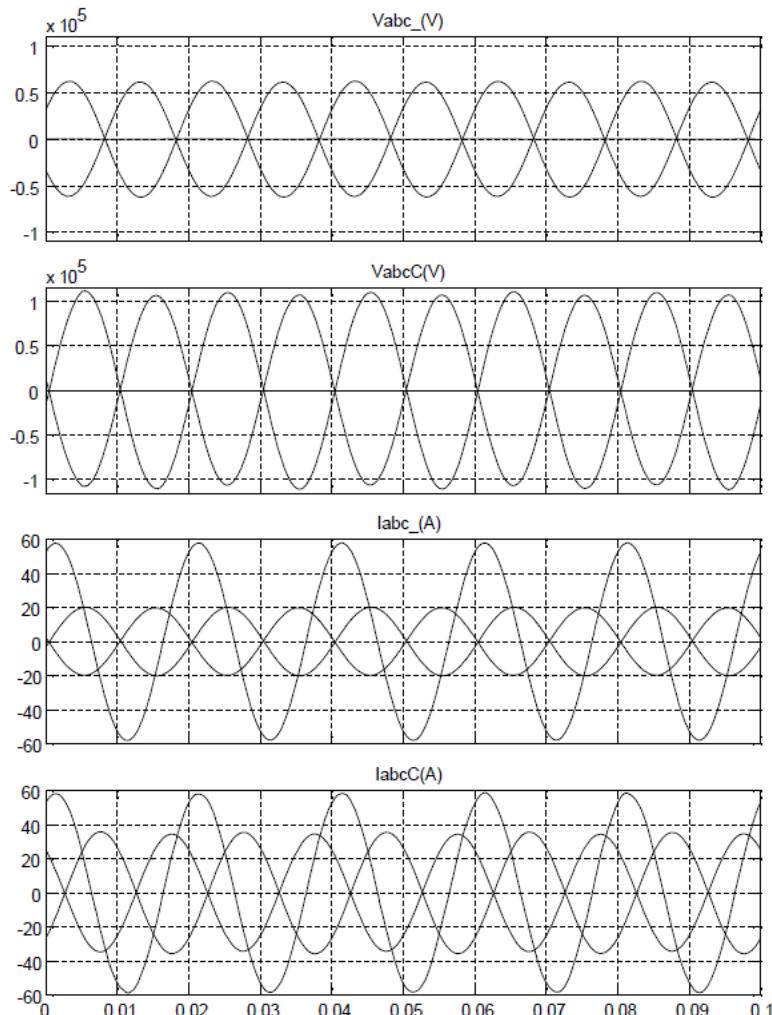
Analiza dobijenih dijagrama napona i struja pokazuje da parametar kapacitivnosti voda nema uticaja na oblike napona, a izuzetak je napon faze C čija je vrednost na vodu jednak nuli. Parametar kapacitivnosti voda ima uticaja na vrednosti napona zdravih faza, jer u sve tri faze skoro da „održava“ napon „zdravih faza“ A i B na nazivnoj vrednosti, što je u skladu sa relacijama (12), (5) i (8). Za razliku od napona, pri zemljospoju na fazi C pod uticajem parametra kapacitivnosti, vrednosti struja „zdravih“ faza su skoro dva puta veće u odnosu na vrednosti koje se dobijaju ako se ne uzme u obzir parametar kapacitivnosti. Analiza dobijenih oblika dijagrama pokazuje veliki uticaj parametra kapacitivnosti na vrednosti napona i struja.

Prednosti MATLAB-a su veliki broj mogućih simulacija, a rezultati tih simulacija, oblici i karakteristične vrednosti dobijenih talasnih dijagrama verifikuju predloženi metod za razmatranje tranzijentnih procesa zemljospoja faze C bez i sa uticajem parametra kapacitivnosti.

Gotovi MATLAB Simulink programi dosta tačno simuliraju tranzijentne procese, ali sopstveni razvoj kako modela, tako i programa, ima posebne prednosti kao što je detaljan uvid u sve komponente modela i programa i unošenje različitih izmena koje se inače ne bi mogle uneti u raspoložive programske pakete.

Prednosti MATLAB-a su veliki broj mogućih simulacija, a rezultati tih simulacija, oblici i karakteristične vrednosti dobijenih talasnih dijagrama verifikuju predloženi metod za razmatranje tranzijentnih procesa zemljospoja faze C bez i sa uticajem parametra kapacitivnosti.

Gotovi MATLAB Simulink programi dosta tačno simuliraju tranzijentne procese, ali sopstveni razvoj kako modela, tako i programa, ima posebne prednosti kao što je detaljan uvid u sve komponente modela i programa i unošenje različitih izmena koje se inače ne bi mogle uneti u raspoložive programske pakete.



Sl. 4. Simulacioni dijagrami lutajućih struja i napona

5. ZAKLJUČAK

U radu je ispitana mogućnost ograničenja struje kratkog spoja primenom otpora u neutralnoj tački, a za potrebe simulacije adaptiran je deo programskog paketa MATLAB čije su grafičke interpretacije prezentovane. Otpornost neutralne tačke je modelovana impedansom aktivno-induktivnog karaktera, a njen uticaj je testiran za električnu mrežu u kojoj je kvar simuliran na fazi C, a mesto kvara napaja se iz mreže 220 kV.

Osnovni problem koji se javlja je, kako stvoriti što verniji matematički model oslonjen na što tačniju strukturu elektroenergetske mreže u kojoj se mogu analizirati promene u režimu poremećaja.

Iz oblika dijagrama se vidi da izabrana vrednost omske otpornosti prigušuje sve više harmonike komponenti nultog redosleda, odnosno iz oblika struja i napona jasno je da su one prigušene. U toku trajanja kratkog spoja od – 0.1 s, omska otpornost uzemljenja i parazitna kapacitivnost faze pogodene kvarom podižu vrednosti napona i struja zdravih faza. Realna prenosna električna mreža se razlikuje od idealne mreže, pored ostalog i zato što se neprestano menja faktor snage ($\cos \varphi$). To unosi velike teškoće u proračune i analize naponskih režima rada realnih elektroenergetskih mreža, ali se teškoće mogu otkloniti simulacijom uz podršku računara. Iz analize osnovne strukture električne mreže u dva slučaja, uz izvesna saznanja dobijena iz usvojene strukture prenosne električne mreže, mogu se sa uspehom odrediti vrednosti parametara elemenata mreže, i posebno uzemljenja koji poboljšavaju kvalitet napona napajanja na zadatom opterećenju.

LITERATURA

- [1] Westerman-Elektrotehnički priručnik, Građevinska knjiga, 2003.
- [2] Standard IEC 60038, International Electrotechnical Commission-IEC Standards, <http://www.iec.ch/>
- [3] ISS, Institut za standardizaciju Srbije, <http://www.iss.rs/standard/>
- [4] S. Bjelić, Uvod u srednjenaaponske (SN) i niskonaponske (NN) mreže i instalacije, Sven, Niš, 2007.
- [5] R.D. Garzon, High Voltage Circuits Breakers, Design and Applications, Second Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker Inc, December 1, 1996, <http://www.scribd.com/doc/112921269/High-Voltage-Circuit-Breakers-Design-and-Applications-2E-Ruben-D-Garzon#scribd>
- [6] N. Marković, S. Bjelić, F. Marković, Poboljšanje kvaliteta napona u elektroenergetskim mrežama kompenzacijom reaktivne snage pomoću kondenzatorskih baterija, Bakar/Copper, 45 (2020) 2, 57–70.
- [7] V. Milićević, S. Bjelić, N. Marković, U. Jakšić, Simulacija prelaznih procesa u distributivnim mrežama srednjeg napona (10-35 kV), BizInfo, 1 (2014) 5, 83–93.
- [8] N. Marković, S. Bjelić, J. Živanić, U. Jakšić, Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89 NR 2a/2013 (2011), 113–117.

- [9] B. Jovanović, S. Bjelić, N. Marković, Transient Processes on the Elements of Underground Installations, International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS), MECS Publisher, DOI: 10.5815/ijitcs, 9, (2017) 9, 1–10.
- [10] S.N. Bjelić, Atmosferski i komutacioni prenaponi u električnim distributivnim mrežama, Kvark, Kraljevo, 2020, prilog 4, 154–185.
- [11] MATLAB SIMULINK Sim Power System, Copyright 1984-2002 The Math Works, Version 6.5.0, 180913a, June 2, 2000.

BAKAR 46 (2021) 1 COPPER

UDK: 621.314/.316:681.5(045)=163.41

Primljen: 29.01.2021.

NAUČNI RAD

Prerađen: 05.03.2021.

Oblast: Elektronika

Prihvaćen: 13.04.2021.

ALGORITAM I SIMULACIJA TRANSIENTNIH PROCESA OPTEREĆENOG I NEOPTEREĆENOG TRANSFORMATORA U ELEKTRIČNOJ MREŽI

ALGORITHM AND SIMULATION OF A TRANSIENT PROCESS ON LOADED AND UNLOADED POWER TRANSFORMERS IN AN ELECTRICAL NETWORK

Slobodan Bjelić¹, Nikola Milenković², Irena Milojević³

¹Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Prištini

²Visoka škola za menadžment i ekonomiju u Kragujevcu

³Institut primenjenih nauka doo Beograd

E-mail: nikolamilenkovic017@gmail.com

Izvod

U radu je prikazan originalni algoritam i program u „MATLAB-u“ za modelovanje prelaznih procesa u opterećenom i neopterećenom energetskom transformatoru u električnoj mreži. Posmatran je simetričan sistem opterećenja, a promene veličina i parametara su obuhvaćene matričnim sistemom diferencijalnih jednačina.

Algoritam, dobijen u prvom koraku predprocesiranja, obuhvata i uticaj delovanja magnetnog fluksa na ostale parametre u tranzientnom procesu, kod klasičnog trofaznog transformatora proizvoljne grupe spoja. Razmatran je slučaj u kome sistem flukseva u transformatoru nije simetričan tj. kada je transformator nesimetrično opterećen i dobijen odgovarajući algoritam prelaznog procesa. Pisani program pomoći koga je izvedena simulacija tranzientnog procesa, dobijeni numerički rezultati u tabelama i dijagrami koji se odnose na električne veličine potvrđili su primenljivost metoda i algoritma.

Vrednost programa je proverena i potvrđena na primeru izračunavanja i simulaciju karakterističnih veličina (struja, napona i magnetnih fluksova) za izabrani energetski transformator grupe sprege $Y_n/\Delta-11$.

Ključne reči: tranzientni proces, energetski transformator, modelovanje, algoritam

Abstract

This paper presents the original algorithm and program in “MATLAB” for modeling of transients in loaded and unloaded power transformer in the electric network. A symmetrical load system is observed and changes in quantities and parameters are included in the matrix system of differential equations. The algorithm, obtained in the first step of preprocessing, also includes the influence of magnetic flux impact on the other parameters in the transient process, in a case of classical three-phase transformer of arbitrary group of connections. A case is considered in which the system of fluxes in transformer is not symmetric, i.e. when the transformer is asymmetrically loaded and the appropriate algorithm of transient process is obtained. The value of program was checked and

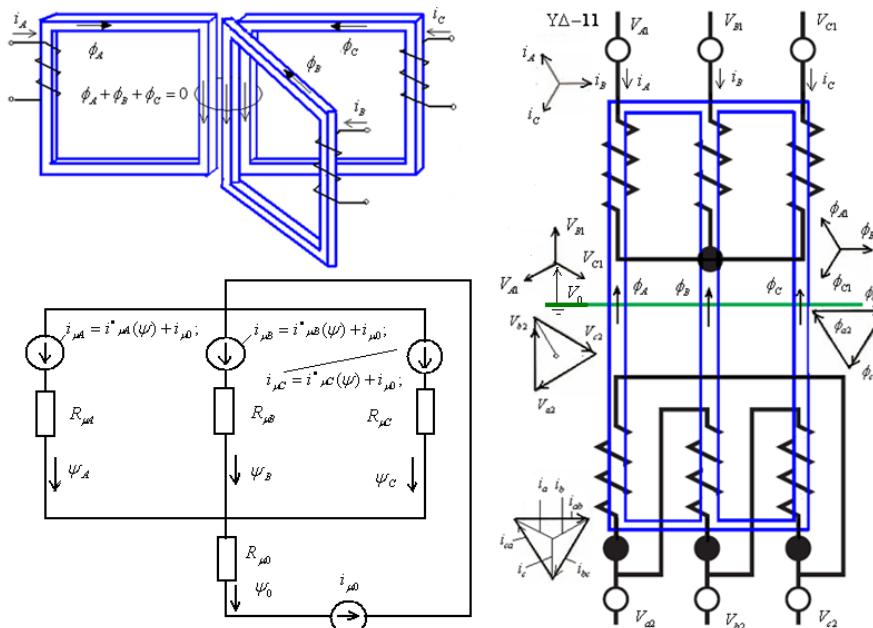
confirmed on an example of calculation and simulation the characteristic quantities (currents, voltages and magnetic fluxes) for selected power transformer of the coupling group $Y_n/\Delta-11$.

Keywords: transient process, power transformer, modeling, algorithm

1. UVOD

Magnetna kola trofaznih transformatora, slika 1, obrazuju se spajanjem tri jezgra jednofaznih transformatora. Struje u jednofaznim namotajima koji su priključeni na simetrični trofazni sistem mrežnih napona, stvaraju flukseve u spojenim magnetnim granama pojedinih faza čiji je zbir jednak nuli. Vrednosti magnetne provodnosti posebnih grana te kombinacije su takođe približno međusobno jednake [1]:

$$\lambda_{A\mu} \equiv \lambda_{B\mu} \equiv \lambda_{C\mu} \equiv \lambda_\mu = \frac{\Phi}{F}; -(\lambda_\mu = \frac{1}{R_\mu}); .$$



Sl. 1. Šema delovanja magnetnih veličina kod trofaznog transformatora

Međutim, magnetno kolo trofaznog transformatora se najčešće predstavlja kao fiktivna prividna struktura jezgara u ravni, sa grupisanim granama prema prostornom rasporedu. Projekcija jezgra u ravni ukazuje da nesimetrija u konstrukciji može da utiče na rezultate pri izračunavanju nesimetričnih struja magnećenja, ali je taj uticaj ipak neznatan. Veličine i parametri simetrično opterećenih trofaznih transformatora mogu se opisati prema teoriji koja je u

potpunosti razvijena za bilo koju obuhvaćenu granu bilo koje faze primara i sekundara monofaznog transformatora. Izvesne korekcije su potrebne zbog načina magnećenja jezgara trofaznih transformatora i proračuna struja magnećenja.

Struje magnećenja su zanemarive u poređenju sa strujama opterećenja, a neuravnoteženost ovih struja ima minorni uticaj na fazore struja magnećenja. Fazni namotaji mogu da budu spojeni u zvezdu, trougao i retko u cik-cak. Alternativni spojevi trofaznih dvo-namotnih transformatora koriste se kao spojevi primara i sekundara Y/Y and Y/Δ sa referentnim faznim stavom (0, 5, 6, 11,...). Od svih mogućih grupa faznih stavova napona primara i sekundara dvonamotnih transformatora grupa spoja faznog stava 11 (i sa neutralnom tačkom) ima vodeće mesto među zvezda spojevima i koristi se u varijantama ($Y/Y_n - 0, Y/\Delta - 11, Y_n/\Delta - 11$) [2].

2. ANALIZA PARAMETARA KOD KLASIČNOG TROFAZNOG TRANSFORMATORA $Y\Delta - 11$ KAO PRVA ETAPA ODREĐIVANJA ALGORITMA

Magnetno kolo koga obrazuju tri stuba, po jedan za svaku fazu i dva jarma, a sistem flukseva je simetričan [3]:

$$\psi_A + \psi_B + \psi_C = 0$$

U svim poznatim referencama prelazni procesi u trofaznim transformatorima zasnovane na predpostavci o simetričnom sistemu flukseva:

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0 \quad \text{t.j.}$$

$$\psi_A + \psi_B + \psi_C = 0$$

Primar i sekundar se tretiraju kao električna kola sa koncretnim parametrima, a parametri se svode na jednu od strana, primar ili sekundar. Na primaru su trenutne vrednosti napona faza v_A, v_B, v_C , i v_0 - napon neutralne tačke. Na sekundaru su trenutne vrednosti napona v_{ca}, v_{ab}, v_{bc} . Struje primara su i_A, i_B, i_C , i struje sekundara i_{ca}, i_{ab}, i_{bc} . Struje magnećenja koje stvaraju pojedine faze su označena sa $i_{A\mu}, i_{B\mu}, i_{C\mu}$, a trenutne vrednosti elektromotornih sila nastalih u pojedinim faznim namotajima primara i sekundara su:

- Ems (*emf) na primaru kao posledica promene fluksa faznim namotajem obuhvaćenog fluksa za svaku fazu pojedinačno, alternativno:

$$-\frac{d\psi_A}{dt}, -\frac{d\psi_B}{dt}, -\frac{d\psi_C}{dt},$$

- Ems (*emf) na sekundaru kao posledica promene fluksa faznim namotajem obuhvaćenog fluksa za svaku fazu pojedinačno, alternativno:

$$-\frac{d\psi_{ca}}{dt}, -\frac{d\psi_{ab}}{dt}, -\frac{d\psi_{bc}}{dt}; \text{ i}$$

- Mps (*mmf) magnetnog kola:

$$\text{uopšte } i_1 + \sqrt{3} \frac{i_2}{n} = i_\mu$$

$$(\text{npr. za fazu A: } N_1 i_A + \frac{\sqrt{3} N_2 i_{ca}}{n} = N_1 i_\mu).$$

Ako je $n = \frac{N_1}{N_2}$ - prenosni odnos, a alternativni indeksi $_{(1)},_{(2)}$ - su

rezervisani za primarnu $_{(1=A,B,C)}$ - i sekundarnu stranu $_{(2=a,b,c)}$ -, opšte jednačine elektromotornih sila, magnetopobudnih sila, flukseva ovakvog transformatora, mogu se napisati u sledećem matričnom obliku [4]:

$$v_1 = -(-\frac{d\psi_1}{dt}) + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 \quad \text{I1}$$

$$-v_2 = -(-\frac{d\psi_2}{dt}) + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 \quad \text{I2}$$

$$i_\mu = \varphi(\psi), \quad \sqrt{3}(\psi_1) = (\psi_2) \text{ i } (L_{\sigma 1}) = (n^2 L_{\sigma 2}), \quad (R_1) = (n^2 R_2) \quad \text{I3}$$

$$i_\mu = \varphi(\psi), -\frac{d\psi_1}{dt} = L_\mu \frac{di_2}{dt}$$

Ovde su: v_1, v_2 , stubne matrice (stubni vektori) napona, i_1, i_2 - stubne matrice (*stubni vektori) struja, ψ_1, ψ_2 - stubne matrice (stubni vektori) flukseva, R_1, R_2 - kvadratne matrice aktivnih otpornosti namotaja primara i sekundara, $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ - kvadratne matrice induktivnosti rasipanja primara i sekundara. Dovoljno tačna je pretpostavka da su parametar induktivnosti rasipanja i aktivne otpornosti namotaja primara za (n^2) puta veće od istih takvih parametara sekundara:

$$v_1 = \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix}, \quad v_2 = \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{ab} \\ v_{bc} \end{bmatrix}, \quad i_1 = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad i_2 = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{ab} \\ i_{bc} \end{bmatrix}, \quad \psi_1 = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}, \quad \psi_2 = \begin{bmatrix} \psi_{ca} \\ \psi_{ab} \\ \psi_{bc} \end{bmatrix},$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} R_A & & \\ & R_B & \\ & & R_C \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} R_{ca} & & \\ & R_{ab} & \\ & & R_{bc} \end{bmatrix}, \quad L_{\sigma 1} = \begin{bmatrix} L_{\sigma A} & & \\ & L_{\sigma B} & \\ & & L_{\sigma C} \end{bmatrix} i$$

$$L_{\sigma 2} = \begin{bmatrix} L_{\sigma ca} & & \\ & L_{\sigma ab} & \\ & & L_{\sigma bc} \end{bmatrix}$$

Parametri otpornosi su jednaki po vrednosti:

$$|R_A| = |R_B| = |R_C| = |R_1|, \quad |R_{ca}| = |R_{ab}| = |R_{bc}| = |R_2|.$$

Parametri induktivnosti su jednaki po vrednosti:

$$|L_{\sigma A}| = |L_{\sigma B}| = |L_{\sigma C}| = |L_{\sigma 1}|, \quad |L_{\sigma ca}| = |L_{\sigma ab}| = |L_{\sigma bc}| = |L_{\sigma 2}|.$$

Jednačine (I.1,2,3) se moraju transformisati da bi se mogle primeniti:

$$v_A - v_0 = \frac{d\psi_A}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_A}{dt} + R_1 i_A \quad \text{I.1'}$$

Postupak transformacija je izведен za jednačine faze (A), a za ostale dve faze (B,C) jednačine su samo napisane pošto je korišćena analogija vezana za transformaciju jednačina faze A [5]:

Prvi korak je zamena vrednosti iz (I.3):

$$\sqrt{3}\psi_A = \psi_{ca}, \quad L_{\sigma 1} = n^2 L_{\sigma 2}, \quad R_1 = n^2 R_2 \quad i_{\mu A} = \varphi(\psi_A) \quad i_A + \frac{\sqrt{3}}{n} i_{ca} = i_{\mu A} = \varphi(\psi_A),$$

$$\hat{i}_{\mu A} = \varphi(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt}; \quad i$$

$$f(\psi_A) = \varphi(\psi_A);$$

u jednačinu (I.2)

$$-v_{ac} = \frac{d\psi_{ca}}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{di_{ca}}{dt} + R_2 i_{ca} \Leftrightarrow -(v_a - v_c) = \sqrt{3} \frac{d\psi_A}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{di_{ca}}{dt} + R_2 i_{ca} \quad \text{I.2'}$$

$$-n\sqrt{3}(v_a - v_c) = n\sqrt{3}\sqrt{3} \frac{d\psi_A}{dt} + n\sqrt{3}L_{\sigma^2} \frac{di_{ca}}{dt} + n\sqrt{3}R_2 i_{ca}; \quad \text{I.2''}$$

$$-n\sqrt{3}(v_a - v_c) = 3n \frac{d\psi_A}{dt} + n^2 L_{\sigma^2} \frac{\sqrt{3}}{n} \frac{di_{ca}}{dt} + n^2 R_2 \frac{\sqrt{3}}{n} i_{ca};$$

Sabiranjem jednačina I.1' i I.2'' dobija se:

$$v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) = (1+3n) \frac{d\psi_A}{dt} + L_{\sigma^1} \frac{d}{dt} (i_A + \frac{\sqrt{3}}{n} i_{ca}) + R_1 (i_A + \frac{\sqrt{3}}{n} i_{ca})$$

$$v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) = (1+3n) \frac{d\psi_A}{dt} + L_{\sigma^1} \frac{di_{\mu A}}{dt} + R_1 i_{\mu A}$$

$$v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) = (1+3n) \frac{d\psi_A}{dt} + L_{\sigma^1} \frac{d}{dt} [\varphi(\psi_A)] + R_1 \cdot \varphi(\psi_A)$$

Takođe je $\frac{d}{dt} [\varphi(\psi_A)] = \varphi'(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt} = f(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt}$; pa je konačno:

$$[1+3n+L_{\sigma^1}f(\psi_A)] \frac{d\psi_A}{dt} = v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) - R_1 \cdot \varphi(\psi_A) \quad (\text{I.1''})$$

Za faze pojedinačno

$$\frac{d\psi_A}{dt} = \frac{v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) - R_1 \varphi(\psi_A)}{1+3n+L_{\sigma^1}f(\psi_A)} = F(\psi_A),$$

$$\frac{d\psi_B}{dt} = \frac{v_B - v_0 - n\sqrt{3}(v_b - v_a) - R_1 \varphi(\psi_B)}{1+3n+L_{\sigma^1}f(\psi_B)} = F(\psi_B), \quad (\text{II.1.})$$

$$\frac{d\psi_C}{dt} = \frac{v_C - v_0 - n\sqrt{3}(v_c - v_b) - R_1 \varphi(\psi_C)}{1+3n+L_{\sigma^1}f(\psi_C)} = F(\psi_C),$$

Jednačine za struje [6]

$$\frac{di_A}{dt} = L_{\sigma^1}^{-1} [v_A - v_0 - R_1 i_A - F(\psi_A)]$$

$$\frac{di_B}{dt} = L_{\sigma^1}^{-1} [v_B - v_0 - R_1 i_B - F(\psi_B)] \quad (\text{II.2.})$$

$$\frac{di_C}{dt} = L_{\sigma^1}^{-1} [v_C - v_0 - R_1 i_C - F(\psi_C)]$$

3. KLASIČNI TROFAZNI TRANSFORMATOR YΔ – 11, NESIMETRIČNI SISTEM OPTEREĆENJA

Transformator sa magnetnim kolom koga sačinjavaju tri stuba, po jedan za svaku fazu i dva jarma, sistem flukseva nije simetričan:

$$\psi_A + \psi_B + \psi_C = \psi_0 \neq 0$$

Za transformator su primenljive jednačine za elektromotorne sile, a za magnetopobudne sile jednačine se mogu napisati na osnovu šeme magnetnog kola sa 3 stuba i 2 magnetna jarma. U granama koje odgovaraju stubovima izvori su struje mamećenja koje pripadaju stubovima sa faznim namotajima, a magnetni fluksevi teku prema mestu spajanja stubova (u ovom slučaju spojnu tačku u suštini obrazuju jarmovi spoljnih faza, tj. jarmovi koji spajaju stubove na kojima su namotaji faza A i C). Analize trofaznih transformatora polaze od predpostavke o simetričnom sistemu flukseva, $\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0$ tj. $\psi_A + \psi_B + \psi_C = 0$.

U stvarnosti, na transformatore deluju nesimetrični sistemi napona ili oni napajaju nesimetrična opterećenja, dakle zbir flukseva koji stvaraju struje mamećenja je jednak nekoj vrednosti $\psi_A + \psi_B + \psi_C = \psi_0$ unetoj u šemu na slici 1. Za poznate zavisnosti [7,8,9] $i^*_{\mu} = \varphi(\psi)$, $i_{\mu 0} = \varphi(\psi_0)$ odnosno $i_{\mu} = i^*_{\mu}(\psi) + i_{\mu 0}$, $i_{\mu A} = i^*_{\mu A}(\psi) + i_{\mu 0}$:

$$\frac{di_{\mu}}{dt} = \frac{d}{dt}[\varphi(\psi)] = \varphi'(\psi) \frac{d\psi}{dt}; \quad \varphi'(\psi) = f_{\mu} = f(\psi) \text{ i}$$

$$((\varphi'(\psi_A) = f_{\mu A} = f(\psi_A)))$$

$$\frac{di_{\mu 0}}{dt} = \frac{d}{dt}[\varphi(\psi_0)] = \varphi'(\psi_0) \frac{d\psi_0}{dt}; \quad \varphi'(\psi_0) = f_{\mu 0} = f(\psi_0) \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{di_{\mu}}{dt} = \frac{di^*_{\mu}}{dt} + \frac{i_{\mu 0}}{dt} = \varphi'(\psi) \frac{d\psi}{dt} + \varphi'(\psi_0) \frac{d\psi_0}{dt};$$

mogu se odrediti magnetne otpornosti $R_{\mu} = \psi^{-1} i^*_{\mu} = \psi^{-1} \varphi(\psi)$ i

$$R_{\mu 0} = \psi_0^{-1} i_{\mu 0} = \psi_0^{-1} \varphi(\psi_0),$$

po metodi suprepozicije $i_{\mu} = i^*_{\mu}(\psi) + i_{\mu 0} = R_{\mu}(\psi)\psi + R_{\mu 0}(\psi_0)\psi_0$.

Dakle u stubovima koje pripada namotajima alternativnih faza A, B, C ukupna struja magnećenja je:

$$i_{\mu A} = R_{\mu A}(\psi_A)\psi_A + R_{\mu 0}(\psi_0)\psi_0 = f_A(\psi_A, \psi_B, \psi_C) \quad (\text{III})$$

$$i_{\mu B} = R_{\mu B}(\psi_B)\psi_B + R_{\mu 0}(\psi_0)\psi_0 = f_B(\psi_A, \psi_B, \psi_C)$$

$$i_{\mu C} = R_{\mu C}(\psi_C)\psi_C + R_{\mu 0}(\psi_0)\psi_0 = f_C(\psi_A, \psi_B, \psi_C)$$

Iz poslednje jednačine sistema jednacina (II.3) za fazu (A) je:

$$\frac{di_{\mu A}}{dt} = \frac{di_{\mu A}^*}{dt} + \frac{i_{\mu 0}}{dt} = \dot{\varphi}(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt} + \dot{\varphi}(\psi_0) \frac{d}{dt}(\psi_A + \psi_B + \psi_C);$$

$$\frac{di_{\mu A}}{dt} = \frac{di_{\mu A}^*}{dt} + \frac{i_{\mu 0}}{dt} = \dot{\varphi}(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt} + \dot{\varphi}(\psi_0) \frac{d\psi_A}{dt} + \dot{\varphi}(\psi_0) \frac{d\psi_B}{dt} + \dot{\varphi}(\psi_0) \frac{d\psi_C}{dt};$$

$$\frac{di_{\mu A}}{dt} = [\dot{\varphi}(\psi_A) + \dot{\varphi}(\psi_0)] \frac{d\psi_A}{dt} + \dot{\varphi}(\psi_0) \frac{d\psi_B}{dt} + \dot{\varphi}(\psi_0) \frac{d\psi_C}{dt};$$

Uvođenjem $\varphi(\psi_A, \psi_0) = \dot{\varphi}(\psi_A) + \dot{\varphi}(\psi_0)$ i $\varphi_1(\psi_0) = \dot{\varphi}(\psi_0)$, dobija se slično kao za fazu A, $\varphi(\psi_B, \psi_0) = \dot{\varphi}(\psi_B) + \dot{\varphi}(\psi_0)$, i $\varphi(\psi_C, \psi_0) = \dot{\varphi}(\psi_C) + \dot{\varphi}(\psi_0)$, sistem jednačina za sve tri faze [10,11]:

$$\frac{di_{\mu A}}{dt} = \varphi(\psi_A, \psi_0) \frac{d\psi_A}{dt} + \varphi_1(\psi_0) \frac{d\psi_B}{dt} + \varphi_1(\psi_0) \frac{d\psi_C}{dt} \quad (\text{IV})$$

$$\frac{di_{\mu B}}{dt} = \varphi(\psi_B, \psi_0) \frac{d\psi_B}{dt} + \varphi_1(\psi_0) \frac{d\psi_A}{dt} + \varphi_1(\psi_0) \frac{d\psi_C}{dt}$$

$$\frac{di_{\mu C}}{dt} = \varphi(\psi_C, \psi_0) \frac{d\psi_C}{dt} + \varphi_1(\psi_0) \frac{d\psi_A}{dt} + \varphi_1(\psi_0) \frac{d\psi_B}{dt}$$

Dakle, u matričnom obliku:

$$\frac{di_\mu}{dt} = F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C) \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{V})$$

Primenom sistema jednačina (III) i (IV) mogu se za fazu A transformatora sa tri stuba napisati jednačine opisane izvodima [gde je, za primer $(v_2 - v_2') = (v_a - v_c)$]:

$$\frac{d\psi_A}{dt} = \frac{v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) - R_1\varphi_2(\psi_A, \psi_B, \psi_C)}{1 + 3n + L_{\sigma 1}F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C)}, \quad (\text{VI})$$

$$\frac{di_A}{dt} = L_{\sigma 1}^{-1}[v_A - v_0 - R_1 i_A - F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C)] \quad (\text{VII})$$

Za primer se mogu sastaviti jednačine sa veličinama izvoda fluksa i struje indeksa ($l = A, B, C$), naponi ($v_2 - v_2'$) sekundarne strane u imeniku izraza (VI) imaće indeksa po redosledu ($2 = a, b, c$) ($2' = c, a, b$), tj. za [12]:

$$\text{fazu A } (v_2 - v_2') = (v_a - v_c),$$

$$\text{fazu B: } (v_2 - v_2') = (v_b - v_a),$$

$$\text{fazu C } (v_2 - v_2') = (v_c - v_b).$$

Opšte relacije su:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{v_1 - v_0 - n\sqrt{3}(v_2 - v_2') - R_1\varphi_2(\psi_A, \psi_B, \psi_C)}{1 + 3n + L_{\sigma 1}F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C)},$$

$$\frac{di_1}{dt} = L_{\sigma 1}^{-1}[v_1 - v_0 - R_1 i_1 - F_1(\psi)]$$

gde su funkcije F_1 , i φ_2 - izražene kao kvadratna odnosno dijagonalna matrica.

$$F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C) = \begin{bmatrix} \varphi(\psi_A, \psi_0) & \varphi_1(\psi_0) & \varphi_1(\psi_0) \\ \varphi_1(\psi_0) & \varphi(\psi_B, \psi_0) & \varphi_1(\psi_0) \\ \varphi_1(\psi_0) & \varphi_1(\psi_0) & \varphi(\psi_C, \psi_0) \end{bmatrix}; \quad (\text{VIII})$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{\mu A}}{dt} \\ \frac{di_{\mu B}}{dt} \\ \frac{di_{\mu C}}{dt} \end{bmatrix} = F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C) \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\psi_A}{dt} \\ \frac{d\psi_B}{dt} \\ \frac{d\psi_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(\psi_A, \psi_0) & \varphi_1(\psi_0) & \varphi_1(\psi_0) \\ \varphi_1(\psi_0) & \varphi(\psi_B, \psi_0) & \varphi_1(\psi_0) \\ \varphi_1(\psi_0) & \varphi_1(\psi_0) & \varphi(\psi_C, \psi_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\psi_A}{dt} \\ \frac{d\psi_B}{dt} \\ \frac{d\psi_C}{dt} \end{bmatrix}; \quad (\text{VIII})$$

Pored matrice F_1 , koristi se matrica $\varphi_2(\psi_A, \psi_B, \psi_C)$ iz prve i druge relacije (II.3) da bi se uprostilo dobijanje algoritma prelaznih procesa u klasičnom trofaznom transformatoru sa tri stuba koji radi pod nesimetričnim opterećenjem:

$$\varphi_2(\psi_A, \psi_B, \psi_C) = \begin{bmatrix} f(\psi_A) + f(\psi_0) \\ f(\psi_B) + f(\psi_0) \\ f(\psi_C) + f(\psi_0) \end{bmatrix}; \quad (\text{IX})$$

Ako se nedijagonalni elementi matrice F_1 zanemare i izostave, to neće znatnije uticati na rezultat. Pod tim uslovima matrica F_1 (VIII) bice dijagonalna tj.:

$$F_1(\psi_A, \psi_B, \psi_C) = \begin{bmatrix} \varphi(\psi_A, \psi_0) & & \\ & \varphi(\psi_B, \psi_0) & \\ & & \varphi(\psi_C, \psi_0) \end{bmatrix}; \quad (\text{VIII}')$$

Jednačine prelaznog procesa se mogu uprostiti ako nema opterećenja na transformatoru.

4. NEOPTEREĆENI TROFAZNI TRANSFORMATOR (CASE: NO-LOAD TRANSFORMER)

Za izabranu grupu spoja neopterećenog transformatora Yy, Dy, Yd, \dots , sa naponom neutralne tačke $v_0 = i_{no-load} z_{netr-point}$ i $i_{no-load}$ – strujom transformatora ($z_{netr-point}$ – impedansa neutralne tačke), jednačine (II.1.) i (II.2.) svode se na sisteme matričnih jednačina [13,14]:

$$\begin{aligned} i_{no-load} &= i_A + i_B + i_C \\ \frac{di_{no-load}}{dt} &= \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \\ \frac{di_A}{dt} &= L_{\sigma 1}^{-1} [v_A - v_0 - R_1 i_A - \frac{d\psi_A}{dt}] \\ \frac{di_B}{dt} &= L_{\sigma 1}^{-1} [v_B - v_0 - R_1 i_B - \frac{d\psi_B}{dt}] \\ \frac{di_C}{dt} &= L_{\sigma 1}^{-1} [v_C - v_0 - R_1 i_C - \frac{d\psi_C}{dt}] \end{aligned} \quad (\text{II.2}')$$

Sabiranjem tri jednačine sistema (II.2') dobijamo (II.2''):

$$\frac{di_{no-load}}{dt} = \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} = L_{\sigma 1}^{-1}[v_A + v_B + v_C - 3v_0 - R_1(i_A + i_B + i_C) - (\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_B}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt})];$$

Posle sređivanja:

$$\frac{di_{noload}}{dt} = \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} = L_{\sigma 1}^{-1}[v_A + v_B + v_C - 3v_0 - R_1 i_{no-load} - (\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_B}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt})] \quad (II.2'')$$

Jednačina (I.1'') može se napisati u pogodnom obliku za svaku fazu pojedinačno:

Za fazu A

$$[1 + 3n + L_{\sigma 1} f(\psi_A)] \frac{d\psi_A}{dt} = v_A - v_0 - n\sqrt{3}(v_a - v_c) - R_1 \cdot \varphi(\psi_A)$$

Za fazu B (I.1'').)

$$[1 + 3n + L_{\sigma 1} f(\psi_B)] \frac{d\psi_B}{dt} = v_B - v_0 - n\sqrt{3}(v_b - v_a) - R_1 \cdot \varphi(\psi_B)$$

Za fazu C

$$[1 + 3n + L_{\sigma 1} f(\psi_C)] \frac{d\psi_C}{dt} = v_C - v_0 - n\sqrt{3}(v_c - v_b) - R_1 \cdot \varphi(\psi_C)$$

Sabiranjem ove tri jednačine dobija se (I.1'''):

$$\begin{aligned} & (\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_B}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt}) + 3n(\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_B}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt}) + L_{\sigma 1} [f(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt} + f(\psi_B) \frac{d\psi_B}{dt} + f(\psi_C) \frac{d\psi_C}{dt}] = * \\ & = v_A + v_B + v_C - 3v_0 - n\sqrt{3}[(v_a - v_c) + (v_b - v_a) + (v_c - v_b)] - R_1[\varphi(\psi_A) + \varphi(\psi_B) + \varphi(\psi_C)]; \end{aligned}$$

pisanjem na drugi način (*)

$$\begin{aligned} & n\sqrt{3}[(v_a - v_c) + (v_b - v_a) + (v_c - v_b)] + R_1[\varphi(\psi_A) + \varphi(\psi_B) + \varphi(\psi_C)] + 3n(\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_B}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt}) + \\ & + L_{\sigma 1} [f(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt} + f(\psi_B) \frac{d\psi_B}{dt} + f(\psi_C) \frac{d\psi_C}{dt}] = v_A + v_B + v_C - 3v_0 - (\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_B}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt}) \end{aligned}$$

Zamenom vrednosti iz izraza (*) u jednačinu (II.2'') i sređivanjem izraza dobija se:

$$\frac{di_{no-load}}{dt} = L_{\sigma 1}^{-1} \left[\frac{1}{3} \left(\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt} \right) - R_1(i_A + i_B + i_C) \right];$$

$$\frac{di_{no-load}}{dt} = L_{\sigma 1}^{-1} \left[\frac{1}{3} \left(\frac{d\psi_A}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt} + \frac{d\psi_C}{dt} \right) - R_1 i_{no-load} \right];$$

Zatim se na osnovu (I.1) dobija matrična jednačina za određivanje flukseva u stubovima transformatora na kojima se nalaze namotaji faza A, B, C [15]:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_A}{dt} \\ \frac{d\psi_B}{dt} \\ \frac{d\psi_C}{dt} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} - 3 \cdot z_{neutr-point} \begin{bmatrix} i_{no-load} \\ i_{no-load} \\ i_{no-load} \end{bmatrix} - R_1 \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

Matrica konstante K je:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{4}{3} + L_{\sigma 1} \xi(\psi_A) & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{4}{3} + L_{\sigma 1} \xi(\psi_B) & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{4}{3} + L_{\sigma 1} \xi(\psi_C) \end{bmatrix};$$

$$\text{pisanjem na drugi način: } i_A = i_{\mu A} + i_{no-load}, \quad i_B = i_{\mu B} + i_{no-load},$$

$$i_C = i_{\mu C} + i_{no-load}$$

Funkcija struja magnećenja u stubovima transformatora faza A, B, C, $i_{\mu A,B,C} = \zeta(\psi_{A,B,C})$ se aproksimiraju stepenim redom sa potencijama p, q i sa konstantama α, β

$$i_{\mu A} = \alpha \psi_A + \beta \psi_A^p + \gamma \psi_A^q$$

$$i_{\mu B} = \alpha \psi_B + \beta \psi_B^p + \gamma \psi_B^q$$

$$i_{\mu C} = \alpha \psi_C + \beta \psi_C^p + \gamma \psi_C^q.$$

sa opštim izvodom

$$\xi(\psi) = \frac{di}{dt} = \frac{d\zeta(\psi)}{dt}, \text{ [za fazu A] } \xi(\psi_A) = \frac{di_{\mu_A}}{dt} = \frac{d[\alpha\psi_A + \beta\psi_A^p + \gamma\psi_A^q]}{dt},$$

vrednost funkcije je $\xi(\psi_A)$, je $\xi(\psi_A) = \alpha + \beta \cdot p\psi_A^{p-1} + \gamma \cdot q\psi_A^{q-1}$

$$[\text{Za fazu B je} \quad \xi(\psi_B) = \alpha + \beta \cdot p\psi_B^{p-1} + \gamma \cdot q\psi_B^{q-1}].$$

$$[\text{Za fazu C je} \quad \xi(\psi_C) = \alpha + \beta \cdot p\psi_C^{p-1} + \gamma \cdot q\psi_C^{q-1}].$$

Funkcije $\xi(\psi_A)$ za fazu A se množi sa $L_{\sigma 1}$, a slično je i u ostalim dvema fazama i deo je dijagonalnih članova $[\frac{4}{3} + L_{\sigma 1} \xi(\psi_A)]$, u matrici K .

5. PROGRAM ZA SIMULACIJU

Metoda simulacije koja se oslanja na veštačku inteligenciju u računaru kroz „proigravanje“ može da zameni složeni-klašični postupak izračunavanja i merenja i da pruži objektivnu sliku o ponašanju energetskog transformatora. U programu MATLAB sastavljen je simulacioni program za određivanje električnih i magnetnih veličina prema algoritmu modela tranzientnih procesa. Takođe je napravljen i program za generisanje tih veličina. Program služi za proveru generisanih i obrađenih vrednosti. Tako se tačno zna koje su veličine generisane i obrađene posle simulacije signala. Program je sastavljen iz dva dela: front dijagrama (SCOPY) i blok dijagrama. Block diagram služi za pisanje programa, a front diagram za prikaz korisnicke korsepodencije [16].

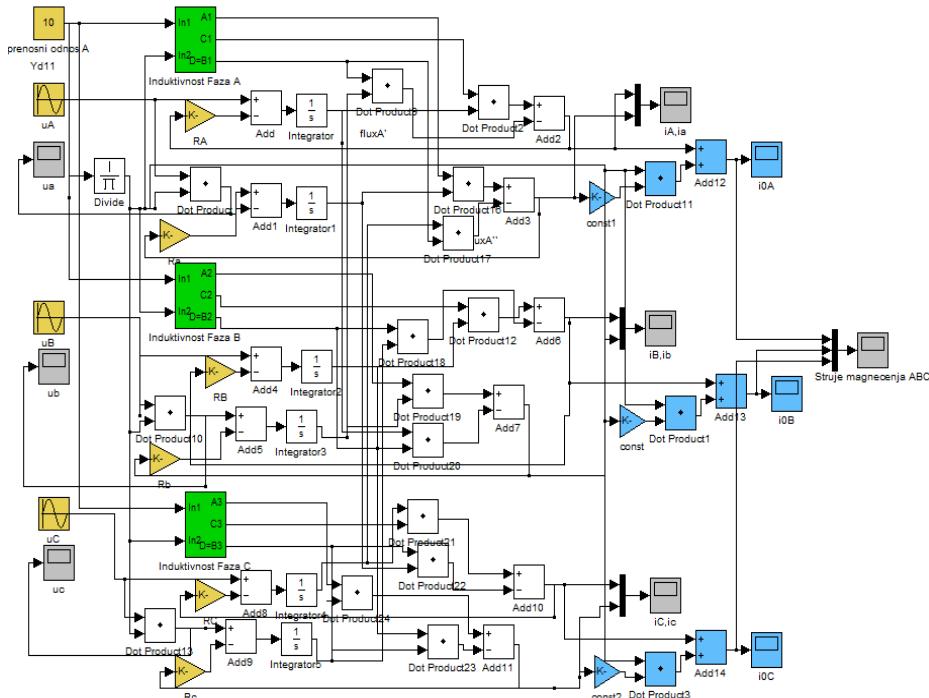
A) Generiranje električnih i magnetnih veličina

Program za generisanje veličina je napravljen pomoću ugradene funkcije „simulate signal“ koja služi za generisanje raznih signala, slika 2, i potrebno je izabrati sinusni signal. Ulaskom u funkciju moguće je podešiti frekvenciju uzorkovanja i broj uzoraka koja se želi simulirati. Za ulazne varijable birane su frekvencija, amplituda i fazni ugao.

Funkcija „simulate signal“ smeštena je u **Dot product** petlju (dve iste petlje, jedna za napon jedna za struju), koja ima broj iteracija jednak harmoniku koga želimo generisati, tj. broju redova svakog polja „luster“-a. Ulazni podaci za **Dot product** petlju nalaze se u „cluster“ obliku. U programu su dva „cluster“-a napon i struja, koja se sastoje od tri polja: za svaku fazu pojedinačno frekvencija i amplituda. Putem upisa vrednosti u „cluster“-u bira se željeni nivo veličine napona i struje. Na front dijagramu upisuju se sva tri parametra posebno za svaki fazu transformatora. Petlja u svakoj iteraciji čita vrednosti iz

svih polja „cluster“-a na lokaciji polja koja je jednaka trenutnoj iteraciji. Prva iteracija sadrži podatke o početnim vrednostima struja i napona. U petlji se, u svakoj sledećoj iteraciji, sabiraju vrednosti trenutne iteracije s polaznom i tako se dobija vrednost u željenom vremenskom trenutku. Posle završetka poslednje iteracije petlje, tj. kada se saberi sve prethodne, završne vrednosti veličina se upisuju u izlazni.txt dokument. Dokument se sastoји od dve kolone. U prvoj su upisana vremena uzorkovanja, a u drugoj koloni vrednosti napona i struje. Prvih pet redova sadrži informacione vrednosti o generisanoj veličini.

Za verifikaciju novog modela i algoritma tranzientnih procesa energetskih transformatora napisan je poseban program u Matlabu na osnovu koga su sastavljene dve šeme za simulaciju procesa sa proizvoljno zadatim parametrima. Za demonstraciju metoda izabran je suvi energetski transformator ABB, spoja Yd, snaga 1; 2; 3.15 MVA čiji su podaci dati u tabeli 1.



Sl. 2. Petlja za generisanje električnih i magnetnih veličina u energetskom trasformatoru (Yd-11)

Tabela 1. Podaci o ABB transformatorima

Power	HV/LV	Impedances	No-LoadLosses	LoadLosses (75°C)	$R_T(\Omega)$	$X_T(\Omega)$	$Z_T(\Omega)$
(kVA)	(kV)	(%)	(W)	(W)			
T1ABB 1000	10/0.4	6%	2000	8800	$1.40 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$
T2ABB 2000	10/0.4	6%	3500	15500	$0.61 \cdot 10^{-3}$	$4.76 \cdot 10^{-3}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$
T3ABB 3150	10/0.4	6%	5200	22600	$0.34 \cdot 10^{-3}$	$3.03 \cdot 10^{-3}$	$3.05 \cdot 10^{-3}$

B. Obrada podataka

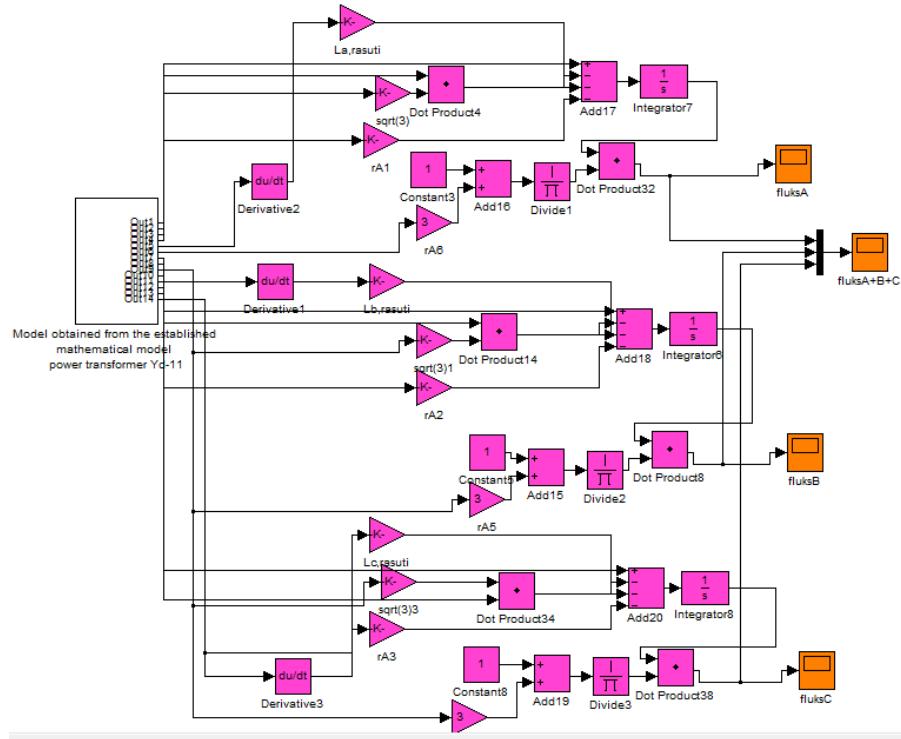
Program je zasnovan na brzoj Fourierovoj transformaciji FFT (Fast Fourier's transformation) i algoritmu proračuna trazientnih procesa. Fourierova transformaciju FFT obavlja se nad reduciranim poljem. Rezultat se upisuje u dva polja. Jedno polje sadrži realne a drugo imaginarne komponente. Po Algoritmu se računaju apsolutne vrednosti i fazni stavovi.

Program je podeljen u tri dela, prvi obrađuje naponski signal, drugi deo strujni signal, a treći deo sadrži algoritam za računanje magnetnog fluksa. Svaki deo podeljen je u više strukturnih petlji koje omogućavaju da se koraci programa odvijaju jedan za drugim, tj. sprečavaju preklapanje programa. Program prvo čita vrednosti upisane u .txt datoteci koja je prethodno generirana programom za generaciju signala i šalje ih u polje sa dve kolone. Nakon čitanja obavlja se radnja brisanja redova i kolona polja kako bi ostalo polje sa kolonom u kome se nalaze samo generisane vrednosti.

Petlja za računanje tokova radne snage pokreće se nakon sekunde. Vremenski odmak od sekunde postavljen je da bi se osiguralo dovoljno vremena da se provedu petlje Fourierove transformacije, tj. da ne bi došlo do preklapanja vrednosti.

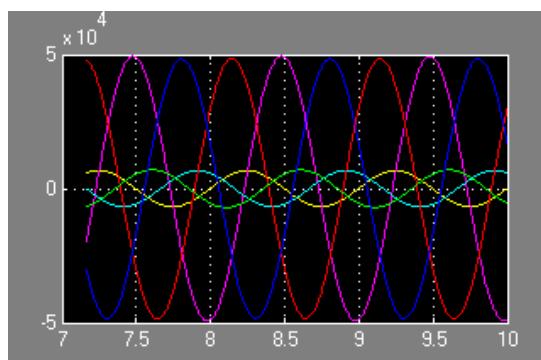
Ulazni parametri za treću petlju su polja dobijena nakon Fourierove transformacije. Petlja računa napone i struje pojedinih faza. Zadatak programa je da potvrdi primenljivost metoda i algoritma. Nakon završetka programa, na „front diagramu“ prikazane su sve vrednosti harmonika struje i napona i flukseva. Sve interesantne veličine i vrednosti dominantnog signala I harmonika takođe se prikazane graficima. Poređenjem vrednosti koje su zadate u program za obradu podataka može se potvrditi da program za obradu podataka funkcioniše ispravno. U narednoj etapi program je spojen sa stvarnim vrednostima struja, napona i frekvencija.

Blok Šema (slika 2) je uključena u subsistem i proširena blokovima koji prate matematički deo rada radi dobijanja neophodnih parametara analiziranog prelaznih procesa.

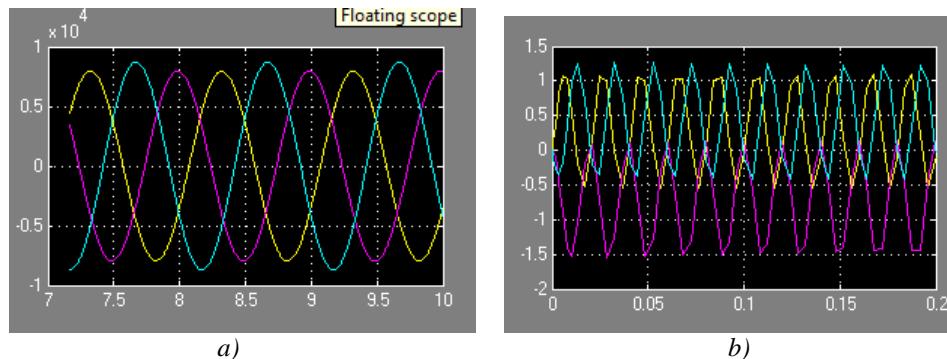


Sl. 3. Demonstracija modela dobijenog iz uspostavljenog matematičkog modela prelaznih procesa u energetskom transformatoru

Model simulaciju je „aktivan“ i može se korigovati u odnosu na parametre očekivanih rezultata. Na dijagramima 4 i 5 su prikazane karakteristike neopterećenog energetskog transformatora Yd-11.



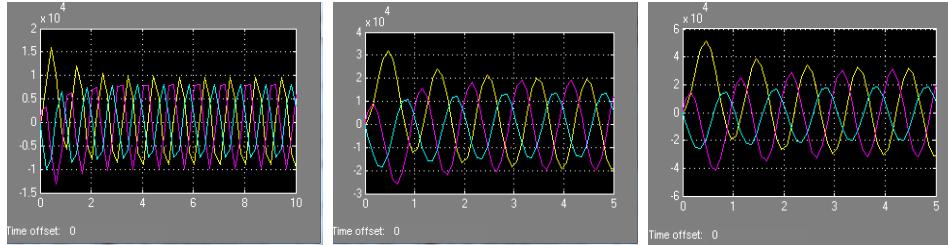
Sl. 4. Grafička demonstracija struje primara i sekundara neopterećenog energetskog transformatora Yd-11, koji je algoritmom opisan u modelu



Sl. 5. a) Grafička demonstracija struja magnećenja neopterećenog energetskog transformatora Yd-11, koji je algoritmom opisan u modelu; b) Grafička demonstracija magnetnog fluksa neopterećenog energetskog transformatora Yd-11, koji je algoritmom opisan u modelu

Prilikom priključenja napona nastaje prelazni proces praćen promenom struje magnećenja u kolu, kroz tabelarni i grafički prikaz je predstavljena ova promena kod različitih tipova transformatora, slika 6.

T1:1[MVA],10/0.4[kV/kV], R = X =0.16Ω			T2:2[MVA],10/0.4[kV/kV], R = X =0.08Ω			T3:3.5[MVA],10/0.4[kV/kV], R = X =0.05Ω		
I _μ A[A]	I _μ B[A]	I _μ C[A]	I _μ A[A]	I _μ B[A]	I _μ C[A]	I _μ A[A]	I _μ B[A]	I _μ C[A]
1.06E-10	0.00125	-0.0011	2.12E-10	0.00252	-0.0018	3.39E-10	0.00403	-0.0025
3.82E-09	0.00755	-0.0063	7.63E-09	0.01511	-0.0109	1.22E-08	0.02418	-0.015
1.02E-07	0.03904	-0.0328	2.04E-07	0.07808	-0.0565	3.26E-07	0.12493	-0.0776
2.58E-06	0.19646	-0.1649	5.16E-06	0.39294	-0.2843	8.26E-06	0.6287	-0.3904
6.47E-05	0.98356	-0.8257	1.29E-04	1.96714	-1.4234	2.07E-04	3.14742	-1.9544
0.00161	4.91827	-4.1301	0.003235	9.83655	-7.1198	0.005175	15.7385	-9.7757
0.04043	24.572	-20.662	0.080866	49.144	-35.619	0.129385	78.6303	-48.908
1.01021	122.342	-103.57	2.020426	244.684	-178.56	3.232682	391.494	-245.2
25.1691	598.38	-523.92	50.33821	1196.76	-903.73	80.54114	1914.82	-1241.6
613.54073	2618.91	-2725.4	1227.081	5237.83	-4712.9	1963.33	8380.52	-6488.8
4222.8569	4501.12	-7412.6	8445.714	9002.24	-12890	13513.14	14403.6	-17835
9479.5309	2584.5	-10346	18959.06	5168.99	-18113	30334.5	8270.39	-25210
14065.429	-2201	-10319	28130.86	-4401.9	-18248	45009.37	-7043.1	-25627



Sl. 6. Promena struje magnećenja u kolu energetskog transformatora

5. ZAKLJUČAK

Određivanje značajnih električnih i magnetnih veličina trofaznog energetskog transformatora izabrane grupe spoja u trazientnom procesu moguće je izvesti putem dobijenih algoritama. Opisane su funkcije i matematički metod koji je rezultirao originalnim algoritmom koji prihvata veći broj promenljivih parametara. U programu MATLAB je napravljen algoritam za proračun prema uspostavljenoj metodi. Osnova za određivanje algoritma je analiza tranzientnog procesa opterećenog i neopterećenog trofaznog transformatora. Zahvaljujući analizi i rezultatima iz dva primera bilo je moguće napisati i u MATLAB-u sastaviti simulacioni program za određivanje veličina prema algoritmu tranzientnih procesa. Pomoću programa i vremenskih oblika u front dijagramu (SCOPY) je napravljena komparacija i provera tačnosti primjenjenog metoda i dobijenog algoritma.

Prezentovana metoda i program za izračunavanje i simulaciju omogućavaju brzo i kvalitetno određivanje veličina pri prelaznim procesima u neopterećenim ili opterećenim trofaznim energetskim transformatorima proizvoljne grupe spoja. Dobijeni model je univerzalan, a algoritam se može koristiti i za različite režime u kojima se transformator može naći.

Primenjeni program je imao dvostruku namenu: prvo da posluži izračunavanju i simulaciji veličina koje se inače mogu dobiti ispitivanjem ili merenjem na transformatoru, i druga namena je verifikacija predloženog metoda i uspostavljenog originalnog algoritma. Simulacija zamenjuje tipska ispitivanja na svim transformatorima sa kvazi-simetrično postavljenim namotajima, (u ravni), u ovom sličaju u model je uvršten i uticaj nulte komponente fluksa.

LITERATURA

- [1] F. Marković, S. Bjelić, V. Milićević, N. Marković, Merenje trofaznih električnih veličina nesinusoidnog oblika pomoću mikroračunarskog merača, *Bizinfo*, 11(1), (2020), 65-73.

- [2] V. Milićević, S. Bjelić, N. Marković, U. Jakšić, Simulacija prelaznih procesa u distributivnim mrežama srednjeg napona - 10-35 KV, Bizinfo 5(1), (2014), 83-93.
- [3] V. Mladenović, S. Bjelić, Metodološki pristup razvoju sistema za prikupljanje, prenos i obradu podataka u električnim mrežama. Tehnika – Elektrotehnika, 57(2), (2008), 9-16.
- [4] U. Jakšić, S. Bjelić, N. Marković, Razvoj aktivnih i pasivnih metoda za akviziciju značajnih vrednosti u niskonaponskim električnim mrežama. Poljoprivredna tehnika 33(4), (2008), 17-23.
- [5] S. Bjelić, N. Marković, U. Jakšić, Uredaji sa simetričnim komponentama za smanjenje nesimetrije faznih napona u niskonaponskim električnim mrežama. Poljoprivredna tehnika 33(4), (2008), 9-15.
- [6] N. Marković, S. Bjelić, U. Dragić, Development of New Measuring Systems Based on Symmetric Components in Electric Networks, Elektronika ir elektrotehnika, Vol. 8, (2010), 57-62.
- [7] V. Strugar, E. Garaplija, Upravljanje održavanjem na bazi rizika u elektroenergetskim sistemima, Serbian Journal of Engineering Management, 4(1) (2019) 60-71.
- [8] X. Lin, H. Yang, P. Jun-min, C. Chen, Y. Gang, Z. Li-Dan., Selective Compensation Strategies for the 3-Phase Cascaded Multilevel Active Power Filter using ANF-based Sequence Decoupling Scheme, Electronics and Electrical Engineering, Kaunas: Technologija, No. 2(98), (2010) 15–20.
- [9] G. K. Kalognomos, G. E. Boultadakis, A. V. Karakasiliotis, P. V. Frangos, Performance Analysis of a Parameterized APES (PAPES) Spectrum Estimation Method for ISAR Applications, Electronics and Electrical Engineering, Kaunas: Technologija, No. 3(99), (2010) 43–48.
- [10] J.L. Blackburn, T.J. Domin, Protective Relaying Principles and Applications, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- [11] P.M. Anderson, Analysis of Faulted Power Systems, Iowa State University Press, Ames, IA, 1973.
- [12] J.D. Glover, M.S. Sarma, T.J. Overbye, Power System Analysis and Design, 4th Edition, Thomson Learning, Toronto, ON, 2008.
- [13] E.O. Schweitzer, Stanley E. Zocholl, Introduction to Symmetrical Components, Proceedings of the 58th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, April 2004.

- [14] Westinghouse Electric Corporation, Relay-Instrument Division, Applied Protective Relaying. Newark, NJ, 1976.
- [15] The Electricity Training Association, eds., Power System Protection Volume 1: Principles and Components, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1995.
- [16] MATLAB Computer Programming for Power Systems Analysts, www.vepi.hostse.com

UPUTSTVO AUTORIMA

Časopis BAKAR izlazi dva puta godišnje i objavljuje naučne, stručne i pregledne radove. Za objavljivanje u časopisu prihvataju se isključivo originalni radovi koji nisu prethodno objavljivani i nisu istovremeno podneti za objavljivanje negde drugde. Radovi se anonimno recenziraju od strane recenzenta posle čega uredništvo donosi odluku o objavljinju. Rad priložen za objavljinje treba da bude pripunjlen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripunjeni rukopisi biće vraćeni autoru na doradu.

Obim i font. Rad treba da je napisan na papiru A4 formata (210x297 mm), margine (leva, desna, gornja i donja) sa po 25 mm, u Microsoft Wordu novije verzije, fontom Times New Roman, veličine 12, sa razmakom 1,5 reda, obostrano poravnat prema levoj i desnoj margini. Preporučuje se da celokupni rukopis ne bude manji od 5 strana i ne veći od 10 strana.

Naslov rada treba da je isписан velikim slovima, bold, na srpskom i na engleskom jeziku. Ispod naslova rada piše se imena autora i institucija u kojoj rade. Autor rada zadužen za korespondenciju sa uredništvom mora da navede svoju e-mail adresu za kontakt u fusuotu.

Izvod se nalazi na početku rada i treba biti dužine do 200 reči, da sadrži cilj rada, primenjene metode, glavne rezultate i zaključke. Veličina fonta je 10, italic.

Ključne reči se navode ispod izvoda. Treba da ih bude minimalno 3, a maksimalno 6. Veličina fonta je 10, italic.

Izvod i ključne reči treba da budu date i na engleski jezik.

Osnovni tekst. Radove treba pisati jezgrovito, razumljivim stilom i logičkim redom koji, po pravilu, uključuje uvodni deo s određenjem cilja ili problema rada, opis metodologije, prikaz dobijenih rezultata, kao i diskusiju rezultata sa zaključcima i implikacijama.

Glavni naslovi trebaju biti urađeni sa veličinom fonta 12, bold, sve velika slova i poravnati sa levom marginom.

Podnaslovi se pišu sa veličinom fonta 12, bold, poravnato prema levoj margini, velikim i malim slovima.

Slike i tabele. Svaka ilustracija i tabela moraju biti razumljive i bez čitanja teksta, odnosno, moraju imati redni broj, naslov i legendu (objašnjenje oznaka, šifara, skraćenica i sl.). Tekst se navodi ispod slike, a iznad tabele. Redni brojevi slika i tabela se daju arapskim brojevima.

Reference u tekstu se navode u uglačastim zagradama, na pr. [1,3]. Reference se prilažu na kraju rada na sledeći način:

[1] B.A. Willis, Mineral Procesing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, str. 35. (za poglavje u knjizi)

[2] H. Ernst, Research Policy, 30 (2001) 143–157. (za članak u časopisu)

[3] www: <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (za web dokument)

Navodenje neobjavljenih radova nije poželjno, a ukoliko je neophodno treba navesti što potpunije podatke o izvoru.

Zahvalnost se daje po potrebi, na kraju rada, a treba da sadrži ime institucije koja je finansirala rezultate koji se daju u radu, sa nazivom i brojem projekta; ili ukoliko rad potiče iz magistarske teze ili doktorske disertacije, treba dati naziv teze/disertacije, mesto, godinu i fakultet na kojem je odbranjena. Veličina fonta 10, italic.

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštom ili u drugom elektronskom obliku.

Adresa uredništva je: Časopis BAKAR

Institut za rudarstvo i metalurgiju

Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs

Telefon: 030/454-260; 030/454-108

Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.

INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

COPPER Journal is published twice a year and publishes the scientific, technical and review paper works. Only original works, not previously published and not simultaneously submitted for publications elsewhere, are accepted for publication in the journal. The papers are anonymously reviewed by the reviewers after that the Editorial decided to publish. The submitted work for publication should be prepared according to the instructions below as to be included in the procedure of reviewing. Inadequate prepared manuscripts will be returned to the author for finishing.

Volume and Font Size. The paper needs to be written on A4 paper (210x297 mm), margins (left, right, top and bottom) with each 25 mm, in the Microsoft Word later version, font Times New Roman, size 12, with 1.5 line spacing, justified to the left and right margins. It is recommended that the entire manuscript cannot be less than 5 pages and not exceed 10 pages.

Title of Paper should be written in capital letters, bold, in Serbian and English. Under the title, the names of authors and their affiliations should be written. Corresponding author must provide his/her e-mail address for contact in a footnote.

Abstract is at the beginning of the paper and should be up to 200 words include the aim of the work, the applied methods, the main results and conclusions. The font size is 10, italic.

Keywords are listed below the abstract. They should be minimum 3 and maximum of 6. The font size is 10, italic.

Abstract and Keywords should be also given in English language.

Basic Text. The papers should be written concisely, in understandable style and logical order that, as a rule, including the introduction part with a definition of the aim or problem of the work, a description of the methodology, presentation of the obtained results as well as a discussion of the results with conclusions and implications.

Main Titles should be done with the font size 12, all capital letters and aligned to the left margin.

Subtitles are written with the font size 12, bold, aligned to the left margin, large and small letters.

Figures and Tables. Each figure and table must be understandable without reading the text, i.e., must have a serial number, title and legend (explanation of marks, codes, abbreviations, etc.). The text is stated below the figure and above the table. Serial numbers of figures and tables are given in Arabic numbers.

References in the text are cited in square brackets, e.g. [1,3]. References are enclosed at the end of the paper as follows:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, p. 35. (*for the chapter in a book*)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (*for the article in a journal*)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (*for web document*)

Citation of the unpublished works is not preferable and, if it is necessary, as much as possible completed data source should be listed.

Acknowledgement is given, as needed, at the end of the paper and should include the name of institution that funded the given results in the paper, with the project title and number; or if the work is resulted from the master thesis or doctoral dissertation, it should give the title of thesis/dissertation, place, year and faculty/university where it was defended. Font size is 10, italic.

The manuscripts are primarily sent by e-mail or in other electronic form.

Editorial Address: Journal COPPER
 Mining and Metallurgy Institute Bor
 35 Zeleni bulevar, 19210 Bor
 E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs
 Telephone: +381 30/454-260; +381 30/454-108

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ
CONTENS

Miloš Stojanović, Igor Svrkota, Dragan Šabaz, Pavle Stojković	
ANALIZA UTICAJA EKSPLOATACIJE LEŽIŠTA ČUKARU PEKI PODETAŽNOM METODOM OTKOPAVANJA NA POVRŠINU TERENA	
ANALYSIS THE IMPACT OF THE ČUKARA PEKI DEPOSIT MINING USING THE SUBLEVEL MINING METHOD ON THE FIELD SURFACE	1
Vesna Krstić, Vesna Marjanović, Branka Pešovski, Danijela Simonović	
NANOADSORBENSI NA BAZI METALA/METAL OKSIDA U FUNKCIJI PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA OD ZAGAĐIVAČA	
NANOADSORBENTS ON THE BASIS OF METAL/METAL OXIDE IN A FUNCTION OF WASTEWATER TREATMENT FROM POLLUTANTS	13
Krsta Brčić	
UNAPREĐENJE ODRŽAVANJA METALURŠKOG POSTROJENJA PRAĆENJEM PARAMETARA TEHNOLOŠKOG PROCESA	
IMPROVEMENT OF THE METALLURGICAL PLANT MAINTENANCE BY MONITORING THE TECHNOLOGICAL PROCESS PARAMETERS	25
Slavica Miletić, Dejan Bogdanović, Miroslav Ignjatović, Zdenka Stanojević Šimšić, Ana Kostov	
UTICAJ DIGITALNE TEHNOLOGIJE NA ORGANIZACIONE PROMENE U RUDARSKO-METALUŠKIM KOMPANIJAMA U SRBIJI	
THE IMPACT OF DIGITAL TECHNOLOGY ON ORGANIZATIONAL CHANGES IN THE MINING AND METALLURGICAL COMPANIES IN SERBIA	37
Marija Milenković, Jane Paunković, Violeta Jovanović, Vesna Krstić	
DRUŠTVENI FAKTORI ODRŽIVOG RAZVOJA TOPLIČKOG OKRUGA I METODE VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA ZA IZBOR OPTIMALNOG MODELA RAZVOJA	
SOCIAL FACTORS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE TOPLICA DISTRICT AND MCDM FOR SELECTION THE OPTIMAL DEVELOPMENT MODEL	45
Nenad Marković, Slobodan Bjelić, Filip Marković	
PREDPROCESIRANJE U ANALIZI UTICAJA KAPACITIVNIH PARAMETARA VODOVA NA RAD ELEKTROENERGETSKE MREŽE	
PRE-PROCESSING IN AN ANALYSIS THE IMPACT OF CAPACITIVE PARAMETERS OF LINES ON OPERATION THE ELECTRIC POWER NETWORK	57
Slobodan Bjelić, Nikola Milenković, Irena Milojević	
ALGORITAM I SIMULACIJA TRANSIENTNIH PROCESA OPTEREĆENOGL NEOPTEREĆENOGL TRANSFORMATORA U ELEKTRIČNOJ MREŽI	
ALGORITHM AND SIMULATION OF A TRANSIENT PROCESS ON LOADED AND UNLOADED POWER TRANSFORMERS IN AN ELECTRICAL NETWORK	71
