

Low-cost sistem za monitoring koncentracije ugljen-monoksida zasnovan na Arduino platformi

Dušan Topalović
Institut za nuklearne nauke “Vinča”
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u
Beogradu Beograd, Srbija
dusan.topalovic@vin.bg.ac.rs
0000-0001-5976-963

Uzahir Ramadani
Institut za nuklearne nauke “Vinča”
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u
Beogradu Beograd, Srbija
uzahir@vin.bg.ac.rs
0000-0002-3702-0094

Milan Radivojević
Centar za nauku
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Bor, Srbija
milan.radivojevic@irmbor.co.rs
0000-0003-2337-0306

Viša Tasić
Centar za nauku
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Bor, Srbija
visa.tasic@irmbor.co.rs
0000-0001-6710-6529

Marijana Pavlov-Kagadejev
Centar za nauku
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Bor, Srbija
marijana.pavlov@irmbor.co.rs
0000-0003-1090-6351

Vladan Kamenović
Centar MEGA
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Bor, Srbija
vladan.kamenovic@irmbor.co.rs
0000-0001-9476-5378

Abstract—Rad prikazuje realizovani low-cost sistem za monitoring koncentracije ugljen-monoksida (CO) u realnom vremenu, zasnovanog na Arduino Mega mikrokontroleru i elektrohemijском senzorskom modulu (ZE07-CO). Sistem omogućava kontinuirano merenje koncentracije CO u opsegu od 0–500 ppm, akviziciju podataka, vremensko označavanje i skladištenje na SD kartici. Integracija sata realnog vremena omogućava preciznu vremensku analizu, dok dodatni senzori obezbeđuju merenje temperature i relativne vlažnosti. Eksperimentalna validacija pokazala je visoku korelaciju sa komercijalnim CO monitorom ($R^2 > 0.8$), čime je potvrđena primenljivost sistema za indikativni monitoring i analizu trendova koncentracija CO u zatvorenim prostorima.

Ključne reči—monitoring, ugljen-monoksid, low-cost, Arduino, akvizicija podataka

I. UVOD

Ugljen-monoksid (CO) predstavlja jedan od najznačajnijih gasovitih zagađivača vazduha zbog svoje toksičnosti i široke rasprostranjenosti. Nastaje kao proizvod nepotpunog sagorevanja goriva, pri čemu dominantni izvori u urbanim sredinama uključuju drumski saobraćaj, individualna ložišta i industrijske procese [1–3]. CO je bezbojan i bez mirisa, što ga čini posebno opasnim, jer se njegovo prisustvo ne može detektovati bez instrumentalnih metoda. Njegovo dejstvo se zasniva na formiranju karboksihemoglobina, čime se smanjuje sposobnost krvi da prenosi kiseonik, što može dovesti do ozbiljnih zdravstvenih posledica [4,5]. Regulatorni okvir definiše granične vrednosti koncentracija CO u ambijentalnom vazduhu i radnoj sredini. U Republici Srbiji maksimalna dozvoljena vrednost za 8-časovni prosek iznosi 10 mg/m³, dok je u radnoj sredini dozvoljena izloženost 20 ppm tokom radnog vremena, što ukazuje na potrebu za pouzdanim monitoringom [6–8]. U praksi, monitoring CO u državnim mrežama zasniva se na referentnim analizatorima, koji obezbeđuju visoku tačnost, ali su skupi i zahtevni za održavanje. Zbog toga nisu pogodni za gustu mrežu merenja i mikrokruženja [9]. Komercijalni

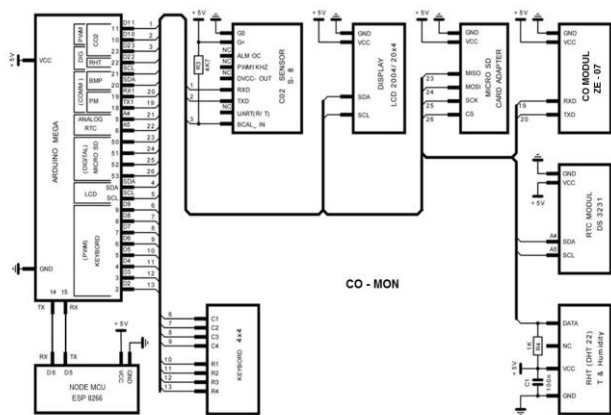
prenosni detektori CO predstavljaju kompromis između cene i performansi, ali i dalje imaju relativno visoku cenu i ograničene mogućnosti proširenja funkcionalnosti. Razvoj low-cost senzora omogućio je pojavu novih sistema za monitoring, posebno u okviru IoT rešenja, koji omogućavaju gustu mrežu merenja i praćenje trendova koncentracija, uz prihvatljivu tačnost za indikativna merenja [10–12]. Savremena istraživanja pokazuju da low-cost senzori, uz adekvatnu kalibraciju, mogu pružiti pouzdane rezultate za indikativni monitoring kvaliteta vazduha [13–14].

II. OPIS ZE07-CO SENZORSKOG MODULA

ZE07-CO je low-cost integrisani elektrohemijski CO modul namenjen IoT primenama (Sl.1) [15]. Osnovne karakteristike uključuju: merni opseg 0–500 ppm, rezoluciju do 0.1 ppm, vreme odziva ≤ 60 s, kao i digitalni (UART) i analogni izlaz, uz osnovnu temperaturnu kompenzaciju. Princip rada CO senzora zasniva se na elektrohemijскоj detekciji CO. Molekuli ugljen-monoksida oksiduju se na elektrodi senzora, pri čemu dolazi do generisanja električne struje proporcionalne koncentraciji gasa. Na samom senzorskom modulu vrši se pojačanje ovog analognog signala, filtriranje radi smanjenja šuma, digitalizacija (ADC konverzija) i vremensko usrednjavanje.



Sl. 1 ZE07-CO senzorski modul



Sl. 2 Blok šema sistema za monitoring koncentracija CO

III. HARDVER SISTEMA ZA MONITORING KONCENTRACIJA CO

Blok šema sistema za monitoring koncentracija CO prikazana je na Sl.2. Arduino Mega 2560 mikrokontroler [16] predstavlja centralnu jedinicu sistema koja upravlja akvizicijom podataka, obradom signala i komunikacijom sa perifernim komponentama. Njegova prednost je veliki broj ulazno-izlaznih pinova i stabilan rad u kontinuiranom režimu. Elektrohemijski CO senzor (ZE07-CO) koristi se za detekciju koncentracije ugljen-monoksida u opsegu 0–500 ppm. RTC modul (real-time clock) [17] omogućava precizno vremensko označavanje svakog merenja, što je ključno za analizu vremenskih trendova i korelaciju sa drugim parametrima. SD card modul [18] koristi se za lokalno skladištenje podataka, čime se omogućava dugotrajno praćenje bez potrebe za stalnom komunikacijom sa računarom. Senzor temperature i relativne vlažnosti [19] omogućava korekciju rezultata merenja, jer elektrohemijski senzori pokazuju zavisnost od ambijentalnih uslova. Trenutne vrednosti koncentracija CO, realno vreme i status uređaja prikazuju se u kontinuitetu na LCD displeju uređaja [20].

IV. SOFTVER SISTEMA ZA MONITORING KONCENTRACIJA CO

Programiranje mikrokontrolera Arduino Mega u CO-MON uređaju realizovano je korišćenjem Arduino IDE okruženja, koje zahvaljujući pojednostavljenom C++ sintaksi i dostupnosti brojnih biblioteka omogućava jednostavan razvoj i integraciju senzorskih modula bez potrebe za dodatnom opremom [21]. Program implementiran u CO-MON uređaju zasniva se na modularnoj strukturi i obuhvata deklaraciju globalnih promenljivih i uključivanje biblioteka za rad sa ključnim komponentama sistema (SD kartica, RTC, LCD, tastatura, DHT22, CO senzor, kao i JSON komunikacija sa NodeMCU ESP8266).

U okviru *setup()* funkcije vrši se inicijalizacija svih modula i postavljanje početnih vrednosti sistema. Glavna logika rada realizovana je kroz *loop()* funkciju, u kojoj se u kontinualnoj petlji izvršavaju: očitavanje i validacija podataka sa senzora i RTC modula, usrednjavanje rezultata, obrada korisničkih komandi sa tastature, kao i skladištenje i prenos podataka (SD kartica, serijski port, WiFi modul).

Rad monitoring sistema započinje inicijalizacijom svih hardverskih i softverskih modula. Nakon toga, u okviru glavne programske petlje vrši se očitavanje korisničkih komandi, RTC

modula i senzora, zatim validacija i usrednjavanje rezultata, prikaz podataka na LCD displeju, skladištenje rezultata na SD karticu i njihov prenos putem komunikacionih interfejsa.

U svakom ciklusu dodatno se proverava ispunjenost alarmnih uslova. Vreme izvršavanja jedne iteracije petlje podešeno je na približno 1 sekundu, čime se obezbeđuje sinhronizovan rad sistema i ažuriranje podataka na LCD displeju u realnom vremenu. Interval usrednjavanja i ostali operativni parametri mogu se podešavati putem korisničkog interfejsa (tastatura sa 16 tastera).

V. TESTIRANJE KARAKTERISTIKA CO MONITORA

Ispitivanje karakteristika razvijenog CO monitora obuhvatilo je analizu stabilnosti rada i poređenje rezultata merenja sa komercijalnim instrumentom Testo 315-4 [12]. Eksperimenti su sprovedeni u Laboratoriji za hemijska ispitivanja Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor u periodu od avgusta do decembra 2025. godine. Za upoređivanje rezultata primenjene su metode deskriptivne i inferencijalne statistike, sa ciljem procene saglasnosti, korelacije i sistematskih odstupanja između dva merna sistema. Linearna regresiona analiza korišćena je za ispitivanje odnosa između očitavanja ZE07-CO modula i Testo 315-4 monitora kao referentnog instrumenta. Dobijeni rezultati ukazuju na visoku korelaciju ($R^2 = 0.975$), uz regresioni odnos:

$$y = 0.988 * x \quad (1)$$

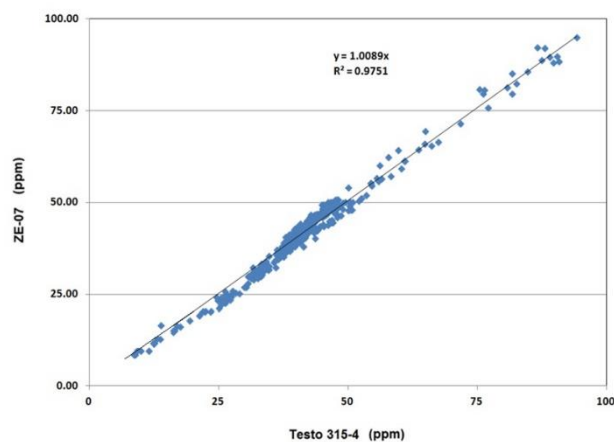
Vrednost nagiba ukazuje na blago sistematsko potcenjivanje koncentracija od strane ZE07-CO modula, ali i na stabilno i predvidljivo ponašanje u celom opsegu merenja. Na osnovu regresione analize definisana je korekciona jednačina:

$$CO_{corr} = 1.012 * CO_{ZE07} \quad (2)$$

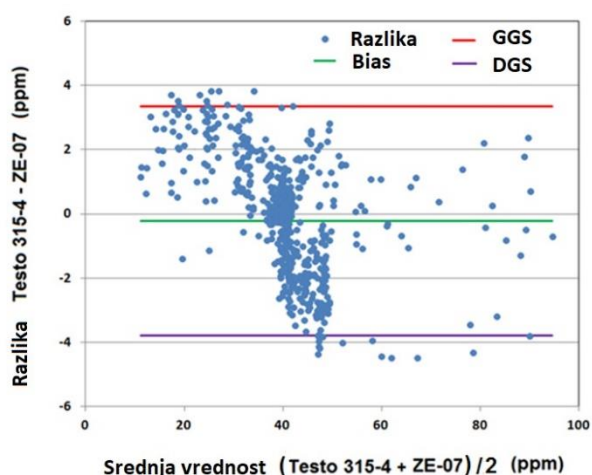
Izraz dat jednačinom (2) omogućava kompenzaciju sistematskog odstupanja i poboljšanje tačnosti merenja.

Visoka vrednost koeficijenta korelacije potvrđuje da oba merna sistema prate iste promene koncentracije CO_2 što ukazuje na pouzdanost ZE07-CO modula za praćenje trendova koncentracija. Na Sl.3 prikazano je poređenje rezultata merenja nakon korekcije sistematskog odstupanja.

Za procenu saglasnosti između dva merna sistema primenjena je Bland–Altman analiza nakon korekcije rezultata.



Sl. 3 Rezultati uporednih merenja koncentracija CO nakon korekcije sistematskog odstupanja



Sl.4 Rezultati Bland-Altman analize uporednih merenja koncentracija CO (srednja razlika – Bias, gornja granica saglasnosti – GGS, donja granica saglasnosti – DGS)

Dobijeni parametri su: srednja razlika (bias): -0.22 ppm; gornja granica saglasnosti: $+3.35$ ppm; donja granica saglasnosti: -3.80 ppm. Rezultati Bland-Altman analize prikazani na Sl.4 ukazuju na postojanje ograničenog sistematskog odstupanja i prihvatljiv raspon razlika između dva instrumenta, u skladu sa očekivanim mernim nesigurnostima.

IV. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih ispitivanja može se zaključiti da ZE07-CO modul, uz primenu odgovarajuće korekcije, može biti korišćen za indikativna merenja koncentracija CO u opsegu od 0–100 ppm. Realizovani uređaj CO-MON pokazao je dobru stabilnost i pouzdanost u laboratorijskim uslovima, što potvrđuje njegovu primenljivost za kontinuirani monitoring koncentracije CO u zatvorenim prostorima.



Sl.5 Merenje koncentracije CO u laboratoriji za atomsku apsorpcionu spektrofotometriju u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor

REFERENCE/LITERATURA

- [1] European Environment Agency (EEA), Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, 2019. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/>

- [2] World Health Organization (WHO), WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, 2021.
- [3] Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Emission Inventory Report. <https://www.hidmet.gov.rs/eng/meteorologija/klimatologija.php>
- [4] J. A. Raub, M. Mathieu-Nolf, N. B. Hampson, S. R. Thom, "Carbon monoxide poisoning," Toxicology, vol. 145, pp. 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(99\)00157-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(99)00157-6)
- [5] World Health Organization (WHO), Indoor Air Quality Guidelines, 2010. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>
- [6] Vlada Republike Srbije, "Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha," Službeni glasnik RS, br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013; <https://www.paragraf.rs/propisi/uredba-uslovima-monitoring-zahtevima-kvaliteta-vazduha.html>
- [7] Institut za standardizaciju Srbije, SRPS EN 14626:2013. <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:40993>
- [8] Vlada Republike Srbije, "Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad na radnom mestu ("Sl. glasnik RS", br. 21/2009 i 1/2019). https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_preventivnim_merama_za_bezbedan_i_zdrav_rad_na_radnom_mestu.html
- [9] Teledyne Advanced Pollution Instrumentation (Teledyne API), CO analyzers documentation. <https://www.teledyne-api.com/products/co-analyzers>
- [10] European Committee for Standardization (CEN), CEN/TS 17660-1:2021.
- [11] Dräger Safety AG & Co. KGaA, Dräger Pac 6500 datasheet. <https://www.draeger.com/en-us/Products/Pac-6500>
- [12] Testo SE & Co. KGaA, Testo 315-4 datasheet. <https://www.testo.com/en/testo-315-4/p/0632-3154>
- [13] A. Lewis, P. Edwards, "Validate personal air-pollution sensors," Nature, vol. 535, pp. 29–31, 2016. <https://doi.org/10.1038/535029a>
- [14] E. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre, F. Bonavitacola, "Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 215, pp. 249–257, 2015.
- [15] Winsen. (2020). ZE07-CO electrochemical CO module datasheet. <https://robu.in/wp-content/uploads/2023/02/ZE07-CO-DATASHEET.pdf>
- [16] <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
- [17] <https://dratek.cz/docs/produkty/0/835/1459971336.pdf>
- [18] <https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/Datasheet-MicroSD-Module.pdf>
- [19] <https://www.mouser.com/datasheet/2/737/dht-932870.pdf?srlid=AfmBOopkrJ8e9vRNYUGtTcovi8EGY7VX3CFZT6GXeN4473Jc8ZVZ7kH>
- [20] https://www.handsontec.com/dataspecs/I2C_2004_LCD.pdf
- [21] <https://www.arduino.cc/reference/en/>

ABSTRACT

The paper presents the developed low-cost system for real-time monitoring of carbon monoxide (CO) concentration, based on an Arduino Mega microcontroller and an electrochemical sensor module (ZE07-CO). The system enables continuous measurement of CO concentration in the range of 0–500 ppm, data acquisition, time-stamping, and storage on an SD card. The integration of a real-time clock allows precise temporal analysis, while additional sensors provide measurements of temperature and relative humidity. Experimental validation showed a high correlation with a commercial CO monitor ($R^2 > 0.8$), confirming the applicability of the system for indicative monitoring and trend analysis of CO concentrations.

Low-cost system for monitoring the concentration of carbon monoxide based on the Arduino platform

Dušan Topalović, Uzahir Ramadani, Milan Radivojević, Viša Tasić, Marijana Pavlov-Kagadejev, Vladan Kamenović