

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR



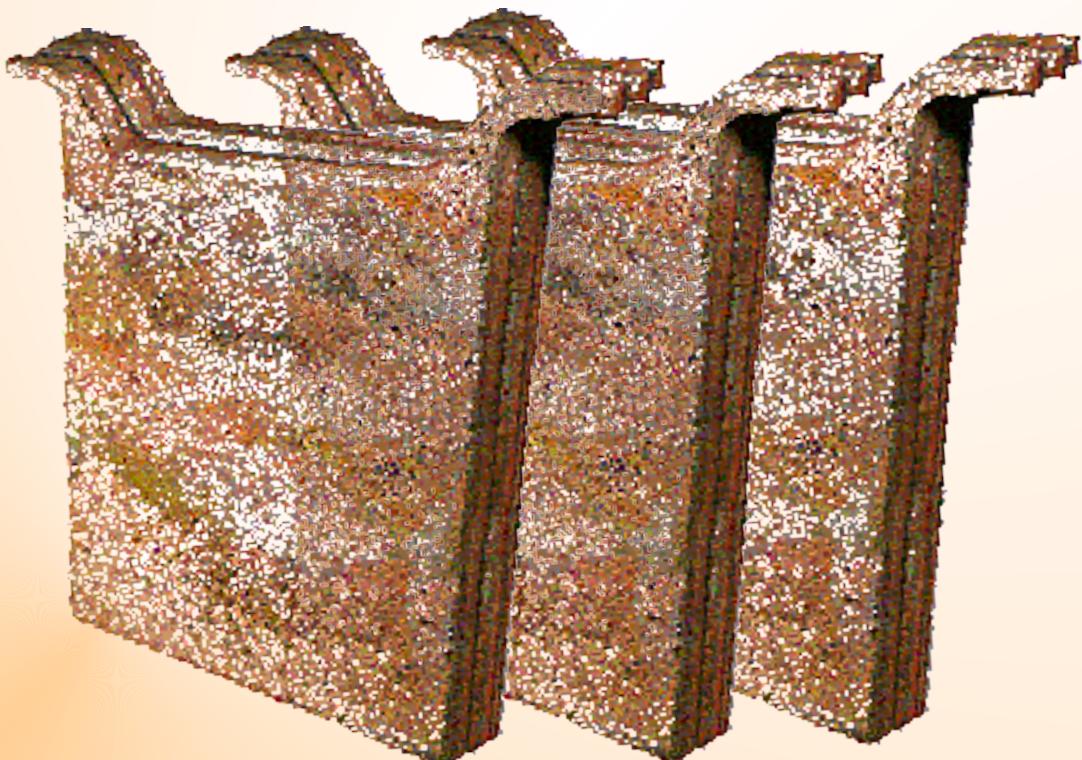
Cu

UDC 669.3

ISSN 0351-0212

Broj 1 Volumen 49 2024

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 urednik

Kostov Ana, *naučni savetnik*
Orcid: 0000-0001-6436-9091
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-108

Zamenik glavnog urednika

Milosavljević Aleksandra, *viši naučni saradnik*
Orcid: 0000-0003-3841-7357
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: aleksandra.milosavljevic@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-252

Urednik

Dr 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 nauke, tehnološkog razvoja i inovacija 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, Alberta Ajnštajna 1
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-101

Sva prava zadržana.

Članovi uredništva

Krasikov Sergey, redovni profesor
Institut za metalurgiju Uralskog odeljenja Ruske akademije nauka, Rusija

Mančić Lidija, naučni savetnik
Institut tehničkih nauka SANU, Srbija
Orcid: 0000-0002-6620-9582

Marković Radmila, viši naučni saradnik
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Srbija
Orcid: 0000-0001-9754-1150

Muntean Cornelia, redovni profesor
Politehnički univerzitet u Temišvaru, Rumunija

Sokić Miroslav, naučni savetnik
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd, Srbija
Orcid: 0000-0002-4468-9503

Stijepović Mirko, vanredni professor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, Srbija
Orcid: 0000-0003-3318-6836

Sharipov Rustam, profesor
Kazahstanski britanski tehnički univerzitet Almati, Republika Kazahstan

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

Kostov Ana, *Principal Research Fellow*
Orcid: 0000-0001-6436-9091
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-108

Co-Editor

Milosavljević Aleksandra, Senior Research Associate
Orcid: 0000-0003-3841-7357
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: aleksandra.milosavljevic@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-252

Editor

Ph.D. 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 Science, Technological Development and Innovation 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, Alberta Ajnštajna br. 1
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-101

All rights reserved.

Members of the Editorial Board

Krasikov Sergey, full professor
Institute of Metallurgy of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

Mančić Lidija, principal research fellow
Institute of Technical Science of SASA, Serbia
Orcid: 0000-0002-6620-9582

Marković Radmila, senior research associate
Mining and Metallurgy Institute Bor, Serbia
Orcid: 0000-0001-9754-1150

Muntean Cornelia, full professor
Polytechnic University of Timisoara, Romania

Sokić Miroslav, principal research fellow
Institute for Technology of Nuclear and Other Raw Materials Belgrade, Serbia
Orcid: 0000-0002-4468-9503

Stijepović Mirko, associate professor
University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade, Serbia
Orcid: 0000-0003-3318-6836

Sharipov Rustam, professor
Kazakh British Technical University Almaty, Republic of Kazakhstan

BAKAR 49 (2024) 1 COPPER

UDK: 661.92:628.539:669.04(045)=163.41

Primljen: 25.04.2024.

DOI: 10.5937/bakar2401001A

Prerađen: 30.04.2024.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 07.05.2024.

Oblast: Zaštita životne sredine

KVALITET VAZDUHA U GRADU BORU U 2023. GODINI

AIR QUALITY IN THE CITY OF BOR IN 2023

Tatjana Apostolovski-Trujić^{1a}, Bojan Radović^{1b}, Renata Kovačević^{1c}, Nevena Ristić^{1d}, Tamara Urošević^{1e}, Viša Tasić^{1f}, Vladan Kamenović^{1g}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

^{1a}E-mail: tanja.trujic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9369-160X>

^{1b}E-mail: bojan.radovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4884-1418>

^{1c}E-mail: renata.kovacevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4108-0855>

^{1d}E-mail: nevena.ristic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1408-237X>

^{1e}E-mail: tamara.urosevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9838-3702>

^{1f}E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>

^{1g}E-mail: vladan.kamenovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9476-5378>

Izvod

U ovom radu je analiziran kvalitet vazduha u gradu Boru tokom 2023. godine. U periodu od 01.05.2022. do 01.04.2023. godine, topionica bakra u Boru nije bila u radu zbog rekonstrukcije i povećanja kapaciteta. Rezultati analize pokazuju da u 2023. godini nije bilo prekoračenja dnevne granične vrednosti za koncentracije SO₂, PM₁₀ i čadi ni na jednom mernom mestu. U periodu tokom rekonstrukcije, za merno mesto Jugopetrol, korelacije (Pearson) između PM₁₀ i hemijskih elemenata Cd i As bile su umerene (0.6>r>0.4), dok su u periodu pre i nakon rekonstrukcije bile jake (0.8>r>0.6) i vrlo jake (r>0.8). Rezultati prikazani u radu jasno ukazuju na to da je i pored rekonstrukcije topionice bakra, problem emisije visokih koncentracija kancerogenih elemenata u PM₁₀ iz topionice bakra i dalje prisutan. Potrebno je hitno primeniti dodatne mere da se ove emisije svedu na zakonom predviđene vrednosti.

Ključne reči: kvalitet vazduha, monitoring, sumpor dioksid, arsen, kadmijum, topionica

Abstract

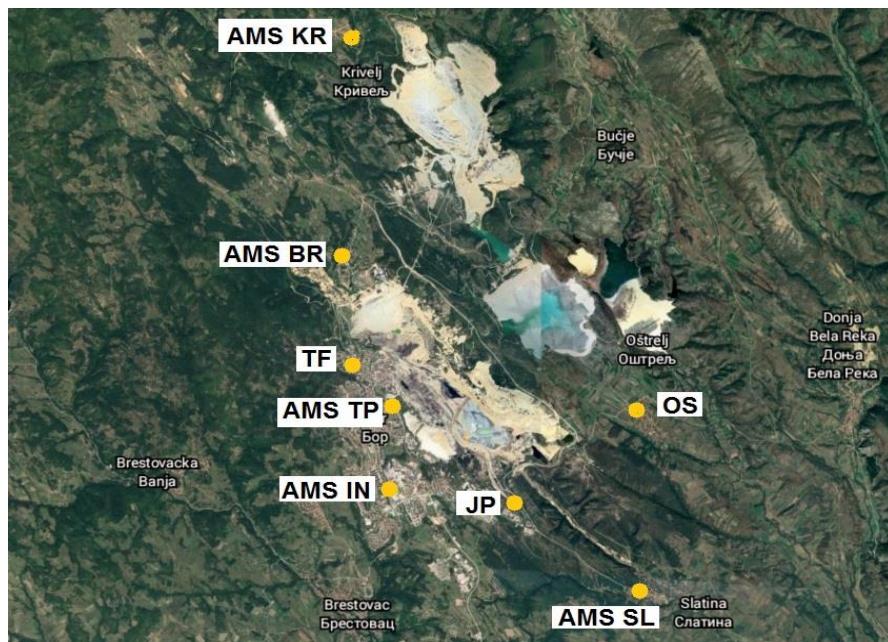
The air quality in the city of Bor in 2023 is analysed in this paper. In the period from May 1, 2022 until April 1, 2023 the copper smelter in Bor was not working due to reconstruction and capacity increase. The analyses show that in 2023, no exceeding of the daily limit value for SO₂, PM₁₀, and soot concentrations was detected at any measuring point. During the reconstruction of the copper smelter, correlation coefficients (Pearson) at measurement point "Jugopetrol" between PM₁₀ and the chemical elements Cd and As were moderate (0.6>r>0.4), while in the period before and after the reconstruction of the smelter, they were strong (0.8>r>0.6), and very strong (r>0.8). The results presented in the paper indicate that despite the reconstruction of the copper smelter, the problem of emission of high concentrations of carcinogenic elements in PM₁₀ from the copper smelter is still present. It is necessary to urgently implement additional measures to reduce these emissions to the values provided by law.

Keywords: air quality, monitoring, sulfur dioxide, arsenic, cadmium, smelter

1. UVOD

Zagađenje vazduha podrazumeva prisustvo hemikalija, čestica ili bioloških materijala koji nanose štetu ili uzrokuju nelagodnost kod čoveka i drugih živih bića, odnosno ugrožavaju prirodnu sredinu u atmosferi [1]. Do zagađenja vazduha dolazi kada se gasovi i mikroskopske čestice prašine (PM_{10} i $PM_{2.5}$) i čađi oslobođaju u atmosferu, što izaziva promenu prirodnog odnosa i koncentracije osnovnih komponenti vazduha. Ponekad ove čestice dospevaju u atmosferu prirodnim putem, na primer oslobođanjem usled prirodnih požara. Ipak, mnogo češće je slučaj da one dospeju u atmosferu kao posledica čovekovih aktivnosti.

U periodu do 2016. godine, u topionici bakra u Boru korišćena je zastarela tehnologija topljenja koncentrata bakra što je za posledicu imalo zagađenje životne sredine. Povećane koncentracije sumpor dioksida, iznad propisanih graničnih vrednosti za satne i dnevne koncentracije, detektovane su vrlo često na svim mernim mestima za kontrolu kvaliteta vazduha u Boru (merna mesta su prikazana na slici 1).



Sl. 1. Lokacije mernih mesta za monitoring koncentracija sumpor dioksida, čadi i suspendovanih čestica PM_{10} na teritoriji grada Bora
 (1. Gradski park - TP, 2. Institut - IN, 3. Brezonik - BR, 4. Krivelj - KR, 5. Slatina - SL,
 6. Jugopetrol - JP, 7. Tehnički fakultet - TF, 8. Oštrelj - OS)

U periodu od 2016. godine pa do danas, u topionici bakra u Boru koristi se *flash smelting* tehnologija topljenja koncentrata bakra [2], pri čemu su svi otpadni gasovi iz *flash* peći prerađuju u fabrici sumporne kiseline. Kao posledica emisija otpadnih gasova iz topionice bakra koje nisu obuhvaćene sistemima za preciščavanje, u periodu 2016. - 2021. godine, prisutno je zagađenje životne sredine usled povećanja obima proizvodnje u topionici bakra i rudnicima bakra u okolini Bora. Od avgusta 2021. godine počelo je sa radom postrojenje za odsumporavanje otpadnih gasova u topionici, tako da je većina otpadnih gasova iz procesa topljenja bakra prerađivana u ovom postrojenju pre emitovanja u atmosferu. U periodu 01.05.2022. do 30.04.2023. godine, topionica bakra u Boru nije radila zbog rekonstrukcije i proširenja kapaciteta [3,4]. Očekivanja su da nakon rekonstrukcije svi otpadni gasovi iz pogona u topionici bakra budu adekvatno tretirani pre ispuštanja u atmosferu. U ovom radu je analiziran kvalitet vazduha u gradu Boru u toku 2023. godine (u toku rekonstrukcije i nakon rekonstrukcije topionice bakra) u odnosu na period pre rekonstrukcije topionice (2021.) kada je topionica radila u kontinuitetu.

2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U tabeli 1 prikazane su srednje godišnje vrednosti koncentracija SO₂ u Boru, u 2021. i 2023. godini [5]. Radi poređenja, posmatran je period tokom 2021. godine (period pre rekonstrukcije) kada je topionica radila u kontinuitetu i period tokom 2023. godine (u toku rekonstrukcije i nakon rekonstrukcije topionice bakra). Na osnovu podataka iz tabele 1, na većini mernih mesta, srednje godišnje koncentracije SO₂ u 2023. godini značajno su niže u odnosu na vrednosti koncentracija SO₂ u 2021. godini. U toku 2023. godine nisu zabeležena prekoračenja srednje dnevne granične vrednosti za koncentraciju SO₂ ni na jednom mernom mestu, dok su u toku 2021. godine prekoračenja dnevne granične vrednosti zabeležena na svim mernim mestima, osim na mernom mestu SL i KR [5].

Tabela 1. Srednje godišnje koncentracije sumpor dioksida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) u Boru u 2021. i 2023. godini (Tehnički fakultet - TF, Gradski park - TP, Institut - IN, Jugopetrol - JP, Brezonik - BR, Slatina - SL, Krivelj - KR)

U periodu 2021.-2023. godine, koncentracija čadi određivana je na mernim mestima TP i IN. U 2023. godini, na ovim mernim mestima, srednje godišnje koncentracije čadi iznosile su $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respektivno. U posmatranom periodu (2021-2023) nisu zabeležena prekoračenja dnevne granične vrednosti za koncentraciju čadi ni na jednom mernom mestu [5].

U tabeli 2 prikazane su srednje godišnje vrednosti koncentracija PM_{10} u Boru, po mernim mestima, u 2021. i 2023. godini. Tokom 2023. godine nisu zabeležena prekoračenja godišnje granične vrednosti za koncentracije PM_{10} ni na jednom mernom mestu. Međutim, zabeležena su prekoračenja granične vrednosti za srednju dnevnu koncentraciju PM_{10} na mernim mestima: JP (52 dana), BR (48 dana) i OS (31 dan) [5]. U 2021. godini, prekoračenja granične vrednosti za srednju dnevnu koncentraciju PM_{10} zabeležena su na mernim mestima: BR (100 dana), JP (95 dana) i OS (64 dana) [5]. Iz rezultata datih u tabeli 2 uočava se neznatno smanjenje srednjih godišnjih vrednosti koncentracija PM_{10} na svim mernim mestima, osim na mernom mestu KR. Smanjenje u broju dana sa prekoračenjima granične vrednosti za srednju dnevnu koncentraciju PM_{10} u 2023. godini u odnosu na 2021. godinu evidentno je na svim mernim mestima, osim na mernom mestu KR [5].

Tabela 2. *Srednje godišnje koncentracije $\text{PM}_{10} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ u Boru u 2021. i 2023. godini
 (Gradski park - TP, Institut - IN, Jugopetrol - JP, Krivelj - KR, Brezonik -
 BR, Oštrelj - OS, Godišnja granična vrednost - LV)*

	PM ₁₀ _TP	PM ₁₀ _IN	PM ₁₀ _JP	PM ₁₀ _KR	PM ₁₀ _BR	PM ₁₀ _OS
2021	30.3	37.7	39.4	27.4	39.9	36.2
2023	23.4	33.8	35.1	28.5	34.2	28.8
LV	40					

U tabeli 3 prikazane su srednje godišnje koncentracije olova u PM_{10} u Boru, po mernim mestima, u 2021. i 2023. godini. Tokom 2023. godine nisu zabeležena prekoračenja godišnje granične vrednosti za koncentracije olova u PM_{10} ni na jednom mernom mestu. U 2023. godini zabeležena su prekoračenja granične vrednosti za srednju dnevnu koncentraciju olova u PM_{10} na mernom mestu JP (2 dana). U 2021. godini, prekoračenja granične vrednosti za srednju dnevnu koncentraciju olova u PM_{10} zabeležena su na mernim mestima: JP (34 dana) i IN (2 dana) [5]. Iz rezultata datih u tabeli 3 uočava se znatno smanjenje srednjih godišnjih vrednosti koncentracija olova u PM_{10} na svim mernim mestima u 2023. godini u odnosu na 2021. godinu. Ovakvo smanjenje koncentracija olova u PM_{10} u direktnoj je vezi sa smanjenim obimom prerade koncentrata bakra u topionici koji sadrže olovo.

Tabela 3. Srednje godišnje koncentracije Pb (ng/m^3) u PM_{10} u Boru u 2021. i 2023. godini (Gradski park - TP, Institut - IN, Jugopetrol - JP, Krivelj - KR, Brezonik - BR, Oštrelj - OS, Godišnja granična vrednost - LV)

	Pb_TP	Pb_IN	Pb_JP	Pb_KR	Pb_BR	Pb_OS
2021	169	208	332	18	81	47
2023	45	53	112	5	20	9
LV	500					

U tabeli 4 prikazane su srednje godišnje koncentracije arsena u PM_{10} u Boru, po mernim mestima, u 2021. i 2023. godini. Iz rezultata datih u tabeli 4 uočava se smanjenje srednjih godišnjih vrednosti koncentracija arsena u PM_{10} na svim mernim mestima u 2023. godini u odnosu na 2021. godinu. I pored toga, tokom 2023. godine zabeležena su prekoračenja godišnje ciljne vrednosti za koncentraciju arsena u PM_{10} na svim mernim mestima, osim na mernim mestima KR i OS. U periodu nakon rekonstrukcije topionice bakra, 01.04 - 31.12.2023. godine, na mernom mestu JP zabeleženo je 26 dana sa koncentracijama As u PM_{10} preko 20 puta višim od ciljne godišnje vrednosti ($6 \text{ ng}/\text{m}^3$).

Tabela 4. Srednje godišnje koncentracije As (ng/m^3) u PM_{10} u Boru u 2021. i 2023. godini (Gradski park - TP, Institut - IN, Jugopetrol - JP, Krivelj - KR, Brezonik - BR, Oštrelj - OS, Godišnja ciljna vrednost - CV)

	As_TP	As_IN	As_JP	As_KR	As_BR	As_OS
2021	74.7	40.6	123.0	7.1	33.1	17.7
2023	15.4	12.2	39.8	1.7	6.6	3.1
CV	6					

U tabeli 5 prikazane su srednje godišnje koncentracije kadmijuma u PM_{10} u Boru, po mernim mestima, u 2021. i 2023. godini. Iz rezultata datih u tabeli 5 uočava se povećanje srednjih godišnjih vrednosti koncentracija kadmijuma u PM_{10} na gotovo svim mernim mestima u 2023. godini u odnosu na 2021. godinu (osim na mernim mestima KR i OS). Tokom 2023. godine zabeleženo je prekoračenje godišnje ciljne vrednosti za koncentraciju kadmijuma u PM_{10} na mernom mestu JP. U periodu nakon rekonstrukcije topionice bakra, 01.04.2024. - 31.12.2023. godine, na mernom mestu JP zabeleženo je 13 dana sa koncentracijama Cd u PM_{10} preko 10 puta višim od ciljne godišnje vrednosti ($5 \text{ ng}/\text{m}^3$).

Tabela 5. Srednje godišnje koncentracije Cd (ng/m^3) u PM_{10} u Boru u 2021. i 2023. godini (Gradski park - TP, Institut - IN, Jugopetrol - JP, Krivelj - KR, Brezonik - BR, Oštrelj - OS, Godišnja ciljna vrednost - CV)

	Cd_TP	Cd_IN	Cd_JP	Cd_KR	Cd_BR	Cd_OS
2021	3.1	2.0	5.6	0.5	1.8	1.1
2023	3.6	2.7	9.5	0.5	1.9	0.7
CV			5			

U tabeli 6 prikazane su srednje godišnje koncentracije nikla u PM_{10} u Boru, po mernim mestima, u 2021. i 2023. godini. Iz rezultata datih u tabeli 6 uočava se smanjenje srednjih godišnjih vrednosti koncentracija nikla u PM_{10} na svim mernim mestima u 2023. godini u odnosu na 2021. godinu. Tokom 2023. godine nije zabeleženo prekoračenje godišnje ciljne vrednosti za koncentraciju nikla u PM_{10} ni na jednom mernom mestu. Ovakvo smanjenje koncentracija nikla u PM_{10} u direktnoj je vezi sa smanjenim obimom prerade koncentrata bakra u topionici koji sadrže Ni.

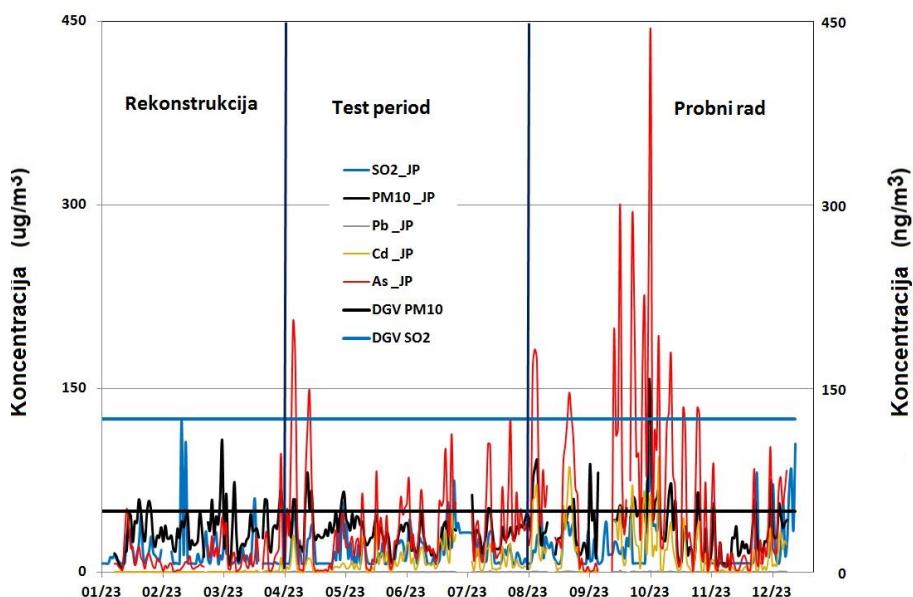
Tabela 6. Srednje godišnje koncentracije Ni (ng/m^3) u PM_{10} u Boru u 2021. i 2023. godini (Gradski park - TP, Institut - IN, Jugopetrol - JP, Krivelj - KR, Brezonik - BR, Oštrelj - OS, Godišnja ciljna vrednost - CV)

	Ni_TP	Ni_IN	Ni_JP	Ni_KR	Ni_BR	Ni_OS
2021	13.4	9.9	14.9	5.2	11.4	7.5
2023	<2	2.2	2.4	<2	<2	<2
CV			20			

Na slici 2 prikazane su srednje dnevne koncentracije zagadjujućih materija na mernom mestu JP izmerene tokom 2023. godine. Merno mesto JP je na pravcu dominantnog vетра koji iz pravca topionice bakra donosi zagađenje na ovo merno mesto. Prema rezultatima merenja koji su prikazani na slici 2, evidentno je da se i nakon rekonstrukcije topionice bakra, na ovom mernom mestu detektuju ekstremno visoke koncentracije kancerogenih elemenata u PM_{10} , poreklom iz topionice bakra.

U periodu rekonstrukcije topionice bakra nisu detektovane visoke koncentracije As i Cd u PM_{10} na mernom mestu JP. Prema tome, nameće se zaključak da su tokom 2023. godine, detektovane visoke koncentracije As i Cd u PM_{10} na mernom mestu JP, poreklom iz topionice bakra, odnosno da su rezultat prerade koncentrata bakra sa povećanim sadržajem As i Cd. To znači da su procentualne vrednosti ovih kancerogenih elemenata u koncentratu bakra u

pojedinim vremenskim periodima bile više u odnosu na vrednosti koje su predviđene u studiji o proceni uticaja na životnu sredinu projekta: Povećanje kapaciteta topionice bakra u okviru kompleksa „Serbia Zijin Copper” DOO [3]. Iz tog razloga je potrebno primeniti dodatne mere da se sastav koncentrata koji se prerađuju u topionici bakra u Boru redovno kontroliše i uskladi sa propisanim vrednostima u pomenutoj studiji [3] kako bi se sadržaj kancerogenih elemenata u suspendovanim česticama frakcije PM_{10} doveo na zakonom predviđene vrednosti, na svim mernim mestima u Boru.



Sl. 2. Srednje dnevne koncentracije zagađujućih materija na mernom mestu Jugopetrol - JP izmerene u toku 2023. godine (DGV - dnevna granična vrednost)

Rezultati korelace analize za merno mesto JP, u periodu 2022. - 2023. godine, prikazani u tabeli 7, pokazuju da su u periodu rekonstrukcije topionice bakra korelacije (Pearson coefficient of correlation, r) između PM_{10} i elemenata Cd, As bile umerene i pozitivne ($0.6 > r > 0.4$), dok su u periodu pre i nakon rekonstrukcije topionice bile jake i pozitivne ($0.8 > r > 0.6$) i vrlo jake i pozitivne ($r > 0.8$). U periodu rekonstrukcije, korelacija Pb sa PM_{10} , As i Cd bila je vrlo slaba ($r < 0.2$). Ovakvi rezultati korelace analize na mernom mestu JP, u periodu rada topionice bakra, jasno ukazuju da je izvor zagađenja suspendovanim česticama PM_{10} i hemijskim elementima As, Cd i Pb u PM_{10} , zajednički, te da to aerozagadenje potiče iz topionice bakra u Boru.

Tabela 7. Koeficijenti korelacije (Pearson) između koncentracija PM_{10} i hemijskih elemenata detektovanih u PM_{10} na mernom mestu JP u periodima pre rekonstrukcije topionice bakra (01.01.2022.-01.05.2022.), u toku rekonstrukcije topionice bakra (01.05.2022.-01.04.2023.) i nakon rekonstrukcije topionice bakra (01.04.2023.- 31.12.2023.)

Korelacioni koeficijenti u periodu pre rekonstrukcije topionice				
	PM10	As	Cd	Pb
PM10	1			
As	0.609	1		
Cd	0.615	0.804	1	
Pb	0.637	0.754	0.887	1
Korelacioni koeficijenti u periodu rekonstrukcije topionice				
	PM10	As	Cd	Pb
PM10	1			
As	0.518	1		
Cd	0.503	0.511	1	
Pb	0.124	0.403	0.171	1
Korelacioni koeficijenti u periodu nakon rekonstrukcije topionice				
	PM10	As	Cd	Pb
PM10	1			
As	0.718	1		
Cd	0.591	0.847	1	
Pb	0.612	0.843	0.842	1

3. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analiziran kvalitet vazduha u gradu Boru tokom perioda 2021. - 2023. godine. Rezultati analize pokazuju da u 2023. godini nije bilo prekoračenja godišnje granične vrednosti za koncentracije SO_2 , PM_{10} i čadi ni na jednom mernom mestu.

Rezultati prikazani u radu jasno ukazuju na to da je, i pored rekonstrukcije topionice bakra, problem emisije visokih koncentracija kancerogenih elemenata u PM_{10} iz topionice bakra i dalje prisutan, pošto je Pearson coefficient of correlation, r, između PM_{10} i elemenata Cd, As:

- u periodu rekonstrukcije topionice bakra bio umeren i pozitivan $0.6 > r > 0.4$,
- u periodu pre i nakon rekonstrukcije topionice bio je jak i pozitivan $0.8 > r > 0.6$, i vrlo jak i pozitivan $r > 0.8$.

Preporuka je da se pokrene postupak redovne kontrole sastava koncentrata bakra koji se prerađuju u topionici bakra u Boru i izvrši usklađivanje sa propisanim vrednostima za procentualni sastav kancerogenih elemenata u koncentratu bakra. Ove vrednosti su jasno definisane u Studiji o proceni uticaja na životnu sredinu projekta: „Povećanje kapaciteta topionice bakra u okviru kompleksa „Serbia Zijin Copper” DOO“.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2024. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-66/2024-03/ 200052.

Ovaj rad je finansijski podržan od strane programa Horizon Europe Research and Innovation program, u okviru ugovora o grantu br.101060170 - WeBaSOOP, "Research Reinforcing in the Western Balkans' in Offline and Online Monitoring and Source Identification of Atmospheric Particles."

LITERATURA

- [1] D. Knežević, D. Nišić, A. Cvjetić, D. Randelović, Monitoring u životnoj sredini - Odabранa poglavlja, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Urednik: Aleksandar Ganić, 2015, ISBN: 978-86-7352-288-3
- [2] Ilkka V Kojo, Hannes Storch, Copper production with Outokumpu flash smelting: an update, Sohn International Symposium: Advanced Processing of Metals and Materials, Volume 8 - International Symposium On Sulfide Smelting, 2006, Edited by Kongoli F. and Reddy R.G. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006.
- [3] Studija o proceni uticaja na životnu sredinu projekta: Povećanje kapaciteta topionice bakra u okviru kompleksa „Serbia Zijin Copper” DOO, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, jul 2021., i dopuna iz aprila 2022.
- [4] V.Tasić, T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Kamenović, Merenje kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u 2022. godini u periodu rekonstrukcije topionice bakra u Boru, Barakar, Vol.48, 1 (2023) 53-62.

- [5] Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor (IRM Bor), Laboratorija za hemijska ispitivanja, Odeljenje za zaštitu životne sredine i klimatske promene, Bor, Srbija: Godišnji i mesečni izveštaji o kvalitetu ambijentalnog vazduha u Boru za period 2021-2023. (Arhiva IRM Bor)

BAKAR 49 (2024) 1 COPPER

UDK: 628.539:661.984.“2010/2013“:“2019/2023“(045)=163.41

Primljen: 05.02.2024.

DOI: 10.5937/bakar2401011T

Prerađen: 09.05.2024.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 10.05.2024.

Oblast: Ekološko inženjerstvo

ANALIZA SEZONSKIH PROMENA KONCENTRACIJA AZOT DIOKSIDA U BORU U PERIODIMA OD 2010. DO 2013. GODINE I OD 2019. DO 2023. GODINE

ANALYSIS OF SEASONAL VARIATIONS IN THE NITROGEN DIOXIDE LEVELS IN THE CITY OF BOR IN THE PERIODS 2010-2013 AND 2019-2023

Viša Tasić^{1a}, Tatjana Apostolovski-Trujić^{1b}, Bojan Radović^{1c}, Nevena Ristić^{1d}, Tamara Urošević^{1e}, Vladan Kamenović^{1f}, Renata Kovačević^{1g}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

^{1a}E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>

^{1b}E-mail: tanja.trujic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9369-160X>

^{1c}E-mail: bojan.radovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4884-1418>

^{1d}E-mail: nevena.ristic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1408-237X>

^{1e}E-mail: tamara.urosevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9838-3702>

^{1f}E-mail: vladan.kamenovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9476-5378>

^{1g}E-mail: renata.kovacevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4108-0855>

Izvod

Pored saobraćaja glavni izvor azot dioksida u ambijentalnom vazduhu su i industrijska postrojenja u kojima se vrši sagorevanje na visokim temperaturama, kao što su toplane i topionice. U velikim gradovima azotni oksidi poreklom od saobraćaja su dominantna komponenta aerozagadjenja i predstavljaju važan izvor izloženosti i zdravstvenog rizika za ljude, posebno za one koji se kreću pored prometnih saobraćajnjica. U gradu Boru merenje koncentracija azot dioksida u realnom vremenu vrši se od 2010. godine na mernom mestu „Institut IRM Bor“ kod Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor. U ovom radu prikazana je analiza rezultata merenja koncentracija azot dioksida u Boru u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine. Na osnovu analize rezultata merenja azot dioksida ustanovljeno je da u oba posmatrana vremenska perioda postoje sezonske promene koncentracija azot dioksida (grejna/negrejna sezona). U posmatranim periodima koncentracije azot dioksida bile su u proseku 17% više u grejnoj sezoni u odnosu na koncentracije NO₂ izmerene u negrejnoj sezoni. Takođe, u periodu 2019.-2023. godine prosečna koncentracija azot dioksida iznosila je 28.6 µg/m³ što je za oko 18% više u odnosu na period 2010.-2013. godine u kome je prosečna koncentracija azot dioksida iznosila 24.3 µg/m³. U posmatranim vremenskim periodima zabeleženo je svega nekoliko dana sa prosečnom dnevnom koncentracijom azot dioksida iznad dnevne granične vrednosti od 85 µg/m³, međutim nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednju godišnju koncentraciju azot dioksida od 40 µg/m³.

Ključne reči: merenje, azot-dioksid, kvalitet vazduha, sezonske promene, saobraćaj

Abstract

In addition to traffic, the main source of nitrogen dioxide is also industrial plants where combustion takes place at high temperatures, such as heating plants and smelters. Nitrogen oxides from traffic are the dominant component of air pollution in large cities and represent an important source of exposure and health risk for people, especially those who move along busy roads. In Bor, real-time nitrogen dioxide concentrations have been measured since 2010 at the measuring point "Institute IRM Bor" near Mining and Metallurgy Institute Bor. This paper presents an analysis of the results of measuring nitrogen dioxide concentrations in Bor in the periods 2010-2013 and 2019-2023. Based on the analysis of nitrogen dioxide measurement results, it was established that in both periods there are seasonal changes (heating/non-heating season) in nitrogen dioxide concentrations. Nitrogen dioxide concentrations were on average 17% higher in the heating season than in the non-heating season. Also, in the period 2019-2023 the average concentration of nitrogen dioxide was $28.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which is about 18% more compared to the period 2010-2013 in which the average concentration of nitrogen dioxide was $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In the observed periods, there was no exceedance of the limit value for the average annual concentration of nitrogen dioxide of $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, several days were recorded with an average daily concentration of nitrogen dioxide above the daily limit value of $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Keywords: measurement, nitrogen dioxide, air quality, seasonal changes, traffic

1. UVOD

Azot oksid (NO) i azot dioksid (NO_2) su dva dominantna oksida azota koji nastaju iz različitih procesa sagorevanja, posebno pri visokim temperaturama ($>1000^\circ\text{C}$). Ambijentalne koncentracije ovih gasova značajno variraju u zavisnosti od intenziteta emisije iz lokalnih izvora. U ambijentalnom vazduhu, oksidi azota formiraju se kombinacijom kiseonika i azota pri visokim temperaturama tokom procesa sagorevanja. Što je temperatura sagorevanja veća, to se više azot oksida generiše. Najčešće se 90-95% oksida azota obično emituje kao azot oksid, a samo 5-10% kao azot dioksid, iako su uočene značajne varijacije ovih procenata u zavisnosti od vrste izvora emisije. U ambijentalnim uslovima, azot oksid se brzo oksiduje u vazduhu kako bi formirao azot dioksid pomoću dostupnih oksidanasa (kao što su kiseonik, ozon i organska jedinjenja) i ova brza oksidacija je takva da se obično azot dioksid smatra primarnim zagađivačem (polutantom) vazduha. Međutim, u zatvorenim prostorima, ovaj proces oksidacije je generalno mnogo sporiji.

U gasovitom obliku, azot dioksid je lako isparljiv, crvenkasto smeđe boje, teži od vazduha i ima karakterističan oštar miris koji se može osetiti pri koncentraciji NO_2 od $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.1 ppm). NO_2 reaguje sa vodom i rastvorljiv je u sumpornoj i azotnoj kiselini [1].

Smatra se da su emisije NO_2 iz saobraćaja (kao proizvod sagorevanja fosilnih goriva u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem) dominantan izvor NO_2 u ambijentalnom vazduhu u urbanim sredinama. Oko 40% emisije NO i NO_2 potiče od drumskog saobraćaja pri čemu Evropa i Severna Amerika učestvuju sa čak 25% [1]. U najznačajnije izvore NO_2 u zatvorenom prostoru

ubrajaju se duvanski dim i emisije iz peći za sagorevanje gasa, drveta, nafte i uglja. Azot dioksid iz prirodnih i antropogenih izvora na otvorenom takođe utiče na nivoe ovog gasa u zatvorenom prostoru. U ambijentalnim uslovima, kako napolju tako i unutra, azot dioksid postoji u gasovitom stanju, pa je inhalacija glavni put izloženosti ljudi ovom polutantu na sobnoj temperaturi.

Udisanje vazduha sa visokom koncentracijom NO₂ može iritirati disajne puteve u ljudskom respiratornom sistemu. Takvo izlaganje tokom kratkih perioda može pogoršati respiratorne bolesti, posebno astmu, što dovodi do respiratornih simptoma (kao što su kašalj, pištanje pri disanju ili otežano disanje). Duže izlaganje povišenim koncentracijama NO₂ može doprineti razvoju astme i potencijalno povećati osetljivost na respiratorne infekcije. Osobe sa astmom, kao i deca i starije osobe su potencijalno u većem riziku od uticaja NO₂ na zdravlje, u odnosu na ostali deo populacije.

NO₂ i drugi oksidi azota u interakciji sa vodom, kiseonikom i drugim hemijskim elementima u atmosferi utiču na formiranje kiselih kiša. Kisele kiše štete osetljivim ekosistemima kao što su jezera i šume.

1.1. Merenje koncentracija azot dioksida u Boru

U skladu sa Zakonom o zaštiti vazduha („Sl. glasnik RS“ br. 36/09 i 10/13) nadležnost nad državnom mrežom za praćenje kvaliteta vazduha na nivou Republike Srbije ima Agencija za zaštitu životne sredine (SEPA). Od svog osnivanja 2004. godine, SEPA je, u skladu sa finansijskim mogućnostima, radila na formiranju državne mreže za automatski monitoring kvaliteta vazduha u Republici Srbiji. Operativni monitoring kvaliteta vazduha, primenom automatskih referentnih metoda, realizuje se saglasno Uredbi o utvrđivanju programa kontrole kvaliteta vazduha u državnoj mreži („Sl. glasnik RS“ broj 58/11) i Uredbi o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha („Sl. glasnik RS“ br. 11/10, 75/10 i 63/13) [2]. Najveći broj automatskih mernih stanica (AMS) u okviru državne mreže monitoringa kvaliteta vazduha instaliran je u periodu 2009.-2013. godine (28 fiksnih mernih mesta i jedna mobilna stanica).

Krajem 2009. godine instalirana je AMS Institut IRM Bor (44°03'35.72"N, 22°06'05.16"E) čiji je izgled prikazan na slici 1. Ova AMS postavljena je u blizini Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, niz vетар u odnosu na topionicu bakra kada duvaju vetrovi iz pravaca sever-severoistok. Stanica se nalazi na oko 2 km jugozapadno od topionice bakra. Takođe, stanica je postavljena na rastojanju od 10 metara od glavne saobraćajnice u gradu, u cilju praćenja uticaja saobraćaja na koncentracije NO₂.

Oprema za monitoring kvaliteta vazduha na AMS Bor - Institut IRM Bor je data u tabeli 1.



Sl. 1. Automatska merna stanica Bor - Institut IRM Bor

Tabela 1. Oprema za monitoring kvaliteta vazduha na AMS Bor - Institut IRM Bor

Polutant	Metoda merenja	Standard/ Norma	Interval izveštavanja
SO ₂	SO ₂ Analizator - UV fluorescencija MODEL 100E, Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Proizvođač instrumenta: EAS Envimet Analytical Systems Ges.m.b.h., Austria; U skladu sa EN 14212 Kvalitet ambijentalnog vazduha - Standardna metoda za merenje koncentracije sumpor dioksida ultravioletnom fluorescencijom, TUV-Report: 936/21205926/B, 2007	EN 14212	1h
NO ₂	NO ₂ Analizator MODEL 200E, Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Proizvođač instrumenta: Envimet Analytical Systems Ges.m.b.h., Austria; USEPA: Reference Method Number RFNA 1194-099 CE: EN61326 (1997 w/A1: 98) Class A, FCC Part 15 Subpart B Section 15.107 Class A, ICES-003 Class A (ANSI C63.4 1992) & AS/NZS 3548 (w/A1 & A2; 97) Class A.	EN 14211	1h
CO	CO Analizator MODEL 300E/EM, Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Proizvođač instrumenta: EAS Envimet Analytical Systems Ges.m.b.h., Austria; USEPA: Reference Method Number EQOA-0992-087 CE: EN61010-1:90 + A1:92 + A2:95, EN61326 - Class A	EN 14626	1h

Realizacija projekata IPA 2012 pod nazivom „Establishment of an integrated environmental monitoring system for air and water quality“, deo „Supply of ICT equipment and software for Air Quality Monitoring System“ omogućila je da SEPA na svojoj web stranici u realnom vremenu prezentuje objedinjeni prikaz podataka automatskog monitoringa kvaliteta vazduha na području Republike Srbije [2]. Rezultati merenja koncentracija NO₂ koji su korišćeni u ovom radu preuzeti su sa zvanične web stranice SEPA. U ovom radu prikazana je analiza rezultata merenja koncentracija NO₂ u Boru u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine sa ciljem da se ispita postojanje sezonskih promena koncentracija NO₂ (grejna/negrejna sezona) i kakav je trend srednjih godišnjih vrednosti u posmatrаниm periodima.

2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

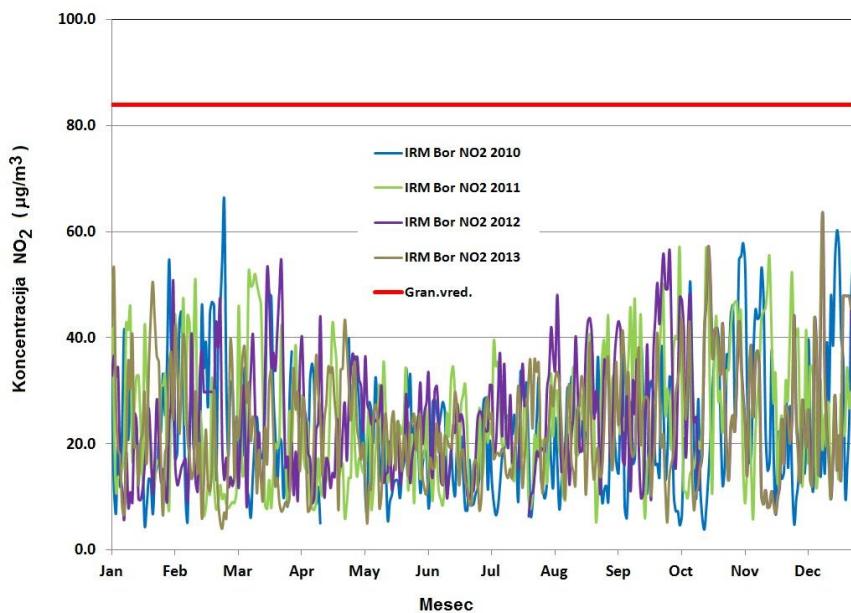
Koncentracija NO₂ koje se prate u realnom vremenu na AMS u Republici Srbiji dostupne su na web strani SEPA u vidu srednje satnih vrednosti, i to su preliminarne, neverifikovane vrednosti. U ovom radu korišćeni su verifikovani, otvoreni podaci životne sredine, preuzeti sa web strane SEPA [3]. U periodu 2014.-2018. vremenska reprezentativnost podataka o koncentracijama NO₂ u Boru bila je ispod 85%, tako da je iz tog razloga ovaj period isključen iz analize.

Tabela 2. *Srednje vrednosti koncentracija NO₂($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na mernom mestu AMS Institut IRM Bor u periodu 2010.-2013. godine (GS - grejna sezona, NGS - negrejna sezona)*

Godina	IRM Bor NO ₂	IRM Bor NO ₂ GS	IRM Bor NO ₂ NGS	NO ₂ GS/NGS
2010	23	26.6	20.4	1.30
2011	24	26.6	22.8	1.17
2012	25	24.9	25.3	0.98
2013	25	24.6	22.2	1.11
<i>Srednja vrednost</i>	<i>24.3</i>	<i>25.7</i>	<i>22.7</i>	<i>1.14</i>

U tabeli 2 prikazane su srednje vrednosti koncentracija NO₂ na mernom mestu IRM Bor u periodu 2010.-2013. godine pri čemu su posebno prikazane srednje vrednosti koncentracija NO₂ u grejnoj sezoni (periodi od 01.01. do 15.04. i od 15.10. do 31.12.) i u negrejnoj sezoni (period od 15.04. do 15.10.). Na slici 2 prikazane su srednje dnevne koncentracije NO₂ izmerene u periodu 2010.-2013. godine. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 2 i na slici 2 može se uočiti da je u periodu 2010.-2013. godine prisutna sezonska varijacija u koncentracijama NO₂ u Boru. U proseku su u grejnem periodu godine koncentracije NO₂ u Boru bile više za 13.2% u odnosu na koncentracije NO₂ izmerene u negrejnem periodu godine. Razlog tome je sagorevanje fosilnih

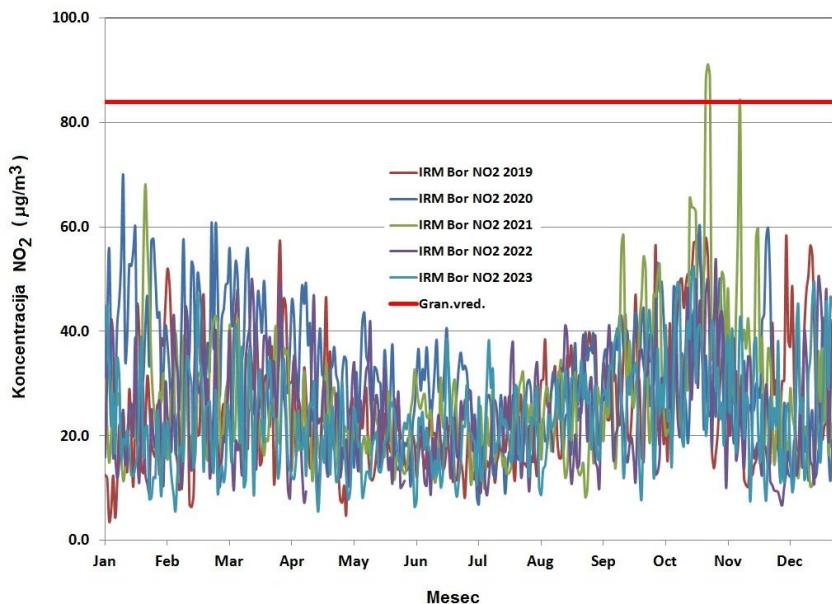
goriva za grejanje stambenih objekata tokom grejne sezone. U periodu 2010.-2013. godine nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevne i srednje godišnje koncentracije NO₂ u Boru.



Sl. 2. Srednje dnevne koncentracije NO₂ na mernom mestu IRM Bor
u periodu 2010.-2013. godine

Tabela 3. Srednje vrednosti koncentracija NO₂(µg/m³) na mernom mestu AMS Institut IRM Bor u periodu 2019.-2023. godine (GS - grejna sezona, NGS - negrejna sezona)

Godina	IRM Bor NO ₂	IRM Bor NO ₂ GS	IRM Bor NO ₂ NGS	NO ₂ GS/NGS
2019	29	31.5	26.7	1.18
2020	35	39.0	31.4	1.24
2021	31	34.8	27.5	1.27
2022	24	26.0	22.3	1.16
2023	24	24.9	22.3	1.11
<i>Srednja vrednost</i>	<i>28.6</i>	<i>31.2</i>	<i>26.0</i>	<i>1.19</i>



Sl. 3. Srednje dnevne koncentracije NO_2 na mernom mestu IRM Bor u periodu 2019.-2023. godine

U tabeli 3, kao i na slici 3, prikazane su srednje vrednosti koncentracija NO_2 na mernom mestu IRM Bor u periodu 2019.-2023. godine. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 3 i na slici 3 može se uočiti da je u periodu 2019.-2023. godine prisutna sezonska varijacija u koncentracijama NO_2 u Boru. U proseku su u grejnoj sezoni koncentracije NO_2 u Boru bile više za 20% u odnosu na koncentracije NO_2 izmerene u negrejnoj sezoni. Razlog tome je sagorevanje fosilnih goriva za grejanje stambenih objekata tokom grejne sezone, kao i veća emisija NO_2 iz topionice bakra i gradske toplane u periodu 2019.-2021. godine.

U periodu 2019.-2023. godine zabeleženo je nekoliko prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevne koncentracije NO_2 (4 dana tokom 2021. godine), dok u posmatranom periodu nije bilo prekoračenja srednje godišnje granične vrednosti za koncentracije NO_2 u Boru.

U periodu od maja 2022. do maja 2023. godine topionica bakra u Boru nije radila zbog rekonstrukcije i proširenja kapaciteta [4], što je jedan od razloga zašto su srednje godišnje koncentracije NO_2 u Boru u 2022. i 2023. godine niže nego u periodu 2019.-2021. godine.

Takođe, u periodu 2019.-2023. godine prosečna koncentracija azot dioksida iznosila je $28.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ što je za oko 18% više u odnosu na period 2010.-2013. godine u kome je prosečna koncentracija azot dioksida iznosila $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. U posmatranim vremenskim periodima zabeleženo je svega nekoliko dana sa prosečnom dnevnom koncentracijom azot dioksida iznad dnevne granične vrednosti od $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, međutim nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednju godišnju koncentraciju azot dioksida od $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kako na formiranje i rasprostiranje azot dioksida u ambijentalnom vazduhu utiču mnogi faktori, od kojih se na neke ne može uticati, (meteorološki uslovi) akcenat treba staviti na smanjenje emisija azot dioksida iz industrijskih postrojenja, odnosno na primenu savremenih tehnologija kojima se ove emisije svode na minimum.

Tabela 4. *Srednje godišnje vrednosti koncentracija NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) u Boru, Smederevu, Nišu i Beogradu u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine*

Godina	IRM Bor	Smederevo Centar	IZJZ NIŠ	Beograd Vračar
2010	23	16	36	35
2011	24	23	39	41
2012	25	20	43	38
2013	25	14	36	31
2019	29	32	20	28
2020	35	24	22	29
2021	31	27	26	24
2022	24	29	31	29
<i>Srednja vrednost</i>	<i>27.0</i>	<i>23.1</i>	<i>31.6</i>	<i>31.9</i>

U tabeli 4 prikazane su srednje godišnje vrednosti koncentracija NO_2 izmerene u Boru, Smederevu, Nišu i Beogradu u periodu 2010.-2013. i 2019.-2022. godine [5]. Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 4 može se primetiti da su prosečne godišnje koncentracije NO_2 u Nišu i Beogradu više u odnosu na prosečne godišnje koncentracije NO_2 koje su izmerene u Boru i Smederevu. Ovo ukazuje na znatan doprinos saobraćaja i lokalnih izvora na koncentracije NO_2 u većim urbanim centrima. Takođe, varijacije srednje godišnjih koncentracija NO_2 ukazuju i na značajan uticaj meteoroloških faktora (pre svega pravac i brzina veta) na vrednosti koncentracija NO_2 koje su izmerene na posmatranim mernim mestima.

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je analiza rezultata merenja koncentracija NO_2 u Boru u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine sa ciljem da se ispita da li postoje sezonske promene koncentracija NO_2 (grejna/negrejna sezona) i kakav je trend srednjih godišnjih vrednosti koncentracija NO_2 u posmatranim periodima.

Ustanovljeno je da postoje sezonske varijacije koncentracija NO_2 tokom godine. U posmatranom periodu koncentracije NO_2 bile su, u proseku, za 17% više u grejnoj sezoni u odnosu na koncentracije NO_2 izmerene u negrejnoj sezoni. Takođe, u periodu 2019.-2023. godine prosečna koncentracija azot dioksida iznosila je $28.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ što je za oko 18% više u odnosu na period 2010.-2013. godine u kome je prosečna koncentracija azot dioksida iznosila $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ovakav porast koncentracija NO_2 u periodu 2019.-2023. godine može se dobrim delom pripisati porastu proizvodnje u topionici bakra u periodu 2019.-2021. godine.

U posmatranim vremenskim periodima zabeleženo je svega nekoliko dana sa prosečnom dnevnom koncentracijom azot dioksida iznad dnevne granične vrednosti od $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, međutim nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednju godišnju koncentraciju azot dioksida od $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kako na formiranje i rasprostiranje azot dioksida u ambijentalnom vazduhu utiču mnogi faktori, od kojih se na neke ne može uticati, u narednim godinama akcenat treba staviti na kontrolu i smanjenje emisija azot dioksida iz industrijskih postrojenja i iz saobraćaja, odnosno na primeni savremenih tehnologija kojima se ove emisije svode na minimum.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2024. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-66/2024-03/ 200052.

Ovaj rad je finansijski podržan od strane programa Horizon Europe Research and Innovation program u okviru ugovora o grantu br.101060170 - WeBaSOOP, "Research Reinforcing in the Western Balkans' in Offline and Online Monitoring and Source Identification of Atmospheric Particles."

LITERATURA

- [1] D. Knežević, D. Nišić, A. Cvjetić, D. Randelović, Monitoring u životnoj sredini - Odabrana poglavља, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Urednik: Aleksandar Ganić, 2015, ISBN: 978-86-7352-288-3
- [2] <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=300&id=20028&akcija=showAll> (pristupljeno 28.01.2024.)
- [3] <http://data.sepa.gov.rs/> (pristupljeno 28.01.2024.)
- [4] V. Tasić, T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Kamenović, Merenje kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u 2022. godini u periodu rekonstrukcije topionice bakra u Boru, Baskar, Vol.48, 1 (2023) 53-62.
- [5] <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=5000&id=1304&akcija=showDocuments&tema=Vazduh> (pristupljeno 28.01.2024.)

UDK: 004.85:621.61(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2401021P
NAUČNI RAD
Oblast: Softversko inženjerstvo

Primljen: 17.04.2024.
Prerađen: 27.04.2024.
Prihvaćen: 30.04.2024.

PRIMER MODELOVANJA VIBRACIJA DUVALJKE ZA SO₂ METODOM MAŠINSKOG UČENJA

EXAMPLE OF MODELING SO₂ BLOWER VIBRATIONS USING THE MACHINE LEARNING METHOD

Marijana Pavlov-Kagadejev^{1a}, Milan Radivojević^{1b}, Predrag Stolić^{2a}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

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

^{1a} E-mail: marijana.pavlov@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1090-6351>

^{1b} E-mail: milan.radivojevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2337-0306>

^{2a} E-mail: pstolic@tfbor.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2574-4765>

Izvod

U radu je opisan primer primene mašinskog učenja za predikciju vibracija duvaljke za SO₂. Za formiranje modela korišćen je SVR (Support Vector Regression) algoritam. Prikazana je podela mašinskog učenja, kao i matematičke osnove SVM (Support Vector Machines) modela. Na osnovu velikog broja podataka, dobijenih pomoću monitoring sistema, formiran je matematički model. Nakon testiranja, kao mere tačnosti modela date su vrednosti za MSE i R².

Ključne reči: mašinsko učenje, SVM, algoritam, predikcija, vibracije

Abstract

This paper describes an example of applying the machine learning to predict the SO₂ blower vibrations. The SVR (Support Vector Regression) algorithm was used to form the model. The paper includes an overview of machine learning and mathematical fundamentals of the SVM model. Based on a large amount of data, obtained from the monitoring system, a mathematical model was constructed. After testing, the measures of model accuracy such as the MSE (Mean Squared Error) and R² were provided.

Keywords: machine learning, SVM, algorithm, prediction, vibration

1. UVOD

Do početka 2015. godine u RTB-u Bor radile su stara Topionica bakra i stara Fabrika sumporne kiseline, nakon čega su ove dve fabrike zamenjene novijom tehnologijom.

Tehnologija proizvodnje bakra u staroj Topionici je klasična pirometalurgija, kod koje se SO₂ gas dalje koristi u proizvodnji H₂SO₄ sa

relativno malim stepenom iskorišćenja <60%, što je dovodilo do zagadenja životne sredine uzrokovane većim koncentracijama SO₂. Kontrola emisije SO₂ gasa iz Toponice vršila se u postrojenju Fabrike sumporne kiseline [1].

Da bi se poboljšao sistem kontrole u staroj Fabrići sumporne kiseline, instaliran je industrijski PLC. Razvijena je odgovarajuća softverska aplikacija za praćenje parametara procesa kako bi se smanjilo zagadenje vazduha. Glavni ciljevi kontrolnog sistema bili su obrada podataka u realnom vremenu, prezentacija podataka (u obliku dinamičkih sinoptičkih šema, grafova u realnom vremenu i tabela) i upravljanje bazama podataka. Podaci koji su rezultat merenja instaliranog PLC-a, a postoje u arhivi Odeljenja za Energetsku informatiku Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru, iskorišćeni su u ovom radu.

U radu su prikazani rezultati primene matematičkog modela vibracija duvaljke za SO₂, dobijenog metodom mašinskog učenja. Cilj rada je da prikaže mogućnost primene mašinskog učenja u predikciji različitih vrsta merenih signala. Za modelovanje je korišćen SVR (eng. Support Vector Regression) algoritam. Korišćeni su mereni parametari (temperature ležajeva i vibracije duvaljke) iz stare Fabrike sumporne kiseline. Na osnovu analize velikog broja podataka iz postojeće baze, uočena je njihova međusobna zavisnost. Veliki broj podataka je omogućio izradu matematičkog modela, a dobijeni rezultati predikcije, pokazali su da ovakav način ima smisla primenjivati na različite vrste merenih signala u industriji.

SVM je relativno nova računarska metoda nadgledanog učenja zasnovana na teoriji statističkog učenja. Za razliku od većine metoda klasifikacije, SVM ne zahteva veliki broj uzoraka za obuku. Osim toga, SVM metoda može rešiti problem učenja čak i kada je dostupan samo mali broj uzoraka za obuku. Ovaj metod se primenjuje u različitim granama industrije. Jedna od primena je za automatsku dijagnozu neispravnosti valjakastih ležajeva [2].

Takođe, predložen je novi pristup izbora modela za prognoziranje vremenskih serija zasnovan na SVM klasifikaciji [3]. U radu [4], autori su predložili pristup mašinskog učenja za modeliranje i simulaciju izmenjivača topote. Predložena tehnika koristi SVM metod za predikciju performansi izmenjivača topote. Primer primene SVM modela u telekomunikacijama, dat je u radu [5], dok je u [6] opisana primena SVM modela u hemiji.

2. MAŠINSKO UČENJE

2.1 Mašinsko učenje i njegova primena

Oblast računarstva koja se najbrže razvija poslednjih decenija je veštačka inteligencija. Mašinsko učenje predstavlja oblast veštačke inteligencije koja se bavi izradom prilagođljivih računarskih modela, koji imaju sposobnost učenja iz

postojećih podataka. Ovi modeli mogu poboljšati svoje preformanse upotrebom informacija iz iskustva. Oni su korisni tamo gde algoritamska rešenja nisu na raspolaganju, gde postoji nedostatak formalnih matematičkih modela, ili kada je ograničena stručnost u razumevanju složenih funkcija. Ovi modeli imaju mogućnost pronalaženja novih zavisnosti između parametara, ispitujući odnose koji već postoje među njima. Primena mašinskog učenja postigla je dobre rezultate u mnogim oblastima, kao što je prepoznavanje govora, prepoznavanje rukom pisanih teksta, vožnja automobila, i sl. [7].

2.2 Tipovi mašinskog učenja

Postoje tri osnovna tipa mašinskog učenja:

- nadgledano učenje (učenje sa supervizijom),
- nenadgledano učenje (učenje bez supervizije), i
- polunadgledano učenje.

U prediktivnom, ili nadgledanom (nadziranom) pristupu, cilj je naučiti mapiranje od ulaza x do izlaza y , uzimajući u obzir označeni skup ulazno-izlaznih parova $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$. Oznaka D predstavlja *skup za obuku*, dok je N *broj primera za obuku*.

Slično tome, oblik izlazne ili odzivne promenljive u principu može biti bilo šta, ali većina metoda pretpostavlja da je y_i kategorička ili nominalna promenljiva, iz nekog konačnog skupa, $y_i \in \{1, \dots, C\}$, ili da je y_i realna skalarna vrednost. Kada je y_i kategorička, problem se naziva klasifikacija ili prepoznavanje obrazaca, a kada je y_i realna vrednost, problem se naziva regresija.

Drugi glavni tip mašinskog učenja je deskriptivni ili nenadgledani pristup učenju. Ovde su nam dati samo ulazi, $D = \{x_i\}_{i=1}^N$, a cilj je pronaći „interesantne obrasce“ u podacima. To se ponekad naziva otkrivanje znanja. Ovaj problem je znatno manje definisan, jer nije poznato kakve obrasce treba tražiti, i nema očiglednu meru greške koja se koristi (za razliku od nadgledanog učenja, gde možemo uporediti naše predviđanje y za dati x sa posmatranom vrednošću) [8].

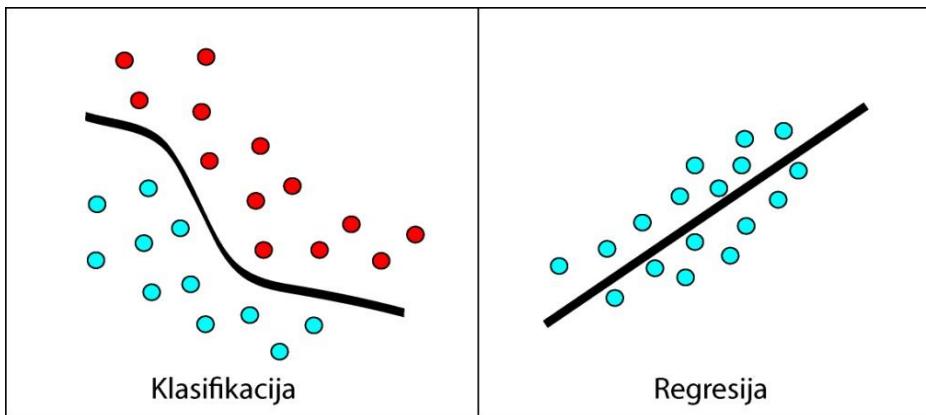
2.3 Primena nadgledanog mašinskog učenja

Postoje dva načina primene metoda nadgledanog mašinskog učenja: klasifikacija i regresija, slika 1.

Klasifikacija predstavlja problem razvrstavanja nepoznate instance u jednu od unapred ponuđenih kategorija – klasa i spada u jedan od najčešćih zadataka mašinskog učenja. Kako bismo bolje shvatili, ili organizovali stvari oko sebe, u

skladu sa našom prirodom je da ih klasifikujemo i kategorizujemo. Klasifikacija se uspešno primenjuje u: dijagnostikovanju bolesti, klasifikaciji kreditnih zahteva klijenata, proceni da li će i koji korisnici kupiti određeni proizvod, izboru ciljne grupe klijenata za marketinške kampanje, analizi slike, analizi glasa za biometrijske potrebe, i sl. Kod klasifikacije funkcija cilja je diskretna. U opštem slučaju, oznakama klase se ne mogu dodeliti numeričke vrednosti niti uređenje. To znači da je atribut klase, čiju je vrednost potrebno odrediti, kategorički atribut [7].

Kod *regresije* izlaz je kontinualan i može se kvantitativno izraziti (objektima odgovaraju vrednosti iz skupa realnih brojeva). Regresija se najčešće koristi za *predviđanje*. Primer regresije je predviđanje kretanja cene akcija na berzi ili cena nekretnina.



Sl. 1. Primeri klasifikacije i regresije kod nadziranog mašinskog učenja

2.4 Metoda potpornih vektora

Metoda potpornih vektora (eng. Support Vector Machines) je algoritam nadgledanog mašinskog učenja, prvobitno kreiran za rešavanje problema binarne klasifikacije. Potrebno je podatke podeliti u dva linearno razdvajiva skupa, dve klase, tako da mrgina između elemenata tih skupova bude maksimalna, kao što je prikazano na slici 2 [9]. SVM je u osnovi binarni klasifikator, ali se može proširiti tako da vrši klasifikaciju u proizvoljan broj klasa.

Neka je dat skup od N podataka $x_i, \{i = 1, 2, \dots, N\}$ za treniranje, koji pripada klasi $y_i \in \{-1, 1\}$ (za binarnu klasifikaciju). Smatra se da je ovaj skup linearno razdvajiv, ukoliko postoji težinski faktor w i konstanta b , takav da važi [10,11]:

$$w \cdot x_i + b \geq 1 \text{ za } y_i = 1 \quad (1)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1 \text{ za } y_i = -1 \quad (2)$$

Prethodni izrazi se mogu napisati u sledećem obliku:

$$y_i (w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad (3)$$

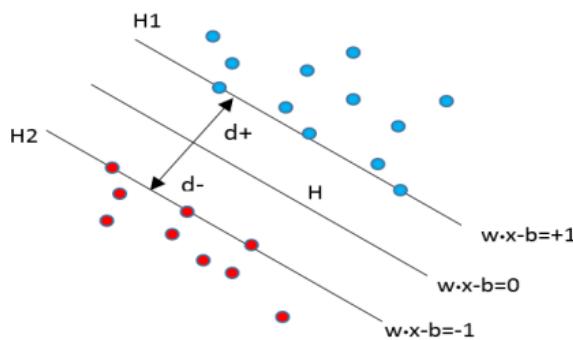
Ravni na kojima leže potporni vektori H₁ i H₂ mogu se prikazati sledećim izrazima:

$$w \cdot x_i + b = 1 \text{ za } H_1 \quad (4)$$

$$w \cdot x_i + b = -1 \text{ za } H_2 \quad (5)$$

Označimo rastojanja H₁ i H₂ od hiper-ravnih, sa d₁ i d₂, redom. H₁ i H₂ će biti podjednako udaljene od hiper-ravnih, kada je d₁ = d₂ = $\frac{1}{\|w\|}$, pri čemu vrednosti d₁ i d₂ nazivamo marginama.

Vektori x_i za koje važi jednakost $y_i(w \cdot x_i + b) = 1$, nazivaju se potporni vektori [10]. Da bi se izabrala hiper-ravan maksimalno udaljena od potpornih vektora, potrebno je da se marga maksimizira [7].



Sl. 2. Princip metode potpornih vektora [9]

Ukoliko skup podataka nije moguće razdvojiti bez greške, uvodi se nenegativna vrednost ε_i, koja predstavlja toleranciju greške, odnosno:

$$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \varepsilon_i \quad (6)$$

Ako skup podataka nije linearno razdvojiv u datom prostoru, moguće je izvršiti mapiranje ulaznog skupa podataka x_i u prostor više dimenzije, koristeći transformaciju φ(x_i), gde je razdvajanje moguće. Uvodi se tzv. kernel funkcija:

$$k(x_i, x_j) = φ(x_i)^T · φ(x_j) \quad (7)$$

Regresija primenom metode potpornih vektora (eng. Support Vector Regression - SVR) predstavlja algoritam koji je razvijen iz SVM metoda. Ovaj algoritam se koristi za regresiju. U slučaju regresije izlazna veličina nije

diskretna, kao kod klasifikacije, već je kontinualna i može se kvantitativno izraziti (kao realni broj, ili vektor realnih brojeva). Regresija se koristi često za predikciju različitih fizičkih veličina. Model se formira na osnovu poznatog skupa podataka za obučavanje (treniranje). Ovaj skup podataka sadrži ulazne veličine x i izlazne y . Nakon kreiranja modela, on će na osnovu poznatih ulaznih vrednosti x , biti u mogućnosti da predviđa nepoznate vrednosti izlaza y .

Prepostavimo da nam je dat skup podataka za obuku $\{x_i, y_i\}$, gde su x_i ulazi, a y_i izlazi. Pomoću regresije potpornih vektora, cilj je pronaći funkciju $f(x)$, čije je najveće odstupanje od stvarne vrednosti ε . Za regresiju zasnovanu na potpornim vektorima linearni model se može opisati kao:

$$f(x_i) = w \cdot x + b; \quad w \in R^N, b \in R \quad (8)$$

gde: predstavlja w težinski faktor, b je konstanta, a $w \cdot x$ označava skalarni proizvod. Veličine w i b se izračunavaju minimiziranjem na osnovu poznatog skupa podataka za treniranje.

$$\begin{aligned} & \min \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{uz uslove : } & \left\{ \begin{array}{l} y_i - f(x_i) \leq \varepsilon \\ f(x_i) - y_i \leq \varepsilon \end{array} \right. \end{aligned} \quad (9)$$

Prepostavljamo da postoji funkcija $f(x_i)$ koja aproksimira sve parove (x_i, y_i) sa preciznošću ε . U ovom slučaju, prepostavljamo da je problem izvodljiv. Ukoliko ne postoji model koji zadovoljava navedene uslove, uvode se tolerancije ξ_i i ξ_i^* i traži se rešenje problema optimizacije sa najmanjom greškom [12].

$$\begin{aligned} & f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ & \min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N |y_i - f(x_i)| \\ \text{uz uslove : } & \left\{ \begin{array}{l} y_i - f(x_i) \leq \varepsilon + \xi_i \\ f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (10)$$

gde je $C > 0$ konstanta koja predstavlja parametar koji određuje meru odstupanja većeg od ε , koje se može tolerisati.

3. REZULTATI DOBIJENI PRIMENOM SVR ALGORITMA

Za realizaciju regresije primenom metode potpornih vektora korišćena je LIBSVM biblioteka u MATLAB-u, sa radijalnom kernel funkcijom, odnosno:

$$k(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2), \gamma > 0 \quad (11)$$

Svi podaci su podeljeni na podatke korišćene za treniranje, tj. učenje modela i podatke za testiranje, tj. proveru tačnosti modela, tako da je 80% podataka korišćeno za treniranje, a 20% podataka za testiranje. Kada je formiran odgovarajući model na osnovu podataka iz skupa za treniranje, vrši se predikcija vrednosti podataka iz skupa za testiranje, koji nisu korišćeni za učenje modela, a zatim poređenje dobijenih aproksimativnih vrednosti sa stvarnim vrednostima, kako bi se utvrdila tačnost modela.

Kao mera tačnosti modela korišćena je srednja kvadratna greška (*MSE - Mean Squared Error*), koja predstavlja srednje kvadratno odstupanje između stvarne i procenjene vrednosti izlaznog parametra:

$$MSE(y, f(x)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \quad (12)$$

gde y_i predstavlja stvarne vrednosti izlaznog parametra, a $f(x_i)$ procenjenu vrednost dobijenu primjenjnim modelom. MSE uvek ima nenegativnu vrednost i vrednosti koje su bliže nuli označavaju tačniji model.

Pored toga, korišćen je i koeficijent determinacije R^2 koji je definisan jednačinom:

$$R^2(y, f(x)) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

gde \bar{y} predstavlja srednju vrednost stvarnih vrednosti izlaznog parametra. Što su vrednosti R^2 bliže jedinici, veća je tačnost modela.

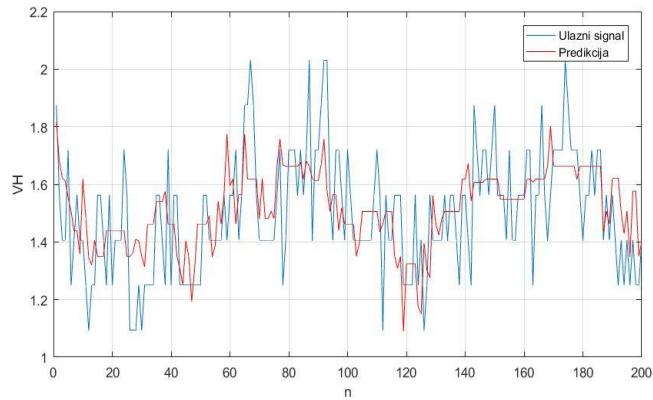
Za ispitivanje je korišćeno 1000, 2000, 5000 i 20000 podataka, pri čemu je 80% iz svake grupe podataka (tj. 800, 1600, 4000 i 16000), korišćeno za učenje (treniranje) modela, a 20% (tj. 200, 400, 1000 i 4000) podataka za testiranje modela, tabela 1. Kao ulazni parametri izabrane su temperature na ležajevima duvaljke (5 različitih temperatura), dok izlazni parametar koji je trebalo proceniti, predstavljaju vibracije duvaljke za SO₂.

Na slici 3 dat je prikaz vrednosti vibracija V_H koje su dobijene merenjem, uz pomoć opisanog nadzorno-kontrolnog sistema (ulazni signal) i vrednosti koje su proračunate uz pomoć matematičkog modela (predikcija), za različit broj ulaznih podataka (1000, 2000, 5000 i 20000).

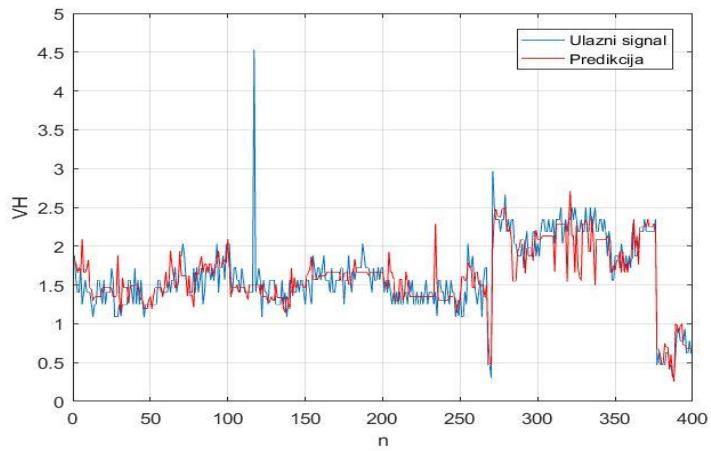
Tabela 1. Prikaz dobijenih vrednosti za MSE i R²

Br.podataka	1000	2000	5000	20000
MSE	0.03	0.08	0.11	0.52
R ²	0.33	0.66	0.94	0.96

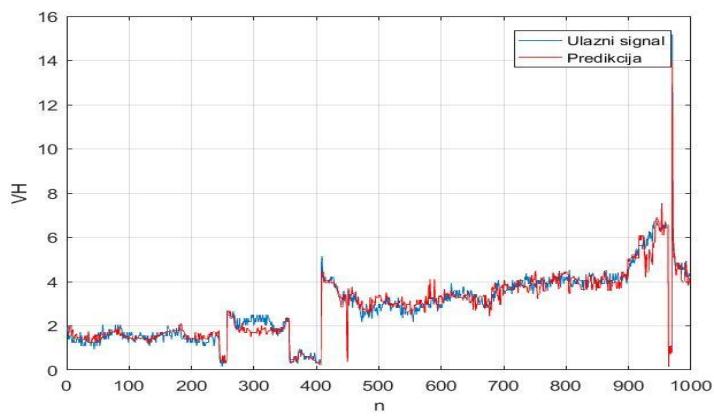
Kao rezultat primjenjenog matematičkog modela na 20000 podataka, dobijena je vrednost srednje kvadratne greške MSE= 0.517944, a za koeficijent determinacije R²= 0.965034. Ovo se sa stanovišta tačnosti matematičkog modela, može smatrati zadovoljavajućim.



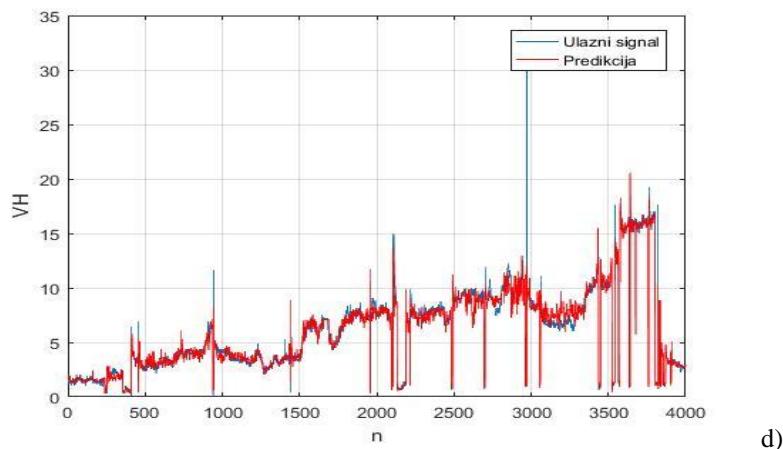
a)



b)



c)



Sl. 3. Uporedni dijagram ulaznog signala i signala dobijenog predikcijom pomoću SVR modela za a) 1000, b) 2000, c) 5000, d) 20000 podataka

4. ZAKLJUČAK

Primenom metoda mašinskog učenja na različite vrste merenih signala u industriji, mogu se dobiti veoma dobri rezultati u različitim oblastima merenja, što može pomoći u predviđanju budućih događaja i ponašanja mernih sistema (kao što je na primer predikcija otkaza sistema, i sl.). Na ovaj način, moguće je vršiti modelovanje bilo kog signala, ukoliko imamo dovoljno veliku bazu poznatih vrednosti parametara od kojih taj signal zavisi. Rezultati koji su dobijeni u ovom radu, dobijeni su samo na osnovu međusobne zavisnosti temperatura ležajeva i vibracija duvaljke za SO₂, iako su vibracije posledica uticaja velikog broja različitih faktora i parametara. Projektovani matematički model za testirane podatke, dao je MSE = 0.517944, a za koeficijent determinacije R²=0.965034, što se sa stanovišta tačnosti matematičkog modela može smatrati zadovoljavajućim.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor u 2024. godini, br. 451-03-66/2024-03/ 200052 i Univerziteta u Beogradu, Tehničkog fakulteta u Boru ugovor br. 451-03-65/2024-03/ 200131.

LITERATURA

- [1] V. Tasić, D. R. Milivojević, V. Despotović, D. Brodić, M. Pavlov, Improving Control System in the Sulfuric Acid Plant– ICEST2012, Proceedings, June 28-30 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria, pp. 573-576.
- [2] K.C. Gryllias, I.A. Antoniadis, A Support Vector Machine approach based on physical model training for rolling element bearing fault detection in industrial environments, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2) (2012) 326-344.
- [3] M. A. Villegas, D. J. Pedregal, J. R. Trapero, A support vector machine for model selection in demand forecasting applications, *Computers & Industrial Engineering*, 121 (2018) 1-7.
- [4] S. Muthukrishnan, H. Krishnaswamy, S. Thanikodi, D. Sundaresan, V. Venkatraman, Support vector machine for modelling and simulation of heat exchangers, *Thermal Science*, Vol. 24, 1B (2020) 499-503.
- [5] A. Rodan, H. Faris, J. Alsakran, O. Al-Kadi, A support vector machine approach for churn prediction in telecom industry, *International Journal on Information*, 17(8) (2014) 3961-3970.
- [6] H. Li, Y. Liang, Q. Xu, Support vector machines and its applications in chemistry, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 95(2) (2009) 188-198.
- [7] J. Đ. Novaković, Rešavanje klasifikacionih problema mašinskog učenja, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, 2013.
- [8] K. P. Murphy, Probabilistic machine learning: an introduction, MIT press, Cambridge, Massachusetts, 2022.
- [9] D. Aju, R. Rajkumar, A multi-stage hybrid cad approach for MRI brain tumor recognition and classification, *IJOAB Journal*, 7.1 (2016) 7-20.
- [10] C. Cortes, Vladimir Vapnik, Support-vector networks, *Machine learning*, 20 (1995) 273-297.
- [11] H. Getachew Girma, A tutorial on support vector machine, Center of Experimental Mechanics, University of Ljubljana, 2009.
- [12] T. B. Trafalis, B. Santosa, M. B. Richman, Learning networks in rainfall estimation, *Computational Management Science*, 2 (2005) 229-251.

BAKAR 49 (2024) 1 COPPER

UDK: 006.66.017:621.854:622(045)=163.41

Primljen: 26.04.2024.

DOI: 10.5937/bakar2401031M

Prerađen: 03.05.2024.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 07.05.2024.

Oblast: Rudarstvo i upravljanje kvalitetom

X-KONTROLNE KARTE KAO SREDSTVO STATIČKE KONTROLE KVALITETA ISPITIVANJA UŽADI ZA IZVOZNA POSTROJENJA U RUDARSTVU

X-CONTROL CHARTS AS A MEANS OF STATIC QUALITY CONTROL OF ROPE TESTING FOR EXPORT FACILITIES IN MINING

Slavica Miletić^{1a}, Biserka Trumić^{1b}, Suzana Stanković^{1c}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

^{1a} E-mail: slavica.miletic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4526-4715>

^{1b} E-mail: biserka.trumic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8328-7315>

^{1c} E-mail: suzana.stankovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5976-4502>

Izvod

Akreditovana Laboratorija za ispitivanje materijala u sklopu Instituta za rudarstvo i metalurgiju (IRM) Bor primarnu ulogu ima u ispitivanju čeličnih užadi za izvozna postrojenja u rudarstvu.

Pouzdani i validni rezultati ispitivanja zahtevaju posedovanje ispravne i kvalitetne opreme, kao i sposobljenost izvršilaca za tu vrstu ispitivanja.

Ispitivanje ispravnosti i pouzdanosti opreme vrši se pomoću sopstvenog referentnog materijala poznatih karakteristika, potvrđenih u drugim laboratorijama.

U radu su prikazani rezultati ispitivanja uzorka sopstvenog referentnog materijala na uređaju za ispitivanje jednostavnim uvijanjem.

Dobijeni rezultati korišćenjem X-kontrolne karte pokazali su da je metoda uvijanja uzorka pod kontrolom, tj. potvrđena je prihvatljivost dobijenih rezultata primenom ispitaniom metodom, čime je ispravnost uređaja na potrebnom nivou.

Ključne reči: X-Kontrolne karte, statička kontrola kvaliteta, ispitivanje užadi, rudarstvo

Abstract

Accredited Laboratory for Materials Testing within the Mining and Metallurgy Institute (MMI) Bor has a primary role in testing steel ropes for export facilities in mining.

Reliable and valid test results require the possession of correct and high-quality equipment, as well as the competence of the operators for this type of test.

Testing of the correctness and reliability of the equipment is carried out using our own reference material of known characteristics, confirmed in other laboratories.

The paper presents the results of testing samples of own reference material on a simple twisting test device.

The results obtained using the X-control chart showed that the method of twisting the samples is under control, i.e., the acceptability of the results obtained using the tested method was confirmed, which means that the correctness of the device is at the required level.

Keywords: X-Control charts, static quality control, rope testing, mining

1. UVOD

Jedan od najvažnijih zahteva savremenog poslovanja je kvalitet proizvoda i usluga zbog povećanja profita i opstanka na tržištu. Kvalitet proizvoda i usluga u rudarskom proizvodnom procesu predstavlja kontrolu proizvodne i organizacione aktivnosti. Program sistema menadžmenta kvalitetom (QMS) sprovodi se u okviru planiranja kompanije. Program obezbeđenja QMS rudarske kompanije uključuje: planiranje, izradu tehničke dokumentacije, merenje i kontrolu proizvodnog procesa, testiranje proizvoda i usluga, pakovanje, dostavu, servisiranje i kontrolu opreme i informacije o kvalitetu proizvoda. Godinama su menadžeri kompanija na razne načine pokušavali da kontrolisu svoje proizvode u cilju poboljšanja kvaliteta proizvoda, ali do generalizacije je došlo kada je Walter Shewhart razvio kontrolne karte. Kontrolne karte su opšte prihvaćena metodologija za praćenje i kontrolu proizvodnog procesa. Svrha kontrolnih karata je povećanje efikasnosti proizvodnje, smanjenje troškova, i jednostavno poboljšanje celokupnog poslovanja [1].

Kontrolne karte su danas u savremenom poslovanju postale neophodan alat za praćenje kvaliteta proizvoda i usluga. To su metode za jednostavnu interpretaciju i korišćenje. Spadaju među najjednostavnije alate on-line statičke kontrole procesa, čija je primena u savremenom poslovanju sve veća i neophodna. Statička kontrola procesa u poslednje vreme se pokazala kao pouzdan i nezamenljiv alat u kontroli proizvoda i usluga. Kontrolne karte predstavljaju inženjersko – matematičko sredstvo i pogodne su za ostvarenje ciljeva statičke kontrole [2].

Primena kontrolnih karta zahteva stručno osoblje koje poseduje znanje i angažovanje iz te oblasti i obuku iz standarda ISO/IEC 17025. Implementacija standarda ISO/IEC 17025 predstavlja „zlatni“ standard pri radu svih akreditovanih laboratorija [3].

U ovom radu prikazan je postupak primene X-kontrolne karte za kontrolu ispitivanja užadi jednostavnim uvijanjem. Karakteristično za ispitivanje jednostavnim uvijanjem je to što čelična žica tokom ispitivanja zadržava početni poprečni presek, tako da je lakše praćenje promene deformacije [4]. Jednostavno uvijanje ima znatno veću primenu kao tehnološko ispitivanje za žice nego za vratila i cevi [5].

Izbor autora za primenu X-kontrolne karte za kontrolu ispitivanja užadi jednostavnim uvijanjem je njihova jednostavna primena i pouzdanost rezultata.

X-kontrolne karte se najčešće koriste za kontrolu metoda prilikom ispitivanja uzoraka u laboratorijama. Proizvodne kompanije X-kontrolne karte primenjuju za kontrolu i praćenje procesa proizvodnje. X-kontrolne karte se koriste za meduproveru opreme i osoblja tokom procesa [6].

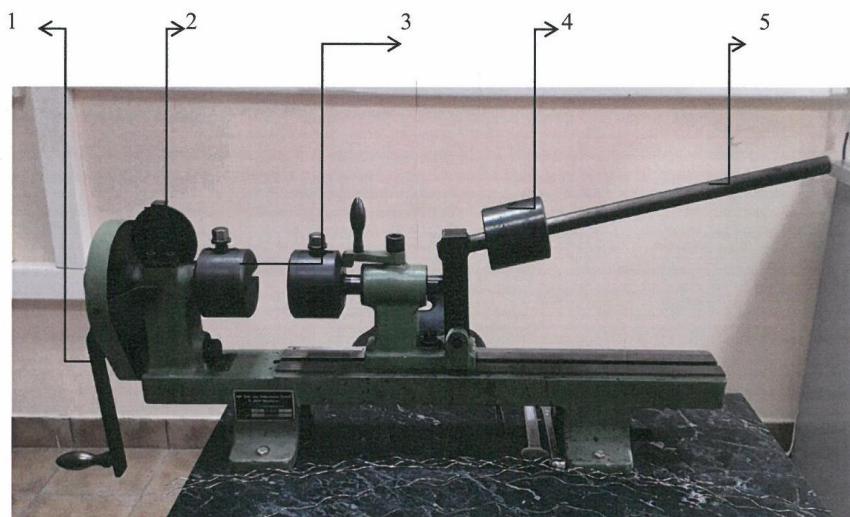
U radu je korišćena akreditovana standardna metoda za ispitivanje čeličnih žica (užadi) jednostavnim uvijanjem na sobnoj temperaturi, Metoda po zahtevima standarda ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Jednostavno ispitivanje uvijanjem. [7]

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1. Opis principa metode

Metoda po zahtevima standarda ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Jednostavno ispitivanje uvijanjem određuje broj uvijanja do preloma žice. [7]

Komad žice koji se koristi kao epruveta mora biti prav. Žica se ispravlja ručno, ili ako to nije moguće čekićem od bakra, pri čemu se žica postavlja na horizontalnu podlogu od sličnog materijala. Pri ispravljanju se ne sme oštetiti površina žice i epruveta ne sme biti izložena uvijanju.



Sl. 1. Uredaj za ispitivanje jednostavnim uvijanjem

Slika 1 prikazuje uređaj za ispitivanje jednostavnim uvijanjem sa osnovnim elementima:

- 1 - Ručica brojača
- 2 - Brojač
- 3 - Čeljusti
- 4 - Teg
- 5 - Ručica tega

Postupak metode ispitivanje metalne žice po standardu ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Jednostavno ispitivanje uvijanjem:

1. Obeležavanje i postavljanje uzorka: Uzorak se postavlja u otvore čeljusti, pri čemu je teg zakočen i u horizontalnom položaju.
2. Zatezanje uzorka (žice) se vrši viljuškastim klučem.
3. Brojač obrtaja postavimo na nulu.
4. Postupak merenja: kada se namesti uzorak u čeljust i učvrsti, odblokira se teg okretanjem ručice i krene se sa okretanjem ručice sa brojačem. Ručica sa brojačem se okreće nominalnom brzinom ispitivanja, sve dok uzorak ne pukne. Istovremeno krećemo sa uvijanjem uzorka i uključenjem sekundomera.
5. Uzorak se uvija konstatnom brzinom ručno, bez trzaja, i to najviše jedno uvijanje u 2 sekunde. Vodi se računa o ručnoj brzini uvijanja tako da ne dođe do zagrevanja uzorka koje može da utiče na rezultate ispitivanja.
6. Praćenje tokom merenja - broj uvijanja do preloma.
7. Završetak merenja - utvrđivanje broja uvijanja, N_t, do preloma i upisivanje rezultata merenja.
8. Izvlačenje delova uzorka iz čeljusti uređaja i odlaganje na definisanom i predviđenom mestu.
9. Istim postupkom vrše se X merenja.
10. Rezultati merenja se beleže.
11. Okretanjem ručice za 360° postiže se jedan obrtaj na bročajniku.
12. Brzina uvijanja ne sme biti veća od vrednosti datih u tabeli 2 prema Standardu ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Ispitivanje jednostavnim uvijanjem.

Nazivnu slobodnu dužinu epruvete određujemo na osnovu tabele 2 prema Standardu ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Ispitivanje jednostavnim uvijanjem.

Tabela 1. Nazivni prečnici i slobodne dužine između hvataljki [7]

a) Nazivni prečnik, d, b) mm	c) Slobodna dužina između hvataljki d) mm, (nominalno) ^a
e) 0,1 £ d < 1	i) 200 d
f) 1 £ d < 5	j) 100 d
g) 5 £ d £ 10	k) 50 d
h) 10 < d £ 14	l) 25 d ^b
^a Slobodna dužina između hvataljki je maksimum S 500 mm.	
^b Jedino za čelične žice.	

Tabela 2. Nominalna brzina ispitivanja za okruglu i oblikovanu žicu [7]

Nazivni prečnik d, ili karakteristična dimenzija D (h) mm	Najveći broj uvijanja u sekundi		
	Čelik	Bakar i bakarne legure	Aluminijum i aluminijumske legure
d (D) < 1	1	5	1
1 ≤ d (D) < 1,5	0,5	2	
1,5 ≤ d (D) < 3		1,5	
3 ≤ d (D) < 3,6		1	
3,6 ≤ d (D) < 5			
5 ≤ d (D) ≤ 10	0,25	0,5	

Po prekidu epruvete uredaj se zaustavlja. Poprečni presek zadržava početni oblik što omogućava da se izbroji broj uvijanja.

Za kvalitetno praćenje procesa ispitivanja užadi jednostavnim uvijanjem uzima se referentni materijal. Sva ispitivanja vrši isti izvršilac na istom uredaju koji je prethodno završio obuku za rad na uredaju za ispitivanje jednostavnim uvijanjem. Izvršilac (operator) osim što poseduje obuku za rad na uredaju za jednostavno uvijanje mora da prođe i obuku za standarde: SRPS ISO 9001:2015 i SRPS ISO IEC 17025:2017.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati ispitivanja pojedinačnih žica, užadi iz sopstvenog referentnog materijala jednostavnim uvijanjem prvog operatera dati su u tabeli 3, a drugog operatera u tabeli 4.

Na tačnost rezultata utiče greška uređaja za jednostavno uvijanje na kome se ispituje užad, greška uređaja za merenje prečnika užadi, mikrometar, kao i greška operatera.

Na osnovu srednjih vrednosti \bar{x} i kontrolnih granica (gornja i donja), predstavlja se X-kontrolna karta. Dijagram opsega mernih vrednosti prvog i drugog operatera prikazani su na slikama 2 i 3, respektivno.

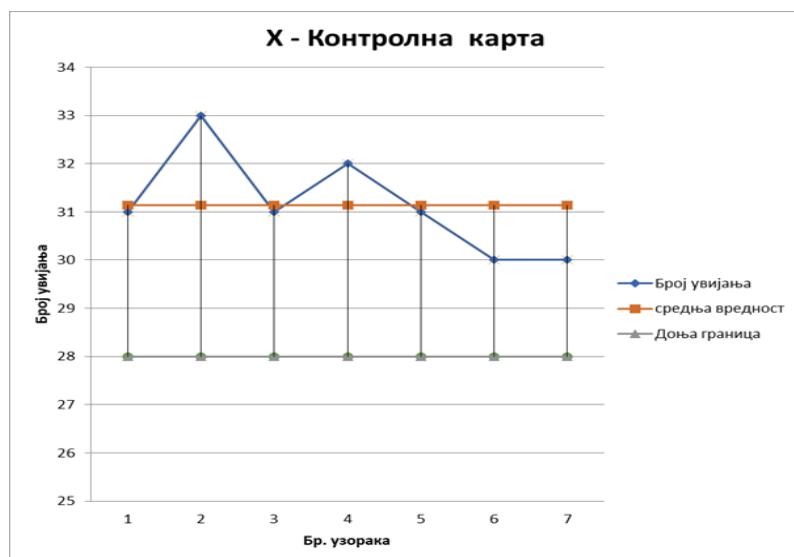
Tabela 3. Rezultati ispitivanja pojedinačnih žica, broj uvijanja, srednja vrednost i donja granica uvijanja prvog operatera

Broj uzoraka	Broj uvijanja	Srednja vrednost, \bar{x}	Donja granica	Prečnik žice, mm
1	31	31,14	28	2,25
2	33	31,14	28	2,25
3	31	31,14	28	2,25
4	32	31,14	28	2,25

5	31	31,14	28	2,25
6	30	31,14	28	2,25
7	30	31,14	28	2,25
\bar{x}	31,14			2,25
S _r	1,069			2,160247

\bar{x} - Srednja vrednost

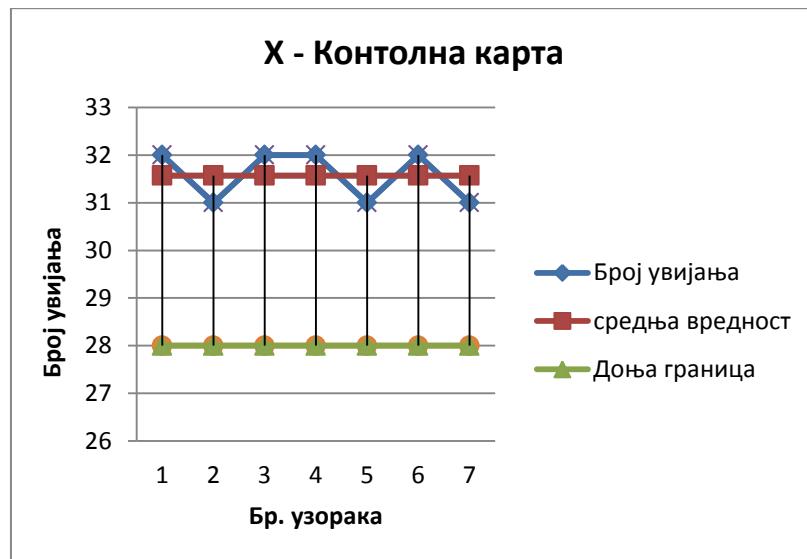
S_r - Standardno odstupanje



Sl. 2. X-Kontrolna karta prvog operatera

Tabela 4. Rezultati ispitivanja pojedinačnih žica, broj uviđanja, srednja vrednost i donja granica uviđanja drugog operatera

Broj uzoraka	Broj uviđanja	Srednja vrednost, \bar{x}	Donja granica	Prečnik žice, mm
1	32	31,57	28	2,23
2	31	31,57	28	2,23
3	32	31,57	28	2,23
4	32	31,57	28	2,23
5	31	31,57	28	2,23
6	32	31,57	28	2,23
7	31	31,57	28	2,23
\bar{x}	31,57			2,23
S _r	0,53			



Sl. 3. X-Kontrolna karta drugog operatera

Na osnovu zahteva standarda SRPS ISO 3154:2020, použena čelična užad za izvozna postrojenja u rudarstvu - Tehnički uslovi isporuke, datih u tabeli 5, vrednosti za nazivni prečnik žice su $d = 2,25\text{mm}^2 \pm 0,03\text{mm}$ i zatezne čvrstoće $R_m = 1570\text{N/mm}^2$, a iz sopstvenog referentnog materijala donja granična vrednost za broj uvijanja je 28.

Tabela 5. Najmanji broj uvijanja za $d=2,25\text{mm}$, $R=1570\text{N/mm}^2$ [8]

Ispitna dužina uzoraka	Nazivni prečnik žice d	Najmanji broj uvijanja ¹				
		Gola i pocinkovana žica kvaliteta B		Pocinkovana žica kvaliteta A		
mm	mm	Nazivna zatezna čvrstoća, N/mm ²				
		1570	1770	1960	1570	1770
100xd	$1,8 \leq d < 2,3$	28	26	21	17	14

¹Vrednost uvijanja se primenjuje na užad sa pljosnatim použavanjem.
Za užad sa profilisanim použavanjem koja imaju više slojeva okruglih žica u struktu, vrednosti date u tabeli 4 smanjuju se za uvijanje za svaki sloj.
Za užad sa profilisanim použavanjem koja imaju jedan sloj okruglih žica u struktu, vrednosti date u tabeli 4 smanjuju se za dva uvijanja.

Obzirom da broj uvijanja u toku ispitivanja svake pojedinačne žice nije bio manji od 28, pokazuje da je metoda za ispitivanje jednostavnim uvijanjem pod kontrolom, pa samim tim nema potrebe za korekcijom ispitivanja.

Dobijeni rezultati ispitivanja jednostavnim uvijanjem, dalje su poslužili za analizu ponovljivosti istih u tu svrhu.

Razlika između maksimalne (33/32) i minimalne vrednosti (30/31) od sedam ispitanih rezultata (tabele 3 i 4) poredi se sa kritičnim intervalom za $n=7$ ispitivanja kod 95% intervala verovatnoće.

Kritični stepen se izračunava kao $C_{RO95} = 4,2$. Vrednosti su date u tabeli 6.

Tabela 6. Faktori za kritični interval $f(n)$ [9]

n	f(n)	n	f(n)	n	f(n)	n	f(n)
2	2,8	14	4,7	25	5,2	37	5,4
3	3,3	15	4,8	26	5,2	38	5,5
4	3,6	16	4,8	27	5,2	39	5,5
5	3,9	17	4,9	28	5,3	40	5,5
6	4,0	18	4,9	29	5,3	45	5,5
7	4,2	19	5,0	30	5,3	50	5,6
8	4,3	20	5,0	31	5,3	60	5,8
9	4,4	21	5,0	32	5,3	70	5,9
10	4,5	14	4,7	33	5,4	80	5,9
11	4,6	22	5,1	34	5,4	90	6,0
12	4,6	23	5,1	35	5,4	100	6,1
13	4,7	24	5,1	36	5,4		

Pošto je dobijena razlika manja od izračunatog kritičkog intervala kod oba operatera, rezultati su ponovljivi, čime se potvrđuje prihvatljivost istih primenom ispitne metode.

4. ZAKLJUČAK

Primena X-kontrolne karte prilikom procesa ispitivanja užadi metodom po standardu ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Jednostavno ispitivanje uvijanjem, dijagram srednje vrednosti i kontrolne granice pokazuju da je metoda pod kontrolom.

Izračunati kritični interval je veći od razlike maksimalne i minimalne vrednosti određivanja ($X_{\max} - X_{\min}$), čime se potvrđuje prihvatljivost dobijenih rezultata primjenom ispitnom metodom, $(X_{\max} - X_{\min}) = 33 - 0 = 3$ kod prvog operatera. Takođe, i kod drugog operatera izračunati kritični

interval je veći od razlike maksimalne i minimalne vrednosti određivanja ($X_{\max} - X_{\min}$), čime se potvrđuje prihvatljivost dobijenih rezultata primjenom ispitnom metodom, $(X_{\max} - X_{\min}) = 32 - 31 = 1$

Na bazi ovakvih informacija rezultati ispitivanja užadi jednostavnim uvijanje su tačni.

X-kontrolne karte pokazuju da je proces stabilan, uređaj ispravan, implementirana metoda pod kontrolom i nisu potrebne korektivne mere.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor u 2024. godini, evidencijski broj 451-03-66/2024-03/ 200052.

LITERATURA

- [1] I. Vitez, M. Oruc, R. Sunulahpašić, Ispitivanje metalnih materijala-mehanička i tehnološka ispitivanja, Graforad, Zenica, BiH, 2006, str 48.
- [2] A. Ž. Drenovac, B. Ž. Drenovac, D. M. Drenovac, Kontrolne karte kao sredstvo statičke kontrole kvaliteta, Vojno tehnički glasnik, 1 (2013) 101-122, <https://doi.org/10.5937/vojtehg61-2292>
- [3] M. Đukić, S. Vasiljević, Z. Sovrlić, D. Adamović, Verifikacija i validacija analitičkih metoda u skladu sa standardom ISO/IEC 17025, Bakar, Vol. 48, 2 (2023) 25-34, <https://doi.org/10.5937/bakar2302025D>
- [4] V. Ivušić, M. Franz, Materijali I, Deo Mehanička svojstva materijala, autorizovana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1993/1994.
- [5] D. Čorić, Ž. Alar, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016/2017.
- [6] S. Miletić, B. Trumić, S. Stanković, Z. Stanojević Šimšić, Međuprovera opreme primenom X-Kontrolne karte u laboratoriji za ispitivanje materijala u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bakar, Vol. 48, 2 (2023) 9-14, <https://doi.org/10.5937/bakar2302009M>

- [7] Standard ISO 7800:2012 - Metalni materijali - Žica - Ispitivanje jednostavnim uvijanjem.
- [8] Standard SRPS ISO 3154:2014 - Použena čelična užad za izvozna postrojenja u rudarstvu - Tehnički uslovi isporuke.
- [9]. Š. Suljagić, Priručnik za obuku: Provera ispitnih metoda i određivanje merne nesigurnosti, 2002.

BAKAR 49 (2024) 1 COPPER

UDK: 621.314.24:621.316.925(045)=163.41

Primljen: 17.04.2024.

DOI: 10.5937/bakar2401041M

Prerađen: 10.05.2024.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 13.05.2024.

Oblast: Elektroenergetika

ZAŠTITA VN I SN VODOVA U ELEKTRODISTRIBUCIJI KRUŠEVAC SA POSEBNIM AKCENTOM NA MIKROPROCESORSKU RELEJNU ZAŠTITU

PROTECTION OF HV AND MV LINES IN ELECTRIC POWER DISTRIBUTION KRUŠEVAC WITH SPECIAL EMPHASIS ON MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION

Nenad Marković^{1a}, Uroš Jakšić^{2a}, Vladimir Rilak^{3a}, Strahinja Marković^{4a}

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

²Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, Odsek Zvečan,
38218 Leposavić, Srbija

³Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Ogranak Kruševac, Srbija

⁴Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini,
Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija

^{1a} E-mail: nen.mark74@yahoo.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6960-1953>

^{2a} E-mail: uros_jaksic@yahoo.com, Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1602-6657>

^{3a} E-mail: vladimir.rilak@ods.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-2631-9181>

^{4a} E-mail: stralemarkovic@gmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7812-8781>

Izvod

Cilj rada je predstavljanje načina implementiranja i upotrebe relajne zaštite sa posebnim akcentom na mikroprocesorsku relajnu zaštitu u Elektrodistribuciji Kruševac, a na osnovu prikazanih konkretnih primera podešenja i delovanja zaštitnih uređaja koji su prikupljeni iz prakse i rada na terenu.

U radu su korišćeni softverski paketi Test Universe za ispitivanje zaštite u TS „Kruševac 1“ na dalekovodu 1158B pravac prema „Kruševac 4“ na 110 kV mreži, kao i Sigra (Siemens) za analizu kvarova na mikroprocesorskim relajima SIEMENS, sa konkretnim primerom delovanja usmerene zemljospojne zaštite na 10 kV izvodu „Parunovac 9“ iz TS „Miloje Zakić“ u Kruševcu sa izolovanim zvezdištem u mreži 10 kV. Tokom ispitivanja na računaru je praćeno kretanje vrednosti struja i napona, vremena isključenja kao i karakteristike koje prikazuju rad svake zaštite.

Rad u praktičnom delu prikazuje detaljno povezivanje opreme za ispitivanje funkcija mikroprocesorskog zaštitnog relaja dalekovoda 110 kV. Za konkretan dalekovod dati su parametri, slike uređaja i kompletnе ispitne opreme kao i zvanične ispitne liste sa stvarnim vrednostima isključenja. Prednost savremenih mikroprocesorskih relaja se ogleda u tome da su sve funkcije objedinjene u jednu kompaktnu kutiju koje međusobno komuniciraju posebnim protokolima i time olakšavaju rad korisnicima.

Ključne reči: *relejna zaštita, Omicron, softverski paket Test Universe i Sigra, mikroprocesorski relaj, dalekovod*

Abstract

The aim of the paper is to present the method of implementing and using relay protection with a special emphasis on microprocessor relay protection in Electric power distribution Kruševac, and based on the presented concrete examples of settings and operation of protective devices that were collected from practice and paper in the field.

The software packages Test Universe were used in the paper for testing protection in TS „Kruševac 1“ on the 1158B transmission line in the direction of „Kruševac 4“ on the 110 kV network, as well as Test Universe software package for testing protection in TS „Kruševac 1“ on the 1158B transmission line in the direction of „Kruševac 4“ on the 110 kV network. During the test, movement of the current and voltage values, disconnection times, as well as characteristics that show operation of each protection were monitored on the computer.

The paper in the practical part shows the detailed connection of the equipment for testing the functions of the microprocessor protection relay of the 110 kV transmission line. For a specific transmission line, parameters, images of devices and complete test equipment, as well as official test lists with actual tripping values are provided. Advantage of modern microprocessor relays reflects in the fact that all functions are combined in one compact box that communicate with each other using special protocols and thus facilitate the work of users.

Keywords: *relay protection, Omicron, softver packege Test Universe and Sigra, microprocessors relay, transmission line*

1. UVOD

Električna energija predstavlja osnovni vid energije i preduslov je razvoja privrede svake zemlje. Elektroenergetski sistem je projektovan tako da proizvede električnu energiju u dovoljnim količinama, da zadovolji sadašnje i procenjene buduće potrebe korisnika na određenom području, da je prenosi do područja u kojima će se koristiti i potom distribuirati unutar tog područja. Da bi se obezbedio maksimalan povraćaj velikog ulaganja u opremu koja je potrebna za formiranje elektroenergetskog sistema i da bi korisnici bili zadovoljni pouzdanom uslugom, ceo sistem mora da bude neprekidno u funkciji bez većih kvarova [1].

U distributivnim preduzećima je sve više potrebna sigurna isporuka električne energije potrošačima i u tu svrhu se zahteva mreža sa što manjim brojem kvarova i ispada opreme [2]. Jednu od uloga u sprovodenju ovih zahteva ima relejna zaštita.

Zadatak relejne zaštite u elektroenergetskim postrojenjima je prvenstveno trajno nadziranje karakterističnih električnih ili drugih veličina štićenog objekta. U slučaju kvara ili opasnog pogonskog stanja potrebno je da relejna zaštita automatski preduzme sve potrebne mere da se kvar izbegne ili da se isti svedu na minimum i da se o tome obavesti pogonsko osoblje. Ispunjenojne svih uslova

koji se postavljaju pred relejnu zaštitu nije uvek moguće ispuniti i zato se često prave određeni kompromisi [3].

Uloga sistema relejne zaštite je pravovremeno otkrivanje stanja u elektroenergetskim sistemima pri kojima su prekoračene granične vrednosti pogonskih veličina i postojanje rizika od širenja poremećaja (kvarovi, smetnje) na veće područje i eliminisanje takvog stanja uz što manje posledice za elektroenergetski sistem u celini [4].

Oprema usvojena za otkrivanje takvih mogućih kvarova i smetnji naziva se „zaštitna oprema ili zaštitni relaj“ a sistem koji koristi takvu opremu naziva se „sistom zaštite“.

Zaštitni relaj je uređaj koji daje instrukcije za isključivanje neispravnog dela sistema. Ova akcija osigurava da se preostali sistem i dalje napaja električnom energijom i da štiti sistem od daljeg oštećenja usled kvara. Dakle, upotreba zaštitnih uređaja je potrebna u električnim sistemima od kojih se očekuje da generišu, prenose i distribuiraju električnu energiju sa najmanje prekida i vremena obnavljanja. Može se konstatovati da je upotreba zaštitne opreme veoma važna za minimiziranje efekata kvarova, koji inače mogu uništiti ceo elektroenergetski sistem [1,5].

U radu je predstavljen način provere funkcionisanja relejne zaštite dalekovoda 110 kV u stanju van pogona, tj. kada je dalekovod isključen. Merenjem i poređenjem proradnih simuliranih vrednosti struja i napona kvara, vremena isključenja i očekivanih parametara utvrđuje se ispravnost zaštitnih funkcija u postrojenju. Korišćena je moderna oprema Elektrodistribucije Srbije koja omogućava da se na jednostavan način simuliraju i analiziraju razne vrste kvarova.

Iako je u zadnjih par decenija literatura u vezi relejne zaštite postala dostupna i obimna, naročito u elektronskom obliku, uočava se da mali deo literature opisuje konkretne slučajeve ispitivanja i provere zaštitnih funkcija, naročito na naponskim nivoima 110 kV i više. Zato je cilj ovog rada da prikaže konkretne zadatke, opremu i način ispitivanja uređaja za relejnu zaštitu u Elektrodistribuciji Srbije.

2. VRSTE ZAŠTITA KORIŠĆENE ZA ANALIZU VN I SN VODOVA

U ovom delu je dat kratak osvrt na vrste zaštite koje su korišćene u ovom radu.

Poduzna diferencijalna zaštita se ugrađuje na „kratke“ vazdušne vodove i 110 kV kablove ili na vodove gde je teško ostvariti zadovoljavajuću

selektivnost zaštite. Prednost korišćenja podužne diferencijalne zaštite voda je u tome što je algoritam neosetljiv na parametre voda (tačne vrednosti impedanse) kao i na topologiju mreže (međuinduktivnost paralelnih vodova). Vodovi 110 kV koji su kraći od 10 km smatraju se „kratkim vodovima“ i saglasno tome vrši se izbor zaštita [6].

Distantna zaštita je univerzalna i najčešće korišćena funkcija za zaštitu visokonaponskih dalekovoda od kratkog spoja. Može se, naravno, koristiti i za zaštitu drugih objekata (transformatora, generatora, prigušnica), no najvažnija je primena kao zaštita dalekovoda. S obzirom da distantna zaštita ne mora nužno biti ugrađena neposredno uz štićeni objekat, važna karakteristika iste je mogućnost daljinskog rezervnog štićenja drugih elemenata mreže (susedni dalekovodi, sabirnički sastavi, energetski transformatori, kompenzacijске prigušnice, generatori).

Distantna zaštita se realizuje u distantnom releju (elektromehanički, statički) ili kao distantna funkcija u savremenom zaštitnom uređaju koji su po konstrukciji mikroprocesorski a po obimu i složenosti funkcionalnosti se dele na numeričke i na IED (Intelligent Electronic Device) [7].

Zaštita od prevelike struje (prekostrujna zaštita) je najraniji sistem zaštite koji se razvijao. U starim postrojenjima gde postoje elektromehanički i statički distantni releji na nadzemnim vodovima 400 kV, 220 kV i 110 kV uglavnom ne postoji rezervna prekostrujna zaštita. Tek sa pojavom mikroprocesorskih uređaja počinje primena prekostrujne funkcije kao rezervne i dopunske zaštite vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV. U prvoj fazi primene distantnih mikroprocesorskih uređaja koji su u sebi sadržali i jedan stepen prekostrujne funkcije u elektroenergetskom sistemu dolazi do primene prekostrujne zaštite kao rezervne zaštite vodova 400 kV, 220 kV i 110 kV [3].

Usmerena zemljospojna zaštita služi za detektovanje kvarova sa zemljom preko velikog otpora koji bi mogli da se nađu izvan opsega distantne zaštite. U elektroenergetskom sistemu Republike Srbije, ova vrsta zaštite obavezno se ugrađuje kao dopunska i rezervna zaštita nadzemnih vodova i to na naponskim nivoima 400 kV, 220 kV i 110 kV. Usmerena zemljospojna zaštita je blokirana ako je pobuđena distantna zaštita ili je u toku beznaponska pauza - ciklus APU funkcije. Organ smera usmerene zemljospojne zaštite radi na bazi vrednosti homopolarne snage P_0 , odnosno proizvoda nulte struje I_0 i nultog napona U_0 koja se javlja na mestu ugradnje releja pri kvarovima u mreži. Za pravilno podešenje usmerenog organa zemljospojne zaštite potrebni su podaci o veličini struje i napona nultog redosleda na mestu ugradnje releja pri zemljospoju na

kraju voda (susednom postrojenju) u minimalnom režimu elektroenergetskog sistema [8].

Mikroprocesorska zaštita je vrsta relejne zaštite koja se koristi poslednjih 20-tak godina i čija je primena u današnje vreme nezaobilazna. Njen nastanak se vezuje za otkriće poluprovodne tehnike.

Razvijanjem računarske tehnike došlo je i do ubrzanog razvoja mikrokontrolera (PLC-programmable logic controller), odnosno zaštite kao vrste PLC-a. Reč „programabilni“ se odnosi na glavnu mogućnost ovog uređaja a to je prilagođenje zahtevima korisnika [3].

PLC kao jedinica se sastoji od:

- procesora za izvršavanje upravljačkih akcija na polju podataka koje daju ulazni i izlazni moduli;
- uređaja za programiranje, gde se PLC kontrolna logika prvo razvija a zatim prenosi na U/I module;
- ulazni i izlazni moduli. Mediji za razmenu podataka između terenskih uređaja i procesora, takođe služe i kao alat za kontrolu.

3. UREĐAJ ZA ISPITIVANJE ZAŠTITE

Omicron CMC 356, slika 1, je uređaj za testiranje svih generacija i tipova zaštitnih releja [9]. Njegovi naponski, strujni i binarni ulazi i izlazi sa velikim dinamičkim opsegom, čine jedinicu sposobnom za testiranje čak i elektromehaničkih uređaja sa velikim opterećenjem.

Omicron je u ovom radu posebno opisan kao uređaj bez koga ne bismo mogli da ispitamo zaštitu. Uređaj se prvo povezuje sa računarom preko softvera „Test universe“. Neke od osnovnih funkcija softvera „Test universe“ su:

- kontrolisanje test signala;
- procesuiranje podataka merenja;
- kreiranje izveštaja;
- generisanje unosa podataka.

Osnovni princip rada ovog uređaja je da se poveže sa mikroprocesorskom zaštitom preko ispitne utičnice ili direktno na kleme. Tada se injektiraju struje i naponi na analogne inpute u zavisnosti od vrste zaštite.



Sl. 1. *Omicron CMC 356*

Zatim se uređaj povezuje sa objektom testiranja (zaštitom). Kod ovih veza postoji mnogo načina kako je to moguće realizovati. Jednu od realizacija je moguće ostvariti preko tipiziranih kablova koji se dobijaju uz uređaj koje je potrebno samo spojiti na pravom mestu u zaštiti. Drugi način je realizacija preko papučica i bananica ili preko ispitnih klema. Sve ovo je manje bitno u odnosu na to gde treba povezati, a u te svrhe se koriste šeme povezivanja.

Grafički način povezivanja uređaja je predstavljen na slici 2.



Sl. 2. *Povezivanje uređaja pomoću ispitnih klema*

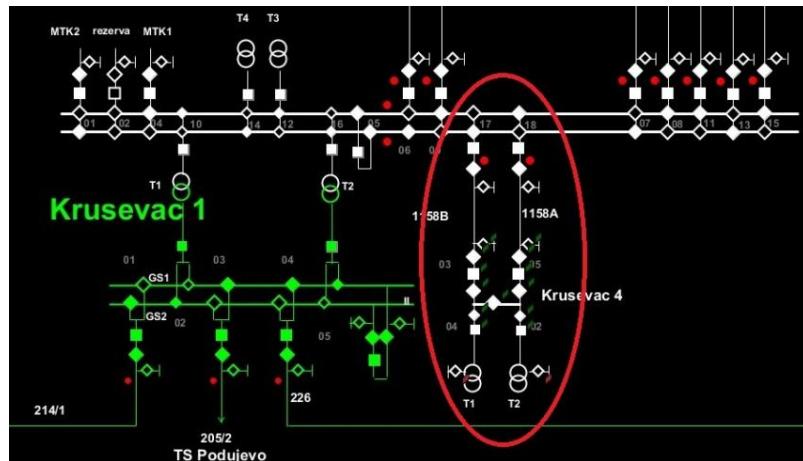
Ulagni signali u uređaju se prate sa vremenskom rezolucijom od $100 \mu\text{s}$ i zatim obrađuju u CPU. Binarni ulazi se konfigurišu iz modula za konfiguraciju softvera „Test Universe“. Kada se to uradi, može se navesti da li su kontakti potencijalno osetljivi ili ne. Kada su kontakti potencijalno osetljivi, očekivani nominalni napon i prag podizanja mogu se nezavisno kontrolisati za svaki binarni ulaz. Binarnih izlaza ima manje, na raspolaganju su četiri binarna izlaza kao bespotencijalni relejni kontakti.

Ovde moramo naglasiti da je cilj ispitivanja da se proveri da li zaštita, koja je implementirana u ovaj PLC radi na adekvatan način; da li je smer dobar i da li su zadata vremena reagovanja zaštite odgovarajuća.

4. ISPITIVANJE RELEJA PODUŽNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE U TS „KRUŠEVAC 4“ U DV POLJU 1158B - DOVOD 110 KV IZ TS „KRUŠEVAC 1“ (SA FUNKCIJOM DISTANTNE ZAŠTITE)

U nastavku ovog rada date su slike opreme [10] koja se nalazi u transformatorskoj stanici (TS) 220/110/35 kV „Kruševac 1“ i to na pravcu dalekovoda 1158B (i 1158A) do TS „Kruševac 4“ i koja je poslužila za ispitivanje zaštite.

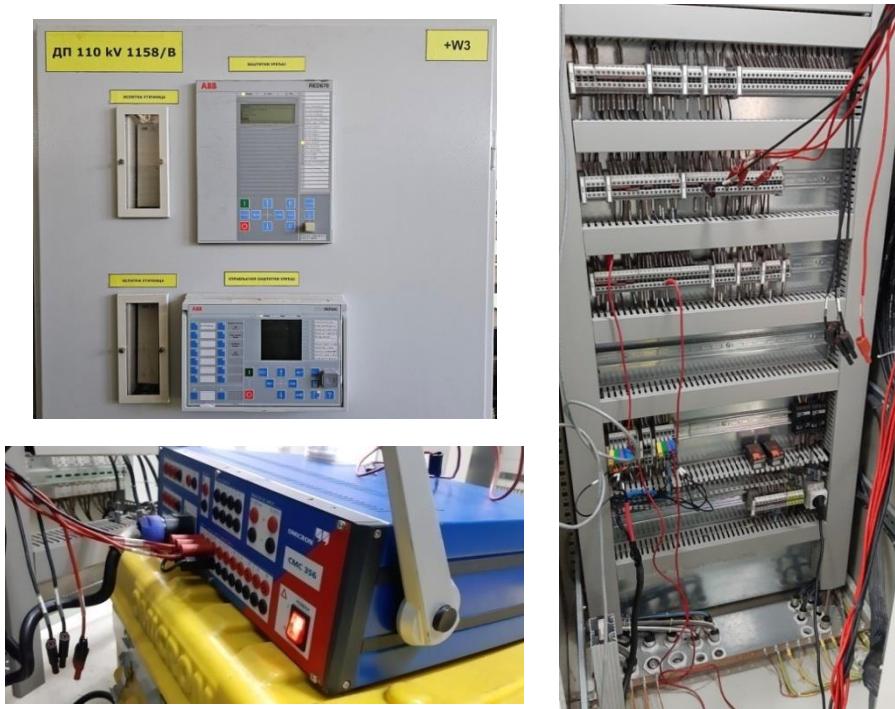
Na slici 3 su prikazana dva paralelna voda 110 kV koji napajaju TS „Kruševac 4“, čija je instalisana snaga 2×115 MVA.



SL. 3. SCADA sistem - jednopolna šema dalekovoda 1158B (i 1158A)

Ispitivanje releja podužne diferencijalne zaštite je vršeno na dalekovodu 1158B (postupak je isti i za dalekovod 1158A, samo su različiti rezultati istraživanja).

Prvo se pristupilo povezivanju razvodnog ormana u kome se nalazi zaštitna i upravljačka jedinica dalekovoda 1158B i Omicron uređaja. Zatim se iz projekta izvedenog stanja, tačnije iz „šeme delovanja“ nalaze kleme do kojih stižu struje/naponi sa sekundara strujnog/naponskog mernog transformatora i odakle odlaze ka izvršnim relezima. Sa tih klema je pomoću „papučica“ („bananica“) povezan analogni input instrumenta čime je obavljeno povezivanje trougla računar-OMICRON-zaštita, slika 4.



Sl. 4. Povezivanje razvodnog ormana DV polja 1158B i Omicron uređaja

Vrste zaštite koje su ispitivane ovom prilikom su sledeće:

- prekostrujna zaštita;
- rezervna prekostrujna i zemljospoljna zaštita;
- usmerena zemljospojna zaštita;
- distantna zaštita;
- nesimetrija struja;
- teleprotekcija za distantnu zaštitu;
- automatsko ponovno uključenje (APU);
- uključenje na kvar (SOTF);
- lokator kvara (fault locator).

Na slici 5 je prikazana tipična ispitna lista koja se koristi pri svim redovnim kontrolama pre podešenja i provera reljne zaštite u Elektro distribuciji Srbije (diferencijalna, distantna, prekostrujna i usmerena zemljospojna zaštita).

Pri redovnim revizijama transformatorskih stanica i opreme, sačinjava se lista nalik listi na slici 5. Pre svega se oprema koja se ispituje pregleda vizuelno. Ako se ne uoče nikakvi nedostaci prelazi se na funkcionalno ispitivanje.

2. PODEŠENJE OSNOVNE ZAŠTITE

2.1. PODEŠENJA DIFERENCIJALNE ZAŠTITE

	ΔI	t (s)
Podešenje podužne dif. zaštite ΔI	0.2 In	0

2.2. PODEŠENJA DISTANTNE ZAŠTITE

STEPEN	$R_{FPE}(\Omega)$	$R_{FPP}(\Omega)$	$R_i(\Omega)$	$X_i(\Omega)$	$R_o(\Omega)$	$X_o(\Omega)$	SMER	VREME (s)
I stepen	4.00	1.00	0.29	0.94	0.72	3.13	napred	0.05
II stepen	5.00	15.00	1.21	3.94	3.03	13.13	napred	0.4
III stepen	50.00	25.00	6.77	22.00	16.92	73.33	napred	0.8
IV stepen	10.00	5.00	0.81	2.64	2.03	8.80	nazad	3.2

Napomena: Podešenja su data u primarnim vrednostima

2.3. PODEŠENJE PREKOSTRUJNE ZAŠTITE

	I	t (s)
Prekostrujna zaštitna funkcija $I >$	1.8 In	0.6
Prekostrujna zaštitna funkcija nulte komponente $I_0 >$	0.4 In	0.6

NAPOMENA: Prekostrujna zaštita je aktivna sa ispadom automata naponskih kola.

2.4. PODEŠENJE USMERENE ZEMLJOSPOJNE ZAŠTITE

Tip karakteristike	Normalno inverzna
Podešenje min napona polarizacije UpoMin	$3U_0=5V$
Podešenje strujne nulte komponente $3I_0 >$	$3I_0=0.2A=20\%I_n$
Smer delovanja zaštite (3U0 referentni napon)	napred
Vremenski umnožak (time multiplier) – k1	0.67 s
Minimalno vreme delovanja - t1 min	2.1 s

Sl. 5. Podešenja zaštite distantnog releja [11]

Ispitna lista je koncipirana tako da se provere sve vrste zaštita koje su implementirane na dalekovodu.

Nakon vizuelnog ispitivanja prelazi se na najznačajniji vid zaštite dalekovoda, distantnu zaštitu.

Na slici 6 su prikazani osnovni parametri dalekovoda 110 kV (električni parametri: otpornost, ugao dalekovoda, koeficijent zemljospojja) i opreme koja se nalazi u dalekovodnom polju (prenosni odnosi naponskog mernog transformatora i strujnog mernog transformatora, očekivana sopstvena vremena

isključenja prekidača, i dr.). Ovde su podešeni i parametri tolerancije - koliko je prihvatljivo da zaštitni uređaj deluje pre ili kasnije od podešenog vremena ili struje/naponu.

Krusevac4 E3 Ispitivanje distantnih zona:

Test Object - Device Settings

Substation/Bay:

Substation:	TS 110/35 Krusevac 4	Substation address:	Krusevac
Bay:	DV 1158B Krusevac1	Bay address:	E3

Device:

Name/description:	RED670	Manufacturer:	ABB
Device type:	1MRK004810-CC	Device address:	Krusevac
Serial/model number:	T1405185		
Additional info 1:			
Additional info 2:			

Nominal Values:

f nom:	50.00 Hz	Number of phases:	3
V nom (secondary):	100.0 V	V primary:	110.0 kV
I nom (secondary):	1.000 A	I primary:	600.0 A

Residual Voltage/Current Factors:

VLN / VN:	1.000	IN / I nom:	1.000
-----------	-------	-------------	-------

Limits:

V max:	100.0 V	I max:	3.000 A
--------	---------	--------	---------

Debounce/Deglitch Filters:

Debounce time:	3.000 ms	Deglitch time:	0.000 s
----------------	----------	----------------	---------

Overload Detection:

Suppression time:	50.00 ms
-------------------	----------

Test Object - Other RIO Functions

CB Configuration

Description	Name	Value
CB trip time	CB trip time	50.00 ms
CB close time	CB close time	100.00 ms
Times for 52a, 52b in percent of CB time	52a, 52b % of CB	20.00 %

Test Object - Distance Settings

System parameters:

Line length:	1.220 Ω	Line angle:	72.87 °
PT connection:	at busbar	CT starpoint:	Dir. line
Impedance correction:	no		
1A/I nom:			
Impedances in primary values:	yes		

Tolerances:

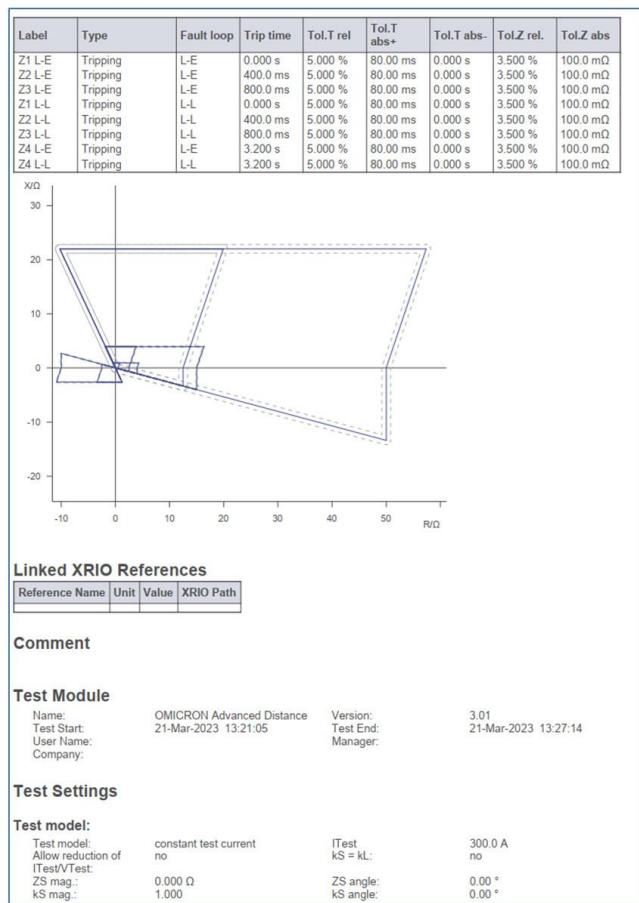
Tol. T rel.:	5.000 %	Tol. T abs. <:	0.000 s
Tol. T abs. +:	80.00 ms	Tol. Z abs.:	100.0 mΩ
Tol. Z rel.:	3.500 %		

Sl. 6. Parametri dalekovoda

U nastavku su na slici 7 prikazane zone distantne zaštite u $R-X$ dijagramu (jedna tačka u dijagramu odgovara jednom paru vrednosti: $Z = f(R, X)$). Ovako je podešen relej i treba da se ispita da li pri zadavanju kvarova uređajem za ispitivanje relejne zaštite relej isključuje kako je podešen.

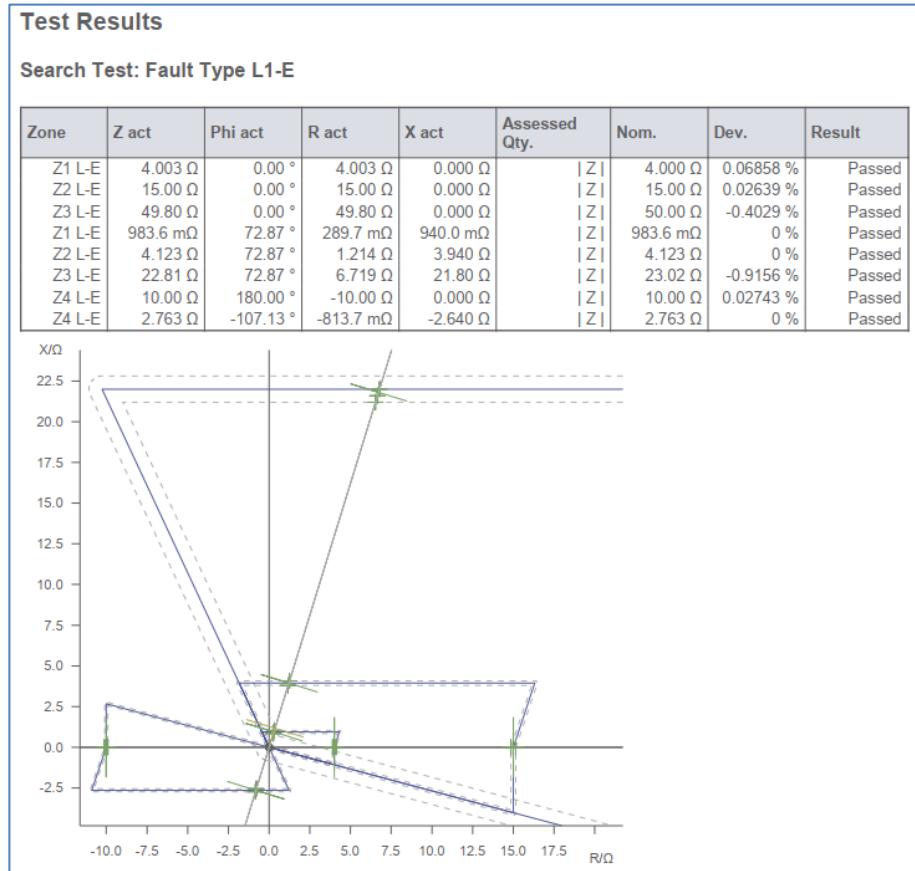
U zavisnosti od tipa kvara i otpornosti, tj. impedanse kvara Z koja zavisi od dužine do mesta kvara (faza-zemlja, faza-faza, postojanje električnog luka, i dr.) relj će „videti“ u kojoj zoni se kvar nalazi - to trapezi na dijagramu na slici 7 pokazuju. Ovakav tip karakteristike se zove poligonalna karakteristika distantne zaštite i delovaće u skladu sa parametrima (prvu zonu distantna zaštita isključuje odmah - zbog toga je vreme u tabeli jednako nuli, drugu zonu isključuje za 400 ms, a treću zonu za 800 ms; što je kvar dalji dozvoljava se duže vreme isključenja, jer se ostavlja prostor da deluje neka druga distantna zaštita u susednim postrojenjima koja je bliža kvaru). Na kraju je poslednja zona koja će isključiti kvar posle 3,2 s, ali je to rezerva rezerve ako nijedna druga zaštita ne isključi daleki kvar.

Oznaka L-E označava kvar faza-zemlja, a L-L kvar faza-faza.



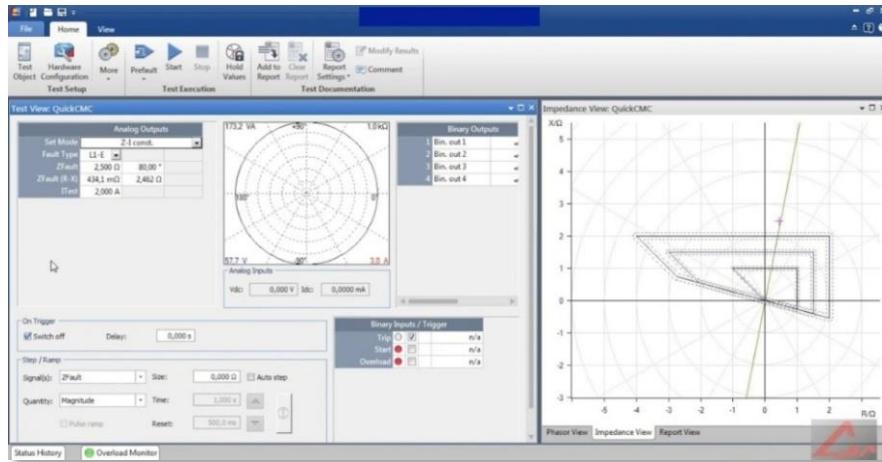
Sl. 7. Podešenje distantne zaštite

Na slici 8 je prikazan rezultat ispitivanja distantne zaštite za tip kvara faza 1 prema zemlji (to bi u našem slučaju bio kvar faze „0“ prema zemlji). Uredaj je u search režimu rada i traži granice između zona distantne zaštite i proverava za koliko vremena zaštita deluje ako je kvar na početku prve zone, granici prve i druge zone, druge i treće zone, itd. Ova vremena se ne vide direktno u ovoj tabeli, ali čim je ispisana naziv „result = passed“ to znači da je vreme delovanja u granicama očekivanog.

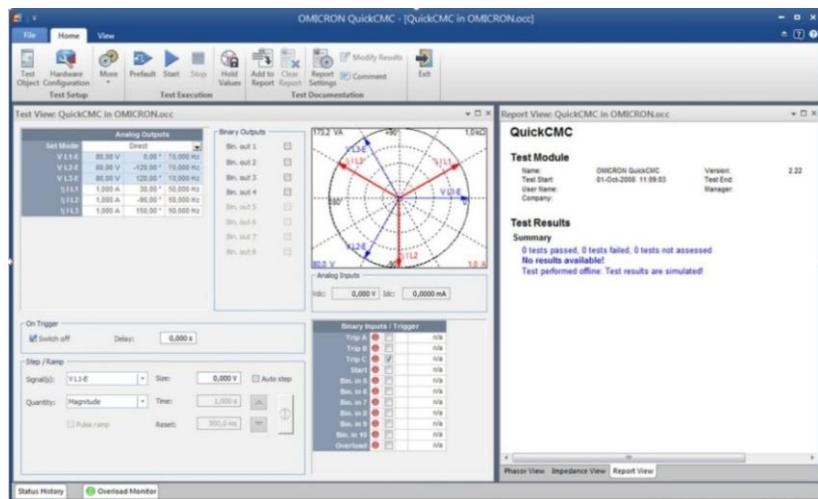


Sl. 8. Provera lokatora kvara

Za distantnu zaštitu je važno napomenuti da se za njen rad i delovanje koristi i struja i napon, da bi mogao da se odredi u kojoj je zoni kvar, koliko je daleko, da li se nalazi „ispred“ ili „iza“ zaštite (ukoliko nema napona onda se distantna zaštita blokira) [3,12]. Tokom ispitivanja na računaru se prati kretanje vrednosti, vremena isključenja, kao i karakteristike koje prikazuju rad svake zaštite. Neke od tih karakteristika su prikazane u nastavku (slika 9 i slika 10).

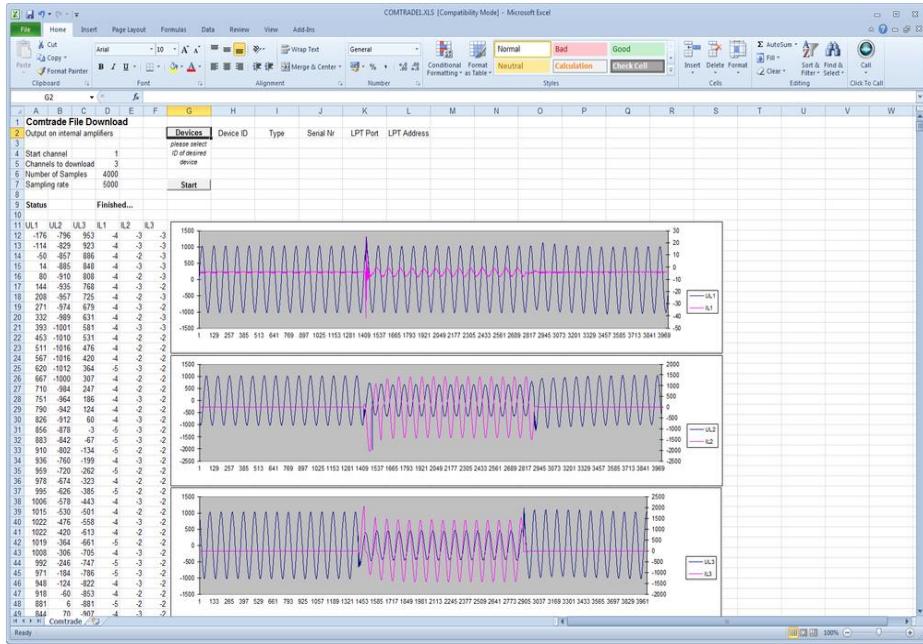


Sl. 9. Ispitivanje distantanre zaštite – QuickCMC



Sl. 10. Ispitivanje prekostrujne zaštite - QuickCMC

Na kraju je predstavljena jedna lista kvara, slika 11, gde se može videti šta se dešavalо sa strujama, a šta sa naponima pri dvofaznom kratkom spoju.



Sl. 11. Lista kvara

Iz priloženih listi se vidi da zaštića radi u tačno određenim opsezima, ispunjava sve kriterijume, na osnovu čega se može doneti zaključak da relejna zaštita, signalizacija i APU rade ispravno.

5. ANALIZA KVARA NA MIKROPROCESORSKOM RELEJU SA KONKRETNIM PRIMEROM DELOVANJA USMERENE ZEMLJOSPOJNE ZAŠTITE NA 10 KV IZVODU „PARUNOVAC 9“ IZ TS „MILOJE ZAKIĆ“

U toku 2020. godine izvršena je modernizacija TS 35/10 kV „Miloje Zakić“ u Kruševcu. Umesto starih i dotrajalih zaštitnih releja elektromehaničkog tipa, ugrađenih još 1964. godine, ugrađeni su mikroprocesorski zaštitni releji tipa SIEMENS Siprotec 7SJ82 i nakon toga trafostanica je uvedena u sistem daljinskog nadzora i upravljanja. Ovom modernizacijom je u velikoj meri povećana pouzdanost rada trafostanice, a samim uvođenjem u sistem daljinskog nadzora i upravljanja skraćena su vremena prekida i lokalizacije kvarova na vodovima 35 i 10 kV. Daljinskim pristupom do nekog od zaštitnih releja ili kao u ovom slučaju, izlaskom na lice mesta i pristupom releju putem prenosnog

računara, moguće je vršiti analize pogonskih događaja uz pomoć softverskog paketa Sigma (Siemens) za analizu kvarova na mikroprocesorskim relejima SIEMENS.

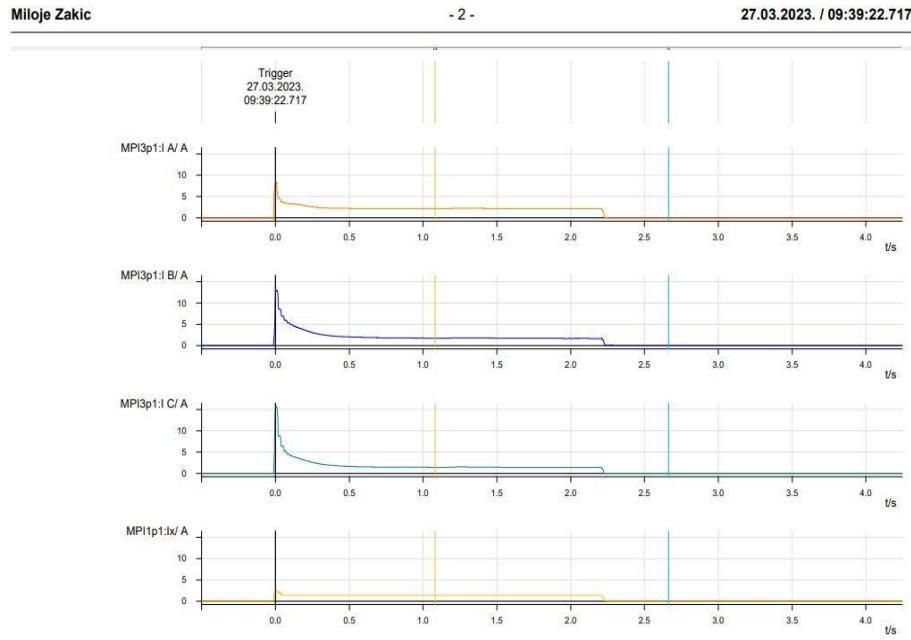
Dana 27.03.2023. godine je reagovala zemljospojna zaštita na jednom od 10 kV izvoda pa je u daljem tekstu obrađena analiza kvara [13]. Na slici 12 je prikazana izvodna ćelija „Parunovac 9“ sa zaštitnim reljem u momentu analize događaja putem prenosnog računara i navedenog softverskog paketa. Kao što se može videti, relj je vrlo lak za korišćenje i ima prikaz jednopolne šeme izvodne ćelije na svom displeju, sa položajima rasklopne opreme i mernim vrednostima.



Sl. 12. Izvodna ćelija i zaštitni relj SIEMENS - analiza događaja

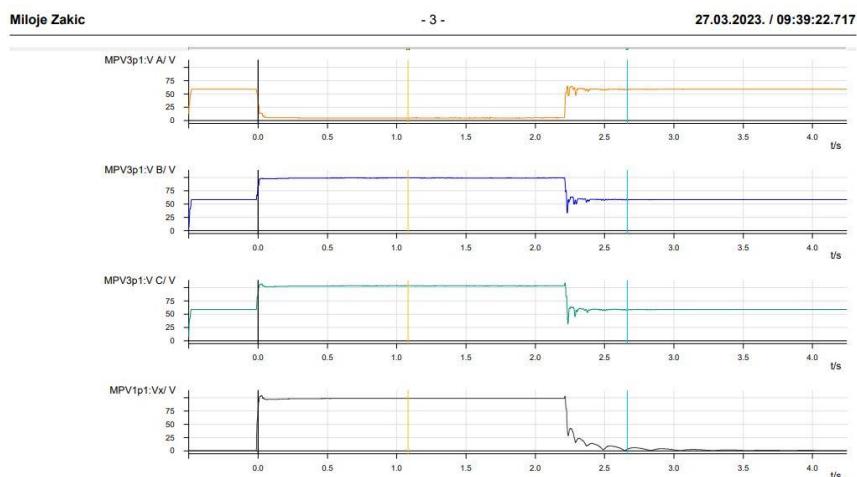
Usled nastanka kvara, u ovom slučaju zemljospoja, u jednoj fazi dolazi do poremećaja simetrije u strujama u fazama A, B i C što je prikazano na slici 13. S obzirom da se radi o mreži sa izolovanim zvezdištem, struje kvara nisu velike, već su reda veličine 3-5 A (primarno), pa sa dijagrama struja nije moguće precizno zaključiti u kojoj od faza je došlo do nastanka zemljospoja, ali je na

dnu dijagrama evidentna pojava struje I_0 , što jasno govori da je došlo do nastanka zemljospoja.



Sl. 13. Dijagram struja usled kvara

Međutim, analizom dijagrama napona u fazama A, B i C, kao i napona U_0 , slika 14, jasno se zaključuje da je do zemljospoja došlo u fazi A, gde se vrednost napona usled nastanka kvara približila nuli. Za to vreme naponi u fazama B i C su sa vrednosti faznog napona skočile na vrednost međufaznog napona, sve do momenta reagovanja zaštitnog uređaja i isključenja prekidača snage na izvodu koji je pod kvarom. Nakon isključenja prekidača naponi u svim fazama se vraćaju na vrednost faznog napona (6 kV), napon otvorenog trougla U_0 se vraća na vrednost nula.



Sl. 14. Dijagram napona usled kvara

6. ZAKLJUČAK

U savremeno doba elektroenergetika se sve više bavi unapređivanjem postojećih elemenata elektroenergetskog sistema i problemom njihove zaštite, nadzora i održavanja. S obzirom na to da postoji trend porasta potrošnje, samim tim je i potreba za proizvodnjom električne energije veća. To dovodi do povećane upotrebe mikroprocesorskih zaštita koje mogu u slučaju kvara ili opasnog pogonskog stanja automatski preduzeti sve potrebne mere da se kvar izbegne ili svede na minimum ako je isti već nastao.

Modernizaciju elektroenergetskih objekata ovakvim i sličnim uređajima u današnje vreme mora da prati i „modernizacija“ kadra, odnosno konstatno praćenje novih tehnologija i sprovođenje potrebnih obuka kako bi zaposleni inženjeri i tehničari bili u toku sa podešenjem i održavanjem opreme, a dispečeri i elektromonteri sa upravljanjem novougrađenom opremom. Takođe, modernizacijom elektroenergetskih objekata svih naponskih nivoa na ovaj način, direktno se utiče na smanjenje gubitaka kroz smanjenje neisporučene energije za vreme kvara i povećanja zadovoljstva kupaca. Kada su vodovi štićeni modernim i pouzdanim mikroprocesorskim relejima, manje je prekida (nema lažnih prorada starih releja), prekidi su kraći, a usled brže i bolje lokalizacije deonica pod kvarom, direktno se utiče.

Na osnovu napred navedenog može se zaključiti da se korišćenjem mikroprocesorskih releja postiže naprednija zaštita koja ima proširene mogućnosti u odnosu na tradicionalne metode, jer omogućava primenu različitih inteligentnih funkcija unutar jednog sistema zaštite.

Pošto su dostupna istraživanja na terenu na ovu temu veoma oskudna, jer se publikovani radovi uglavnom bave teorijskim razmatranjima, u tu svrhu bi u budućim radovima bilo interesantno prikazati i kako je izvršeno podešenje konkretnih zaštita razmatranih u ovom radu. Takođe, u cilju izvršenja koordinacije zaštite, buduća istraživanja bi se mogla usmeriti i na analizi prenosnih, distributivnih i industrijskih mreža primenom nekog od specijalizovanih softverskih paketa (kao što su ETAP ili DIgSILENT).

LITERATURA

- [1] L. Hewitson, M. Brown, B. Ramesh, Practical Power Systems Protection, Elsevier, IDC Technologies, 2004, ISBN: 0 7506 6397 9.
- [2] D. Bekut, Relejna zaštita, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009, ISBN: 978-86-7892-169-8.
- [3] M. Đurić, Z. Stojanović, Relejna zaštita, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd, 2021, ISBN: 978-86-7466-893-1.
- [4] D. Brajović, D. Stanić, Ispitivanje mikroprocesorske relejne zaštite u transformatorici 35/10 kV/kV „POŽAREVAC 4“, Studijski istraživački rad, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, 2021.
- [5] V. Gurevich, Power Supply Devices and Systems of Relay Protection, Taylor & Francis Group - LLC, 2014, ISBN: 978-1-4665-8379-5.
- [6] M. Đurić, Visokonaponska postrojenja, Beopres štampa, Beograd, 2009.
- [7] M. Đurić, Z. Stojanović, Relejna zaštita, KIZ Centar, Beograd, 2014, ISBN: 978-86-81287-68-2.
- [8] T. Rajić, Z. Stojanović, Poduzna diferencijalna zaštita vodova sa primenom automatskog ponovnog uključenja, INFOTEH, Jahorina, Vol. 14, mart 2015, str. 180-185.
- [9] Omicron Testing Solutions for Protection and Measurement Systems Product Catalog,
https://www.supremetechnology.com.au/MainImages/Product_Manuals/OMICRON_CMx_Standard_Accessories_Datasheet.pdf
- [10] R. Radetić, Priručnik za održavanje visokonaponske opreme, Bor, 2017, ISBN: 978-86-80134-50-5.
- [11] Plan podešenja zaštita JP EMS od 12.01.2023.
- [12] S. Bjelić, N. Marković, Tehnika relejne zaštite, Visoka tehnička škola strukovnih studija iz Uroševca sa privremenim sedištem u Leposaviću, Kvark, Kraljevo, 2017, ISBN: 978-86-86847-23-2.
- [13] Elektrodistribucija Srbije, Izveštaji o ispitivanju zaštite u TS Kruševac 4, polje E3 (1158B) od 21.03.2023.

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 objavljinjanju. Rad priložen za objavljinjanje treba da bude pripredjen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripredjeni 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 pišu 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 uglicaštim 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

Alberta Ajnštajna br. 1, 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
 1 Alberta Ajnštajna, 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

Tatjana Apostolovski-Trujić, Bojan Radović, Renata Kovačević, Nevena Ristić, Tamara Urošević, Viša Tasić, Vladan Kamenović	
KVALITET VAZDUHA U GRADU BORU U 2023. GODINI	
AIR QUALITY IN THE CITY OF BOR IN 2023	1
Viša Tasić, Tatjana Apostolovski-Trujić, Bojan Radović, Nevena Ristić, Tamara Urošević, Vladan Kamenović, Renata Kovačević	
ANALIZA SEZONSKIH PROMENA KONCENTRACIJA AZOT DIOKSIDA U BORU U PERIODIMA OD 2010. DO 2013. GODINE I OD 2019. DO 2023. GODINE	
ANALYSIS OF SEASONAL VARIATIONS IN THE NITROGEN DIOXIDE LEVELS IN THE CITY OF BOR IN THE PERIODS 2010-2013 AND 2019-2023	11
Marijana Pavlov-Kagadejev, Milan Radivojević, Predrag Stolić	
PRIMER MODELOVANJA VIBRACIJA DUVALJKE ZA SO₂ METODOM MAŠINSKOG UČENJA	
EXAMPLE OF MODELING SO ₂ BLOWER VIBRATIONS USING THE MACHINE LEARNING METHOD	21
Slavica Miletić , Biserka Trumić, Suzana Stanković	
X-KONTROLNE KARTE KAO SREDSTVO STATIČKE KONTROLE KVALITETA ISPITIVANJA UŽADI ZA IZVOZNA POSTROJENJA U RUDARSTVU	
X-CONTROL CHARTS AS A MEANS OF STATIC QUALITY CONTROL OF ROPE TESTING FOR EXPORT FACILITIES IN MINING	31
Nenad Marković, Uroš Jakšić, Vladimir Rilak, Strahinja Marković	
ZAŠTITA VN I SN VODOVA U ELEKTRODISTRIBUCIJI KRUŠEVAC SA POSEBNIM AKCENTOM NA MIKROPROCESORSKU RELEJNU ZAŠTITU	
PROTECTION OF HV AND MV LINES IN ELECTRIC POWER DISTRIBUTION KRUŠEVAC WITH SPECIAL EMPHASIS ON MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION	41
