

Forenzičke metode za identifikaciju lica: juče, danas, sutra

Snežana Stojičić, Radovan Radovanović, Nataša Petrović i Milesa Srećković

Apstrakt—Identifikacija lica je bila, jeste i biće izazov za koji se kontinuirano nalaze rešenja koja pružaju tehnološki odgovor u ovoj oblasti, posebno zasnovanih na upotrebi biometrijskih podataka u elektronskom obliku i primene principa i iskustava najbolje prakse elektronskog poslovanja uopšte. Upotreba podataka u elektronskom obliku, smeštenih u određenim bazama podataka, sredstava elektronske komunikacije i elektronske obrade velike količine podataka u obavljanju poslovnih procesa identifikacije lica je evidentno u porastu, kao odgovor na izazove koje elektronsko poslovanje donosi, neophodno je usaglašavanje razvoja normativnog okvira kako u domenu povećanja efikasnosti poslovanja tako i izazova koje digitalna era sa sobom nosi. Izazov, sa forenzičkog aspekta, kao odgovor na potencijalno narušavanje i nepoštovanje pravnih normi, uslovljava razvoj i primenu novih procedura i alata u ovoj oblasti. Danas je evidentna potreba stalnog praćenja razvoja i primene novih metoda za identifikaciju lica, a posebno onih, koje mogu biti vezane za forenzičke aspekte u digitalnom svetu. Predmet razmatranja su upravo ova pitanja, koja se odnose na izazove u identifikaciji lica u digitalnoj eri.

Ključne reči—Forenzičke metode; identifikacija lica; biometrijski podaci.

I. UVOD

Za sisteme za biometrijsku identifikaciju se može reći da imaju više generacija, koje se zasnivaju na tehnološkim rešenjima, odnosno prate razvoj tehnologije, koja uslovljava i omogućava identifikaciju lica zasnovan na biometrijskim podacima. Savremeno digitalno okruženje, stvara nove izazove i mogućnosti za počinioce krivičnih dela, ali i službe, koje utiču u rasvetljavanju istih. Tako proces digitalizacije i modernizacije poslovnih procesa, neophodno prati i razvoj adekvatnog odgovora sa aspekta primene metoda za identifikaciju lica sa aspekta forenzike.

II. PRVE GENERACIJE BIOMETRIJSKIH TEHNOLOGIJA

Biometrijske tehnologije prve generacije bile su fokusirane na jaku biometriju i jedinstvenost identifikacija ili

Snežana Stojičić, Ministarstvo unutrašnjih poslova, Kneza Miloša 101, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: snezana.stojici@mup.gov.rs),

Radovan Radovanović – Kriminalističko policijski univerzitet, Cara Dušana 196, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: radovan.radovanovic@kpu.edu.rs),

Nataša Petrović – Ministarstvo unutrašnjih poslova, Kneza Miloša 101, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: natasa.petrovic@mup.gov.rs)

Milesa Srećković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: esreckov@etf.bg.ac.rs).

autentifikacija određenih pojedinaca (fizičkih lica). Prvi slučajevi upotrebe velikih razmera, počeli su kasnih 1990-ih u SAD, sa povećanjem primene posebno posle uvođenja biometrijskih pasoša, koji sadrže otiske prstiju, fotografiju i podatke o licu. Od tada, biometrijske tehnologije su postale robusnije i naprednije, značajno smanjujući stope grešaka uz pomoć razvoja računarske tehnologije i primenjenih rešenja, a naročito u tehnologijama za prepoznavanje lica.

Prve primene biometrije i razvijenih alata za brzu i pouzdanu identifikaciju ili autentifikaciju, našle su širok spektar konteksta primene, uključujući potrebe sprovođenja zakona. Primena se zayim proširila i na privatni sektor, uključujući rešenja kao što su ona za otključavanje pametnih telefona ili prepoznavanje VIP-a kupaca. Rešenja zasnovana na biometriji u nekim slučajevima zamenjuju tradicionalne lozinke, posebno imajući u vidu da sa najnovijim tehnologijama za prepoznavanje lica moguća je identifikaciju za manje od jedne sekunde.

Ne manji značaj imaju i takozvane “slabe” biometrijske metode, kao biometrijske metode druge generacije, kao što su motoričke veštine, osobenosti položaja tela, hod i način interakcije sa okruženjem [1]. Ova druga generacija biometrije se naziva i „biometrija ponašanja“, jer je digitalno fizičko i kognitivno ponašanje ljudi analizira, a ne relativno statičke karakteristike, kao što su otisci prstiju. Posebno je od interesa, to što druga generacija biometrijskih sistema, pruža nove mogućnosti automatizacije poslovnih procesa u organima za sprovođenje zakona, vršenju granične kontrole, omogućavajući, na primer, otkrivanje lica sumnjivog ponašanja koje bi moglo da ukaže na nameru da počinu krivično delo.

Da bi se povećala tačnost, biometrijske tehnologije prve generacije se redovno kombinuju u multimodalne sisteme. Ovi sistemi kombinuju nekoliko biometrijskih identifikatora za identifikaciju jedne osobe. Multimodalni sistemi mogu minimizirati rizike od pojave grešaka i pomoći u prevazilaženju poteškoća uzrokovanih lošim kvalitetom podataka ili podacima koji nedostaju, istovremeno povećavajući mogućnosti i u drugim aspektima, kao što je etički.

Tehničko tehnološki napredak omogućava sve veću primenu sistema video nadzora, kojima se omogućava upotreba biometrijskih tehnika i veštačke inteligencije za identifikaciju lica u javnim prostorima, što implicira potrebu da se striktno reguliše upotreba ovih sistema. Napredak tehnologije i potreba za normativnim uređenjem primene savremenih tehnoloških rešenja predstavlja stalni izazov, posebno imajući u vidu komparativnost ovih oblasti korišćenja biometrije, kako na nacionalnom, tako i na međunarodnom planu.

Pošto su aktivnosti mozga merljivi biološki signali, one se takođe smatraju biometrijskim. S obzirom na poteškoće u hvatanju elektrohemijskih signala mozga i njihovu složenost, relevantnost moždanih aktivnosti je dugo vremena bila ograničena na medicinski sektor. Međutim, poslednjih godina, elektroencefalografija (EEG), koja snima električne aktivacije mozga postavljanjem elektroda na skalp i takozvani interfejsi mozak-kompjuter (BCI), koji mogu da prevedu aktivnost mozga u mašinski čitljivi unos, postali su pristupačniji [2] i čak su integrisani u proizvodima širo biometrijske autentifikacije potrošnje¹.

III. DALJI PRAVCI RAZVOJA METODA IDENTIFIKACIJE LICA

Predlog regulatornog okvira o veštačkoj inteligenciji², Evropska komisija je usvojila u prvoj polovini 2021. godine, kao novi pravni okvir za primenu veštačke inteligencije. Predlog uredbe ima za cilj da programerima, onima koji koriste veštačku inteligenciju i korisnicima, pruži jasne zahteve i obaveze u vezi sa specifičnom upotrebom AI³. U isto vreme, predlog uredbe obuhvata i aspect usmeren ka smanjenju administrativnih i finansijskih opterećenja za preduzeća, posebno za mala i srednja preduzeća (MSP) [3, 4].

Predlog je deo šireg paketa, koji se odnosi na veštačku inteligenciju, a koji je posvećen jačanju, prihvatanju, ulaganju i inovacijama u oblasti AI u EU.

Zašto su nam potrebna pravila o AI? Predloženi propis o veštačkoj inteligenciji obezbeđuje da se izgradi poverenje u ono što veštačka inteligencija može da ponudi. Dok većina sistema veštačke inteligencije predstavlja ograničen rizik i može doprineti rešavanju mnogih društvenih izazova, određeni sistemi veštačke inteligencije stvaraju rizike, koji se moraju rešavati, kako bi se izbegli neželjeni ishodi.

Važno je istaći da iako postojeće zakonodavstvo pruža određeni okvir, procenjuje se da je nedovoljno da se odgovori na specifične izazove, koje donose sistemi veštačke inteligencije.

Predložena pravila će se baviti rizicima, koje posebno stvaraju AI aplikacije, predložiti listu visokorizičnih aplikacija, postaviti jasne zahteve za AI sisteme za aplikacije visokog rizika; definisati posebne obaveze za korisnike veštačke inteligencije i provajdere visokorizičnih aplikacija; predložiti ocenu usaglašenosti, pre nego što se sistem veštačke inteligencije stavi u upotrebu ili stavi na tržište; predložiti način praćenja pošto se takav AI sistem stavi na tržište; i predložiti strukturu upravljanja na evropskom i nacionalnom nivou [4].

Opis stanja biometrijskih tehnologija sa aspekta EDPS⁴ (European Data Protection Supervisor), indukuje da broj uređaja koji se primenjuju za obradu biometrijskih podataka raste neverovatnom brzinom. Mnogi pametni telefoni koriste slike lica i otiske prstiju za autentifikaciju svojih korisnika. Virtualni glasovni asistenti obrađuju glasovne podatke kao odgovore na zahteve korisnika. Sistemi video nadzora mogu

se koristiti za identifikaciju ili klasifikaciju pojedinaca/lica. Pametni satovi i fitness narukvice mogu pratiti i obrađivati podatke o fiziološkom statusu (kao što su otkucaji srca i navike spavanja). Sistemi video nadzora su imali značajnu ulogu i sa aspekta pandemije COVID-19, podrška korišćenju prepoznavanja lica i veštačke inteligencije za praćenje socijalnog distanciranja ili pravilne upotrebe maski za lice, kao i upotrebe osetljivih termovizijskih kamera i prepoznavanja lica, koja se mogu na osnovu povišene temperature identifikovati, kao potencijalno zaražen, korona virusom.

Poseban domen primene i korišćenja biometrijskih podataka čine informacioni sistemi velikih razmera, kao što su tri velika IT sistema u oblastima azila i migracija, koji su trenutno operativni i uključuju korišćenje biometrijskih podataka: Vizni informacioni sistem (VIS), Šengenski informacioni sistem (SIS II) i EURODAC (European Asylum Dactyloscopy Database), sistem koji obrađuje podatke o tražiocima azila.

Pored toga u pripremi su, još tri nova evropske informaciona sistema, velikih razmera, od kojih će dva obrađivati biometrijske podatke: Ulazno-izlazni sistem (EES) i Evropski informacioni sistem krivičnih evidencija za državljane trećih zemlja (ECRIS-TCN). Iako su ovi informacioni sistemi razvijeni nezavisno, nova regulativa interoperabilnosti⁵, definiše četiri osnovne komponente interoperabilnosti koje bi trebalo da omogućavaju međusobnu interakciju. Među njima, i rešenje za zajedničko upoređivanje biometrije - (sBMS) odnosno otisaka i slika lica kroz različite sisteme [5].

Međutim, uz očekivan porast primene, važno je paralelno sprovesti i aktivnosti na podizanju svest o izazovima koje biometrijske tehnologije donose, a posebno sa aspekta izgradnje poverenja u tehnološka rešenja [6].

Takođe, javljaju se izazovi i nove mogućnosti zloupotreba novih tehnologija, kao što je kompanija koja se bavi obradom fotografija lica, Clearview AI, koja je preuzela oko 3 milijarde slika, prikupljenih sa miliona web lokacija, uključujući Fejsbuk, Tviter i Jutjub, i prodaje svoje usluge organima za sprovođenje zakona, ili poljska platforma PimEyes, koja je na sličan način došla do podataka i koristi ih za sticanje dobiti [7,8]. Povećana upotreba biometrijskih podataka uz nemogućnost promene fizioloških osobina, donosi povećanu zabrinutost za bezbednost biometrijskih podataka.

Ukoliko se u razvoju Sistema yasnovanih na biometrijskim podacima ne primenjuju odgovarajuće mere zaštite, posledice povrede ličnih podataka mogle bi biti veoma ozbiljne. Upravo iz tog razloga, nastali su međunarodni standardi, kao što su ISO/IEC 24745 ISO/IEC 24745:2011 Information technology — Security techniques — Biometric information protection i standard u oblasti mehanizama zaštite biometrijskih šablona (BTP), a aktuelnost potvrđuje ISO/IEC 24745:2022, Information security, cybersecurity and privacy protection — Biometric information protection, revizija koja pokriva zaštitu biometrijskih informacija pod različitim zahtevima za

¹ [Technology | Unicorn Hybrid Black \(unicorn-bi.com\)](https://www.unicorn-bi.com)

² [EUR-Lex - 52021PC0206 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0206)

³ AI – Artificial Intelligence

⁴ [20-10-07 edps biometrics_speech_en.pdf \(europa.eu\)](https://www.edps.europa.eu/edps/biometrics_speech_en.pdf)

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0817>

poverljivost, integritet i obnovljivost/opoziv, tokom skladištenja i prenosa. Standard identifikuje zahteve i daje preporuke za bezbedno upravljanje i obradu biometrijskih informacija u skladu sa pravilima privatnosti⁶.

Međutim, neizvesno je u kojoj meri, se pri razvoju biometrijskih sistema prate i primenjuju standard. S obzirom da je otkriveno da je postojao pristup preko 27,8 miliona zapisa nezaštićenih i uglavnom nešifrovanih⁷, a da za razliku od kompromitovanja lozinki, kada se to dogodi sa otiscima prstiju, ne postoji mogućnost da promenite otisak prsta. Baza podataka se odnosila na Biostar 2, system, koji je razvila kompanija za obezbeđenje Suprema [8, 9].

Početkom marta 2022. godine objavljeno je da je Samsung potvrdio kršenje bezbednosti pošto što su hakeri pristupili i preuzeli skoro 200 gigabajta poverljivih podataka, uključujući izvorni kod za različite tehnologije i algoritme za operacije biometrijskog otključavanja. Hakerska grupa Lapsus, preuzela je odgovornost i objavila da su preuzeli izvorni kod koji Samsung telefoni koriste za obavljanje osetljivih operacija, algoritme za sve otključavanje na osnovu biometrije [10].

Osetljiva priroda biometrijskih podataka prepoznata je i u okviru pravnog okvira EU, kao i u okviru Modernizovane konvencije Saveta Evrope 108+, podleže posebnoj zaštiti i može se reći da je obrada biometrijskih podataka zabranjena u principu i postoji samo ograničen broj uslova pod kojima takva obrada je zakonita, tako da u okviru svojih zadataka nadzora i sprovođenja, EDPS sprovodi između ostalog i redovne revizije velikih IT sistema EU.

Svakako, prethodno pitanje pre svake primene, treba da bude vezano za procenu neophodnosti i proporcionalnosti. Ne treba da koristimo savršen system, koji nam nije potreban ili koji obrađuje biometrijske podatke na nesrazmeran način. Obrada biometrijskih podataka treba striktno da se pridržava principa ograničenja svrhe. Ograničenje svrhe je posebno relevantno u ovom kontekstu, zbog tipova biometrijskih podataka, koji omogućavaju zaključivanje o drugim ličnim podacima.

Prilikom obrade biometrijskih podataka preporučljivo je u potpunosti primenjivati princip minimalizacije prikupljanja podataka. Prilikom procene koje biometrijske tehnologije koristiti, potrebno je ograničiti obradu biometrijskih podataka, na ono što je neophodno za ostvarivanje određenog zadatka. Uvažavajući činjenicu da bi multimodalni biometrijski sistemi mogli biti sigurniji i tačniji od običnih biometrijskih sistema, takva vrsta obrade koja uključuje više biometrijskih podataka donosi i veće rizike za osnovna prava pojedinaca. Kada se razmatra obrada više od jedne vrste biometrijskih podataka, potrebno je, proceniti njihovu neophodnost i proporcionalnost, balansirajući očekivane koristi sa rizicima.

Poverenje u biometrijske sisteme, zahteva tačnost, jasanoću i direktan pristup u saopštavanju prednosti i ograničenja svake biometrije tehnologije, predstavljanje mogućnosti i rizika. Percepcija javnosti o rizicima je razlog zašto milioni korisnika

dobrovoljno odlučuje da koriste biometrijske podatke za autentikaciju kada koriste svoje pametne telefone, dok je sve veće protivljenje upotrebi biometrijske identifikacije u javnim prostorima.

Podaci, kao što su otisci prstiju i DNK, generalno su jedinstveni za pojedinca i tako mogu potvrditi nečiji identitet i prisustvo na mestu zločina, odnosno imati forenzički značaj. Takođe, može pomoći da se dokaže nevinost osumnjičenog. Posebno na međunarodnom nivou, forenzički podaci mogu se koristiti i za povezivanje niza transnacionalnih krivičnih dela, imajući u vidu da se otisci prstiju mogu brzo proveriti, naročito, ako osumnjičeni prelazi granicu. Ne manji značaj, imaju ovi podaci, sa aspekta korišćenja za identifikaciju žrtava velikih katastrofa.

Najbrži razvoj, ostvaren je u oblasti identifikacije na osnovu prepoznavanja fotografije lica i time otvara mnoge nove mogućnosti, za identifikaciju pojedinaca i pronalaženje počinioca krivičnih dela. U ovom smislu forenzička ekspertiza i podaci su od vitalnog značaja za sprovođenje istraga na nacionalnom nivou, kao i ostvarivanje učešća u međunarodnim istragama u skladu sa normativnim okvirom i nadležnostima [9].

Posebna oblast primene su biometrijske autentikacije, kao siguran i praktičan alternativni način autentikacije putem lozinki. Međutim, i u ovom, slučaju, pojavljuju se izazovi, koje je potrebno imati u vidu, kao što je očuvanje privatnosti lica, obezbeđivanje bezbednosti i poverljivosti biometrijskih podataka pri prenosu i skladištenju, kao i činjenica da se za razliku od lozinki biometrijske osobine ne mogu poništiti i ponovo je izdati. Ukoliko dođe do kompromitovanja, korišćenog biometrijskog podatka, s obzirom da se ne može promeniti, isti se ne može dalje koristiti u svrhu autentikacije [11]. U ovom smislu Cloud tehnologija može da iskoristi prednosti biometrijske tehnologije i obrnuto. Biometrija sa svojim jakim svojstvima autentikacije, može da se iskoristi da poboljša bezbednost Cloud sistema i ponudi novi modeli usluga (tj. biometrijska autentikacija kao jedna od usluga u Cloud-u. S druge strane, Cloud omogućava svojim resursima fleksibilnosti, skalabilnost i smanjenje troškova za rad biometrijskih sistema (tj. procesorsku snagu ili skladištenje podataka), kao i da omogući poboljšanje performansi biometrijskih sistema [11].

Standardi omogućavaju efikasan razvoj biometrijskih sistema, uspostavljanjem zajedničkih kriterijuma i postavljanjem smernica za zaštitu privatnosti (Eversheds Sutherland, 2022). Sporazumi o formatima podataka i interfejsima aplikativnog softvera mogu pomoći će da se smanje troškovi razvoja sistema. Razvoj standarda za primenu biometrije i za testiranje tačnosti, doprinosi razjašnjenju ranjivosti i usmerava ka pronalaženju rešenja.

Imajući u vidu da ljudska faktor i slabe lozinke, prema proceni iz Imageware analize, čine 52% narušavanja bezbednosti podataka, što se može smatrati indikatorom potrebe da se tradicionalne metode autentikacije zamene novijom biometrijskom tehnologijom, kao što su specijalizovani hardverski senzori u mobilnim telefonima, skeneri otiska prsta, kamere za prepoznavanje lica (2D/3D) ili

⁶ <https://www.iso.org/>

⁷ <https://www.securitymagazine.com/articles/90731-more-than-27-million-biometric-records-exposed-in-a-public-database>

prepoznavanje irisa oka [11]. Biometrijske tehnologije postaju sve popularnije, posebno sa pojavom dvofaktorske autentifikacije za *online* usluge. Pregled prednosti i nedostataka multifaktorske autentifikacije dat je u Tabeli 1. Na osnovu analiza tržišta procenjuje se da će se u narednim godinama tržište biometrijskih tehnologija dostići 55,42 milijarde dolara do 2027. godine, tržište kamera za video nadzor sa procenama predviđanja rasta na 44 milijarde dolara do 2025. godine [11].

TABELA I
MULTIFAKTORSKA AUTENTIKACIJA ZA I PROTIV
(PRATT, 2021)

Prednosti	Nedostaci	Mere
Teško se hakuju ili repliciraju	Nepovratna neopozivost u slučaju	Više faktora je dostupno za MFA
Konformno za korisnike	kompromitovanja Povećan rizik od zloupotrebe	Zahteva povećane mere zaštite
Manja zavisnost od medija	Značajne investicije za velike sisteme	Minimalizacija podataka
Manja zavisnost od mrežne povezanosti	Novo i nedovoljno dokazano u praksi	Raspodela rizika
Proširivost novim elementima	Pristrasnost, greške, lažno pozitivni rezultati	Edukacija i uključenost korisnika

Svedoci smo porasta upotrebe biometrijskih tehnologija za različite oblasti primene, ovakav napredak otvara i nove mogućnosti za dalja istraživanja i razvoj. Posebno imaju se u vidu niz fundamentalnih otvorenih pitanja i izazova kojima će se baviti istraživanja u oblasti primene biometrije u svim sverama savremenog života [12-15].

To svakako prati i aspekt bezbednosti, pošto je sve više podataka u opticaju, u digitalnom obliku, uključujući biometrijske podatke, koje pojedinci ostavljaju na web-u i u ličnim elektronskim uređajima, kao što su pametni telefoni i drugi mobilni uređaji. Posebno, imajući u vidu dostupnost digitalnih senzora i kapacitet uređaja za skladištenje podataka, i tu je i činjenica da se identifikacije osoba sve više zasnivaju na digitalnim procesima [16].

IV. ZAKLJUČAK

Osim što su univerzalne i jedinstvene, biometrijske karakteristike treba da budu relativno trajne i lake za prikupljanje i korišćenje. Biometrijski sistem treba da bude u mogućnosti da pruži što tačnije rezultate u različitim okolnostima i uslovima. Svakako važan, a možda i najvažniji aspekt biometrijskog sistema je prihvatanje od strane javnosti. Iako se DNK smatra konačnom biometrijom za identifikaciju osobe (osim jednojajčanih blizanaca), podudaranje DNK je

previše invazivno za široku upotrebu u autentifikaciji identiteta. Termografija lica, koja otkriva toplotne obrasce, koje stvaraju krvni sudovi i emituju iz kože, nije invazivna metoda, ali je cena previse visoka. Među biometrijskim podacima koji se trenutno razmatraju za buduću primenu su puls, miris tela, sastav kože, šara noktiju, hod i oblik uha. Potrebno je više istraživanja za dalju ocenu prihvatljivosti za širu upotrebu.

Sistem, koji se koristi, treba da bude siguran, obezbeđuje privatnost i daje tačne rezultate. Sistem koji je nesiguran, nepouzdan ili invazivan, s druge strane, može doprineti narušavanju poverenja javnosti, što na kraju može dovesti do otpora u prihvatanju tehnika biometrijskog prepoznavanja. Ključna strategija u garantovanju odgovarajućeg izbora i upotrebe biometrijskih metoda je razvoj međunarodnih standarda. Tokom poslednje decenije, napravljen je ogroman napredak u poboljšanju biometrijskih senzora, algoritama i procedura, ali i dalje, postoje slabosti i ranjivosti, koje treba rešavati. Potreba za zaštitom privatnosti i čuvanjem osetljivih biometrijskih podataka, ostaje i dalje fundamentalna.

ZAHVALNICA

Aurori se zahvaljuju organizacionom odboru konferencije ETRAN 2022 na prepoznatom značaju oblasti forenzike, prostoru i vremenu datom za izlaganje i diskusiju.

LITERATURA

- [1] C. Wendehorst, & Y. Duller, "Biometric Recognition and Behavioural Detection, Study requested by the JURI and PETI committees", 2021, EU. [Biometric Recognition and Behavioural Detection Assessing the ethical aspects of biometric recognition and behavioural detection techniques with a focus on their current and future use in public spaces \(europa.eu\)](#)
- [2] V.H. de Albuquerque, R. Damaševičius, J. M. Tavares & R. Pinheiro, "EEG-Based Biometrics: Challenges And Applications, Computational Intelligence and Neuroscience", Hindawi, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5483921>
- [3] M. Anzini, "The Artificial Intelligence Act Proposal and its implications for Member States", EIPA Briefing 2021/5, [EIPA-Briefing-2021-5-The-Artificial-Intelligence-Act-Proposal-and-its-implications-for-Member-States.pdf](#)
- [4] *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the council laying down harmonised rules on artificial intelligence (artificial intelligence Act) and amending certain Union legislative acts*, European Comision Brussels, 21.4.2021.
- [5] *Regulation (EU) 2019/817 of the European Parliament and of the Council of 20 May 2019 on establishing a framework for interoperability between EU information systems in the field of borders and visa*. European Comision 2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0817>
- [6] Agencia Española de Protección de Datos (AEPD), and the European Data Protection Supervisor (EDPS) (2020). "14 misunderstandings with regard to biometric identification and authentication", [14 misunderstandings with regard to biometric identification and authentication | European Data Protection Supervisor \(europa.eu\)](#)
- [7] W. Wiewiórowski, W. "The State of Biometrics, European Data Protection Supervisor (EDPS)". 2020. [20-10-07_edps_biometrics_speech_en.pdf \(europa.eu\)](#)
- [8] N. Rotem & R. Locar, "Data Breach in Biometric Security Platform, vpnMentor", (2019). [Report: Data Breach in Biometric Security Platform Affecting Millions of Users \(vpnmentor.com\)](#)
- [9] *Interpol Report*, (2022). [Forensics \(interpol.int\)](#)
- [10] Techcrunch site, [Samsung confirms data breach after hackers leak internal source code | TechCrunch](#), Pristupljeno 13.04.2022.

- [11] Imageware Report, "Biometric Trends and Statistics to Keep an Eye on in 2022", [Biometric Trends and Statistics to Keep an Eye on in 2022 \(imageware.io\)](https://www.imageware.io)
- [12] A. A. Ross, S. Banerjee, C. Chen, A. Chowdhury, V. Mirjalili, R. Sharma, T. Swearingen & S. Yadav, "Some Research Problems in Biometrics: The Future Beckons". 2019 International Conference on Biometrics (ICB), 1-8. 2019.
- [13] A. A. Albahdal & T. E. Boulton, "Problems and Promises of Using the Cloud and Biometrics," 11th International Conference on Information Technology: New Generations, 2014, 293-300, <https://doi.org/10.1109/ITNG.2014.112>
- [14] Sutherland Global Biometrics Guide 2022, A multi-jurisdictional look at the laws governing the use of biometric technology, (2022). [Global Biometrics Guide 2022.pdf \(eversheds-sutherland.com\)](https://www.eversheds-sutherland.com)
- [15] National Research Council (US) Whither Biometrics Committee; Pato JN, Millett LI, editors. "Biometric Recognition: Challenges and Opportunities". Washington (DC): National Academies Press (US); 2010. 5, Research Opportunities and the Future of Biometrics. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK219897/>
- [16] K.M. Pratt, "Biometric security technology could see growth in 2021", [Biometric security technology could see growth in 2021 \(techtarget.com\)](https://www.techtarget.com)

is it provided technological response on adequate level. Especially this one based on the use of biometric data in electronic form and application of principles and experiences of best e-business practice in general. The use of data in electronic form stored in certain databases, issues of electronic communication and electronic processing of large amounts of data in performing business identification processes is evidently increasing, in response to the challenges of e-business, it is necessary to harmonize the development of normative framework as well the business efficiency are the challenges that the digital age brings. Challenges from the forensic aspect in response to potential violations and non-compliance with legal norms, which requires the development and application of new procedures and tools in this area. There is also an evident need for constant monitoring of the development and application of new methods for personal identification, especially those that may be related to forensic aspects in the digital world. The subject of consideration are precisely these issues that relate to the challenges in identifying persons in the digital age.

Title in English

Snežana Stojičić, Nataša Petrović, Radovan Radovanović i
Milesa Srećković

ABSTRACT

Identification of persons has been, is and will be a challenge for conducting, as question which solutions best fit to the purpose and

Sigurnosni uređaji za proveru oružja u funkciji forenzičko-balističkih ispitivanja

Kristijan Đujić, Radovan Radovanović, Saša Milić, Martin Matijašević, Aleksandar Ivković

Apstrakt—Sigurnosni uređaji za proveru oružja tzv. “hvatači projektila” namenjeni su bezbednom proveravanju različitih vrsta vatrenog oružja i dizajnirani su, pre svega, za zaposlene u sektoru bezbednosti. Ovi uređaji sastoje se iz metalne konstrukcije dizajnirane za minimiziranje olova u vazduhu, rampe niskog ugla, kružne komore i posude. Njihova konstrukcija sadrži posebnu bezbednosnu funkciju koja sprečava da oružje eksplodira prema licu korisnika. Čak i ako korisnik ispaljuje projektil pod uglom, sve prisutne osobe u okruženju će biti bezbedne. Povratni udarni talas se kreće turbulentno unutar sigurnosnog uređaja za proveru oružja, a plamen se preusmerava od korisnika koji vrši opaljivanje. Sistem hvatača uključuje rampe sa malim uglom koje odbijaju projektil umesto da ga razbijaju, minimizirajući olovnu prašinu. Projektil se odbija o kružnu komoru za usporavanje, gde usporava sve do zaustavljanja. U funkcionalnom smislu sigurnosni uređaj za proveru oružja se može postaviti na sto ili zid u bilo kojoj prostoriji, pa je idealan za laboratorijska ispitivanja. U radu se analiziraju karakteristike sigurnosnih uređaja za proveru oružja kroz forenzički eksperiment sproveden na modelu kompanije *Savage Range systems GT Tabletop Gunsmith* u cilju utvrđivanja potencijala za primenu u forenzičkim i balističkim ispitivanjima.

Ključne reči — Forenzička ispitivanja; balistička ispitivanja; putanja projektila; bezbednost; vatreno oružje; fizički pregled; klasifikacija; probna paljba.

I. UVOD

TEORIJSKO razmatranje problematike forenzike, balistike i razvoja sprava za merenje i registraciju u fokusu je različitih naučnih disciplina. Prva knjiga o forenzičkoj medicini objavljena je davne 1400. godine u Kini [1], značajne su i naučne analize Leonarda da Vinčija usmerene na let projektila i međuzavisnost dužine i prečnika cevi. I dalje su kao osnov balistike od značaja razmatranja Nikolo Tartalja (1538. godine) koji zaključuje da slobodni let projektila nije pravolinijski, Galileo 1638. opisuje putanju leta kao parabolu, a Njutn 1684. uvodi u razmatranje i otpor vazduha. Tokom XVIII veka Francuz B. Belidor nalazi

Kristijan Đujić – Doktorand na Kriminalističko-policijskom univerzitetu u Beograd na Doktorskim akademskim studijama Forenzike, Cara Dušana 196, 11080 Zemun, Srbija (e-mail: kristijan.djujic@gmail.com).

Prof. dr Radovan Radovanović, Rukovodilac Departmana forenzičkog inženjerstva, Kriminalističko-policijski univerzitet u Beograd, Cara Dušana 196, 11080 Zemun, Srbija (e-mail: radovan.radovanovic@kpu.edu.rs).

Dr Saša Milić, naučni savetnik, Fakultet za diplomatiju i bezbednost, Milorada Ekmečića 2, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: s_milic@yahoo.com).

Dr Martin Matijašević, naučni saradnik, Međunarodni institut za istraživanje katastrofa, Dimitrija Tucovića 121, 11 000 Beograd, Srbija (e-mail: jmartin.matijasevic@idr.edu.rs; martin.matijasevic@yahoo.com).

Aleksandar Ivković - Doktorand na Kriminalističko-policijskom univerzitetu u Beograd na Doktorskim akademskim studijama Forenzike, Cara Dušana 196, 11080 Zemun, Srbija (e-mail: acakormoran@gmail.com).

eksperimentalno da je najbolji odnos težine baruta i projektila 1:3, a Englez Bendžamin Robins stvara balističko klatno. Leonard Ojler rešava matematički sistem jednačina kretanja projektila, koji ima i danas značaj za brzine ispod 240 m/s. Ojler uvodi i sistem postupnog rešenja sistema jednačina po sukcesivnim lukovima, koji se koristi i danas. Tokom XIX veka uvodi se krešer za merenje pritiska gasova u cevi, i hronograf za merenje brzine projektila. Utvrđena je zavisnost sile baruta, gustine punjenja, i razvijenog pritiska gasova u komori konstantne zapremine poznata kao Ejbel-Noublov zakon. Nađen je i zakon otpora sredine, od kojih je Gavrov korišćen do Prvog svetskog rata. Italijan Anđelo Sijači sa razradama P. Šarbonijea daje metod rešavanja jednačina kretanja u konačnom obliku [2].

Od posebnog značaja u forenzičko-balističkim ispitivanjima i izvođenjima logičkih zaključaka je forenzička analiza materijala pronađena nakon ispaljivanja projektila. U Američkom građanskom ratu čuven je primer smrti generala Unije, Džona Sedžvika. On je prekorio svoje ljude, jer se savijao od snajperiste Konfederacije, koji se ispaljivao projektil sa udaljenosti od 1000 metara, a njegove poslednje reči bile su: "Sa ove razdaljine ne bi mogli ni slona da pogode", kada ga je pogodio projektil u glavu. Objasnjenje je pronađeno kada je projektil uklonjen iz njegove glave, odnosno, tada je otkriveno da je heksagonalnog oblika. Došlo se do zaključka da je mogao biti samo opaljen iz britanske puške Vitvort, oružja sposobnog za izuzetnu preciznost, za to vreme, i koja je prodana u velikom broju vojsci Konfederacije.

Prvi dokumentovani slučaj forenzičke balistike u Velikoj Britaniji zabeležen je 1835. godine. Tad je Henri Godard, službenik metropolitanske policije, istraživao ubistvo gde je žrtva upucana projektilom sa olovnom kuglom. Nakon pregleda pronađenog projektila, Godard je primetio trag od livenja koji je ostavio kalup koji je formirao olovni “projektil”. Osumnjičeni je bio identifikovan, a kalup od projektila pronađen u njegovoj kući. Testiranje uzorka kalupa u poređenju sa tragovima livenja na pronađenom projektilu dozvolilo je Godardu da potvrdi da je smrtonosni projektil proizveden iz kalupa osumnjičenog. Osumnjičeni je osuđen za ubistvo.

U Velikoj Britaniji, ono što bismo sada prepoznali kao forenzičku balistiku, počelo je da se razvija 1920-ih kada su dva pionira, Robert Čerčil i major Džerald Barard, analizirali ispaljene metke i čaure sa ciljem da ih povežu sa sa određenim oružjem. Jedan od prvih slučajeva ubistva u Velikoj Britaniji, koje je rešeno primenom forenzičke balistike, je bilo zloglasno ubistvo PC Vilijama Gateridža 1927. godine. Robert Čerčil je uspeo da brzo uporedi metke sa pištoljem pronađenim u kući osumnjičenog. Iako su uporedni mikroskopi bili grubi prema današnjim standardima, fundamentalne postulate su dali rani pioniri na

principima uporedne mikroskopije. Posle Drugog svetskog rata, Služba forenzičke nauke je objedinila sva ispitivanja vatrenog oružja u Engleskoj i Velsu. Ova služba je u velikoj meri zaslužna za postavljanje temelja za moderne forenzičko balističke preglede u Velikoj Britaniji. Ipak, iako je tehnologija imala uticaj na istraživački rad, omogućavajući na primer, brzo traženje projektila i čaura, većina forenzičkih balističkih radova dala je malo doprinosa od onog koji su Čerčil i Burard praktikovali pre skoro 100 godina [3].

Balistika je proučavanje projektila u letu. Ova reč je izvedena iz grčkog, *ballein*, što znači 'baciti'. Forenzička balistika je opšte prihvaćena naučno-tehnološko-istražna disciplina koja u opštem smislu predstavlja svaki naučni pregled koji se odnosi na vatreno oružje i koji se obavlja u cilju prezentovanja nalaza na sudu. Ovo obično uključuje davanje mišljenja o tome da li komponente municije mogu biti povezane sa oružjem koje ih je ispraznilo, utvrđivanje dometa vatre, identifikovanje ulaznih i izlaznih rana, tumačenje pričinjene štete pucnjavom i ispitivanjem mehaničkog stanja oružja. Ironično, računajući svojstva metka ili projektila u letu [4]. Osnovna podela balistike je na unutrašnju i spoljnu [5], dok je danas kao podgrana balistike razvijena kriminalistička (sudska) balistika, odnosno forenzička balistika.

Rešavanje osnovnog zadatka unutrašnje balistike podrazumeva primenu kompjuterskih programa. U sistem jednačina unutrašnje balistike (1-5), unose se osnovni podaci:

1. Karakteristike cevi
2. Karakteristike projektila
3. Karakteristike baruta.

Unutrašnjebalistički ciklus je opisan jednačinama energije, sagorevanja baruta i kretanja projektila:

$$(1-T/T_v) \frac{f m b \psi}{\Theta} = \phi M p V^2 / 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Psi = \kappa_1 z (1 + \lambda_1 z) \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma = 1 + 2\theta_1 z \dots\dots\dots (3)$$

$$u = de/dt = u_0 + p n + b k = u_{op} \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi M p v (dv/dt) = s p \dots\dots\dots (5)$$

Gde je: ϕ [/] – koeficijent fiktivnosti; f [kJ/kg] – sila baruta; m [kg] – masa baruta; M [kg] – masa projektila; ψ [/] – relativni deo sagorelog barutnog punjenja; z [–] relativna debljina sagorelog svoda; σ [/] – relativna sagorela površina baruta; κ_1, λ_1 – karakteristike oblika barutnog zrna; T [K] – temperatura barutnih gasova; T_v [K] – temperatura sagorevanja baruta pri konstantnoj zapremini; v [m/s] – brzina kretanja projektila; u [m/s] – brzina sagorevanja baruta; u_0 [m/s.bar] – jedinična brzina sagorevanja baruta; p [bar] – pritisak barutnih gasova; $\Theta = cp/cv - 1$; e [m] – svod barutnog punjenja; S [m²] – površina poprečnog preseka kanala cevi oružja; n [– e] eksponent u izrazu za brzinu sagorevanja; b [m/s] – konstanta u izrazu za brzinu sagorevanja [6].

U kontekstu forenzičko balističkih ispitivanja sprovedenih posredstvom sigurnosnih uređaja za proveru oružja može se ispitati [7]:

1. ponašanje oružja tokom procesa opaljenja
2. dužina trzanja
3. potpunost sagorevanja baruta
4. količina i boja dima

5. postojanje plamena na ustima cevi
6. jačina pucnja

II. KARAKTERISTIKE SIGURNOSNOG UREĐAJA ZA PROVERU ORUŽJA - MODEL GT GUNSMITH

Sigurnosni uređaj za proveru oružja *GT Gunsmith* je po konstrukcionim karakteristikama izdržljiva, jednostavna za upotrebu i samostalna jedinica sa osnovnom funkcijom hvatanja projektila. *Gunsmith* serija proizvođača *Savage Range systems* koristi *Vet Snail®* tehnologiju za minimiziranje olova u vazduhu. Rampe niskog ugla pomažu da se projektil skrene u kružnu komoru gde gubi energiju i pada u posudu za sakupljanje [8].

TABELA I
KARAKTERISTIKE MODELA GT GUNSMITH

Opis	Karakteristike
Proizvod	tabletop Gunsmith
Model	GT
Veličina	610mm visina; 280mm širina; 610mm dužina
Otvor zamke	prečnika 75 mm
Težina	70 kilograma
Upotreba	provera oružja

Uređaj je konstruisan od potpuno zavarene jednodielne konstrukcije i čeličnih tela, debljine 5mm. Unutar uređaja je komora za usporavanje za bezbedno i „čisto“ zaustavljanje projektila koje eliminiše opasnosti od olovne prašine. Dizajniran je za testiranje funkcija u neposrednoj blizini i jednostavna je za održavanje [9].



Sl. 1. Model GT Gunsmith

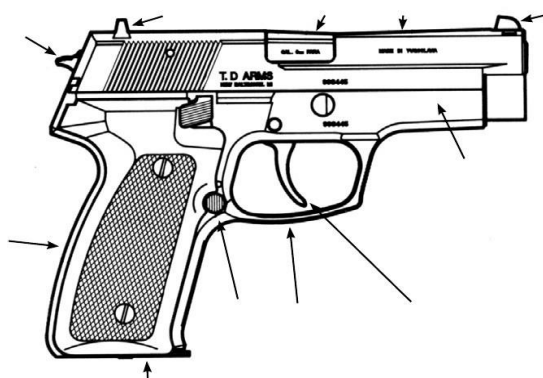
III. FORENZIČKI I BALISTIČKI POTENCIJAL MODELA GT GUNSMITH

Osnovna i primarna funkcija modela *GT Gunsmith* je u sposobnosti upoređivanja oružja korišćenog u izvršenju krivičnog dela, prazne čaure, projektele i municije. Eksperimentalnu proveru je potrebno realizovati s ciljem dobijanja stvarnih podataka o svojstvima sigurnosnog uređaja za proveru oružja modela *GT Gunsmith* u cilju utvrđivanja njegovih forenzičkih i balističkih potencijala.

Eksperiment je realizovan u laboratorijskim uslovima, opaljivanje je izvršeno iz pištolja Zastava CZ 99, kalibra 9mm.

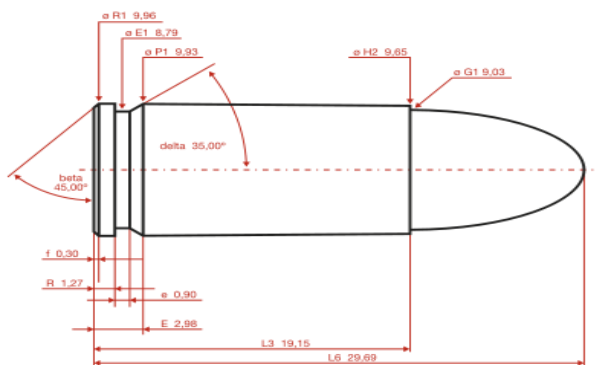
TABELA II
TEHNIČKI PODACI MODEL CZ 99

Opis	Tehnički podaci
Kalibar	9mm
Dužina	190mm
Visina	140mm
Debljina preko korica	37mm
Masa bez okvira	860gr.
Masa - prazan okvir	965gr.
Masa - pun okvir	1145gr.
Kapacitet okvira	15 kom.



Sl. 2. Model CZ 99

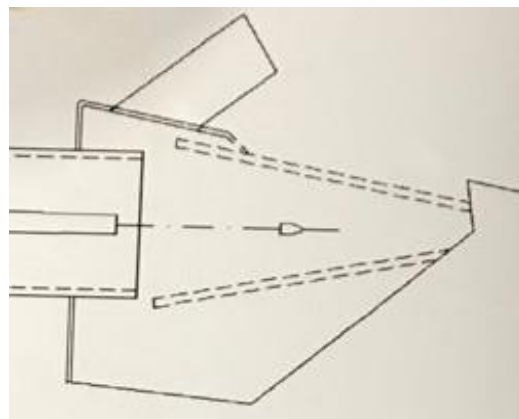
Ovaj model [10] ima najčešću upotrebu u vojno-policijskim formacijama i sektoru privatnog obezbeđenja na našim prostorima.



Sl. 3. Dimenzije kalibra 9mm

Sposobnost upoređivanja ispaljenog zrna sa oružjem je osnovno svojstvo ovog uređaja [11].

Prisiljavanjem projektila da se okreće dok putuje niz cev oružja, preciznost se znatno povećava. Istovremeno, narezivanje ostavlja tragove na projektilu koji ukazuju na tu cev, odnosno predstavlja jedinstveni forenzički otisak cevi. Pre masovne proizvodnje vatrenog oružja, svaku cev i kalup za projektil ručno su pravili oružari, što ih čini jedinstvenim [12]. Svaki projektil ispaljen iz određene cevi bi bio odštampan sa istim oznakama, omogućavajući istražiteljima da identifikuju oružje koje je ispalilo određeni projektil [13].

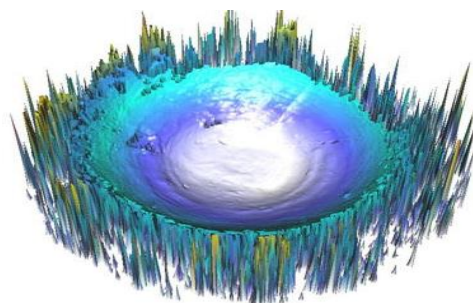


Sl. 4. Putanja zrna kroz model GT Gunsmith



Sl. 5. Zrno kalibra 9mm posle ispaljivanja

Preliminarnim pregledom projektila u bazi ispitivanja opštih karakteristika pronađenog projektila, može se isključiti veliki broj oružja. Određivanjem opštih aspekata ispaljene municije, izvestan broj oružja može se odmah isključiti kao nesposoban za ispaljivanje te vrste projektila.



Sl. 4. 3D prikaz Zrno posle ispaljivanja

Da bi uporedili pojedinačne pruge u samom eksperimentu, morali smo da dobijemo poznati uzorak koristeći (poznato oružje u ovom slučaju CZ 99, a u realnim forenzičkim istragama zaplenjeno oružje. Za projekte sa sporijim kretanjem, kao što su pištolji ili revolveri, poznati primerci projektila nastaju ispaljivanjem oružja u sigurnosni uređaj za proveru oružja (hvatač projektila) [14]. Potrošeni projektil se može povratiti, netaknut, pošto uređaj usporava projektil pre nego što stigne do zida uređaja. Ovaj uređaj se može koristiti i za brže leteće projekte, kao što su oni ispaljeni iz pušaka velike snage i oružja za vojnu primenu, dok se recimo rezervoari za vodu ne mogu koristiti, jer rezervoar neće obezbediti dovoljnu moć zaustavljanja projektila [15].

Kada se proizvede poznati primerak, uzorak dokaza se može uporediti sa poznatim ispitivanjem na bazi komparativne analize i u isto vreme uporednim mikroskopom. Stranice koje se porede se pažljivije ispituju, tražeći više uzastopnih tragova. Ne postoji određeni broj

uzastopnih poklapanja koji je jednak deklaraciji o podudaranju, a ispitivači su obučeni da koriste forenzičku metodu „dovoljnog slaganja“. Stepen do kojeg ispitivač može da donese tu odluku zasniva se na njihovoj obučenosti i stručnosti [16]. Svi nalazi forenzičara podležu ispitivanju obe strane, tužilaštva i odbrane, tokom krivičnog postupka.

Marka i model oružja se takođe mogu zaključiti iz kombinacije karakteristika različitih klasa koje su zajedničke za određene proizvođače [17]. Tri glavne karakteristike klase svih projektila su tlo i žlebovi, kalibar metka, i preokret za narezivanje. Sva tri se mogu direktno vezati za tip cevi koji je korišćen za ispaljivanje projektila.

IV. ZAKLJUČAK

Rad daje teorijsko - eksperimentalnu analizu procesa opaljenja u sigurnosni uređaj za opaljivanje projektila (hvatač metka), koji očuva zrno za dalja eksperimentalna istraživanja i numeričko modeliranje na računaru. Eksperimentom se došlo do saznanja da uređaj očuva zrno u meri dovoljnoj za dalje optimalne ulazno-izlazne parametre i prihvatljive rezultate za konkretno oružje [18]. Rezultati eksperimenata potvrđuju da je ovaj jedinstveno dizajniran uređaj idealan i za testiranje funkcionalnosti različitih vrsta vatrenog oružja. Tehnologija koju koristi u komori za usporavanje praktično eliminiše čestice olova koje mogu nastati pre nego što se unesu u vazduh i udišu. Ovaj jedinstveni sistem koristi OSHA standarde, štiteći zaposlene u laboratoriji i ispitivače. Patentirani niski ugao ulazne rampe skreće projektil u komoru za usporavanje gde se projektil okreće, gubi energiju, a zatim upada u posudu za sakupljanje zrna. Uređaj je značajan i kod ispitivanja barutnih čestica. Nakon izlaska iz cevi oružja, barutne čestice se zadržavaju u okolini ulaznog otvora na prvoj prepreci na koju je projektil naišao. Za kriminalističku praksu su važne situacije kada je pomenuta prepreka odeća ili telo čoveka [19], pa se mogu vršiti različite simulacije.

Ovaj uređaj je relativno jednostavan i može se koristiti kao prenosni sistem za izvlačenje projektila za balističko poređenje. Eksperiment je pokazao da uređajem mogu da rukuju i da ga prenose samo dve osobe, pa se testiranje može vršiti i na samom mestu krivičnog dela. Uređaj očuva zrno za balističko poređenje, bezbedno vrši hvatanje svih projektila, ima brzi ciklus „pucaj i sakupljaj“ kraći od 60 sekundi i realtivno je lak za održavanje.

LITERATURA

- [1] B. Franić, M. Milosavljević, "Forenzička balistika", Banjaluka-Sarajevo: Federacija BiH-Rep. Srpska; Internacionalna asocijacija kriminalista, 2009, str. 19
- [2] Grupa autora, "Vojna enciklopedija", knjiga prva, Beograd, Srbija: Vojnoizdavački zavod, 1970, str. 446-447
- [3] <https://royalsociety.org/-/media/about-us/programmes/science-and-law/royal-society-ballistics-primer.pdf>
- [4] <https://royalsociety.org/-/media/about-us/programmes/science-and-law/royal-society-ballistics-primer.pdf>
- [5] S. Janković, "Spoljna balistika", Beograd, Srbija: Vojnoizdavački zavod, 1977, str. 15. .
- [6] I. Bjelovuk, S. Ilić, "Mogućnosti kriminalističko tehničkog ispitivanja tragova na municiji ispaljenoj iz oružja štampanog 3D tehnikom", Beograd, Srbija: Bezbednost br. 1, 2017, str. 9.
- [7] S. Jaramaz, D. Mišković, "Unutrašnja balistika", Beograd: Srbija: Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2002, str. 137.
- [8] <https://www.savagerangesystems.com/content?p=traps>

- [9] https://www.savagerangesystems.com/files/literature/2017_savage_range_systems_catalog.pdf
- [10] Zastava oružje, "Pištolj CZ 99 – uputstvo za rukovanje i održavanje", Beograd, Srbija: Zastava oružje, 2001, str. 7.
- [11] J. Hamby, "The History of Firearm and Toolmark Identification". Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal. 31 (3). Retrieved January 16, 2016.
- [12] L. Steele, "Ballistics". Science for Lawyers. American Bar Association, 2008.
- [13] "Firearms and Toolmarks in the FBI Laboratory". Forensic Science Communications. 2 (2). April 2000. Archived from the original on September 20, 2015. Retrieved June 5, 2016.
- [14] B. Fisher, A. Barry, J. Tilstone, J. William, C. Woytowicz, "Introduction to Criminalistics: The Foundation of Forensic Science", Elsevier Academic Press, 2009, p. 39. ISBN 9780080916750.
- [15] National Research Council (2009). Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward (PDF). National Academies Press. ISBN 978-0-309-13131-5. Retrieved June 12, 2016.
- [16] R. Thompson, "Firearm Identification in the Forensic Science Laboratory" (PDF). National District Attorneys Association, 2010, Retrieved January 19, 2016.
- [17] D. Maio, J.M. Vincent, "Gunshot Wounds: Practical Aspects of Firearms", Ballistics, and Forensic Techniques (3rd ed.). CRC Press, 2016, p. 1. ISBN 978-1-4987-2570-5.
- [18] "Firearms & Tool Mark". North Carolina Department of Justice. Retrieved June 4, 2016.
- [19] A. Radomirović, "Tragovi baruta u domaćoj kriminalističkoj praksi", Beograd, Srbija: Bezbednost, 2005, br. 3, str. 488.

Security devices for checking weapons in the function of forensic-ballistic tests

Kristijan Đujić, Radovan Radovanović, Saša Milić, Martin Matijašević, Aleksandar Ivković

Abstract — Security devices for checking weapons, the so-called "Projectile catchers" are intended for safe screening of various types of firearms and are designed primarily for employees in the security sector. These devices consist of a metal construction, technology to minimize lead in the air, a low-angle ramp, a circular chamber and a vessel. Their construction contains a special safety function that prevents the weapon from exploding towards the user's face. Even if the user fires a projectile at an angle, all persons present in the environment will be safe. The return shock wave rotates turbulently inside the safety device for checking the weapon and the flame is redirected by the user who performs the firing. The catcher system includes small-angle ramps that repel the projectile instead of shattering it, minimizing lead dust. The projectile bounces into the circular deceleration chamber, where it decelerates until it stops. In functional terms, a security device for checking weapons can be placed on a table or wall in any room, so it is ideal for laboratory tests. The paper analyzes the characteristics of security devices for weapons testing through an experiment conducted on the model of Savage Range systems GT Tabletop Gunsmith in order to determine the potential for application in forensic and ballistic tests.

Keywords — Forensic examinations; ballistic tests; projectile trajectory; security; firearms; physical examination; classification; trial fire.

Примена форензичких алата у класификацији инцидената и несрећа у комерцијалном ваздушном саобраћају по EASA методологији

Александар Ивковић¹, Радован Радовановић¹, Саша Милић², Душан Ивковић³, Кристијан Ђујић¹

¹Криминалистичко полицијски универзитет – департман форензичког инжењерства

²Факултет за дипломатију и безбедност

³Војнотехнички институт, сектор за ваздухопловство

Абстракт - У раду је наведено више случајева који су довели до несрећа у авио саобраћају и један симулиран сценарио без фаталног исхода уз селекцију више кључних параметара на бази којих је извршена детаљна анализа полазних претпоставки и потенцијалног решења. Моделовање сценарија потенцијалног нежељеног догађаја је извршено на бази искустава стечених кроз реалне догађаје и засновано је на постојећим типовима ваздухоплова и на реално могућој конфигурацији и изгледу аеродрома. Основа сценарија и резултати анализе се уклапају, како у међународне, тако и у националне правне оквири. На узорку од 1000 фаталних несрећа у периоду од 1950. до 2010. се може уочити да је до највећег броја несрећа дошло грешком пилота, уз напомену да је у неким случајевима то била последица реакција на изразито лоше временске услове или техничке кварове. У осталим случајевима то су пропусти контроле летења или особља одговорног за одржавање и механичких отказа.

Кључне речи - форензика у ваздушном саобраћају, инциденти, EASA, менаџмент безбедности

УВОД

Форензика је дефинисана правним оквиром који јој даје Кривични Закон и основна улога коју има је у оквиру кривичног поступка и прикупљања доказног материјала, као и његовог стручног тумачења. Методе и технике које користи форензика су компатабилне са познатим и општеприхваћеним научно-истраживачким методама, а методологије које користи су у сталној примени у природним наукама (по потреби и друштвеним) и без ограничења које повремено намећу специјализоване научне дисциплине. Форензика као наука је интердисциплинарна и обухвата распон од прикупљања и анализе архивске грађе, правилника, упутстава, препорука, анализе обичаја и културних утицаја па до технологија израде, врсте материјала техника и технологија израде, утицаја окружења, па до медицинских података.

Овај рад је илустративан приказ једног дела кога форензика, као интердисциплинарна наука, може да пружи када нема нежељеног сценарија који подразумева ангажовање тужилаштва и судских органа. У раду су аутори приказали истраживања из области ваздушног саобраћаја.

Након несрећа у комерцијалном ваздухопловству прође доста времена док се све чињенице не сазнају и док се не дође до одговора зашто и како се нешто десило. Чак и када се догоде несреће то је због низа независних догађаја који су коинцидирани у до тада непредвиђеним околностима, односно, нико их није раније предвидео. Да би форензичке анализе добиле на пуном значају, неопходно је прикупити податке и анализирати их, а по потреби и проверили кроз симулиране сценарије где би се тестирала њихова поузданост и на тај начин предвидели и предупредили нежељени исходи.

ТЕХНИЧКИ АСПЕКТИ

У раду је наведено више случајева који су довели до несрећа и један симулиран сценарио без фаталног исхода. Симулиран сценарио је, након анализе, понудио одговоре на то зашто се и како нешто десило, па па до указивања на кривца и предлога побољшања. Сценарио је базиран на могућим догађајима и реалним типовима ваздухоплова и аеродрома. Основ сценарија и резултати анализе су у међународном и националном правном оквиру. Вођено је рачуна да се не изађе из оквира статистике несрећа са фаталним исходом.

На узорку од 1000 фаталних несрећа у периоду од 1950. до 2010. можемо видети да је до највећег броја несрећа дошло грешком пилота, понекад као реакција на изразито лоше временске услове или техничке кварове. У осталим случајевима то су пропусти контроле летења или особља одговорног за одржавање и наравно због механичких отказа. Проенти су следећи[1]: грешка пилота 32%, откази механичке природе 20%, грешке пилота узроковане/провоциране временским условима 16%, сами временски услови 12%, саботажа 8%, људска грешка осталих учесника 6%, грешка пилота везана за технику 5%, сви остали узроци 1%.

Да се из прикупљених података учи и да је прикупљање и ажурирање данас неопходност показује и разлика у вероватноћи да се фатална несрећа догоди на комерцијалном лету од просечно 4,3 жртве на сваких милион сати налета, што је у преносном значењу 115 година летења. У општој авијацији, где су нижи стандард и

чињеница је да лете аматери, имамо 22,43 жртве летења на сваких милион сати налета.

Одличан показатељ је и укупан број несрећа који и поред годишњег пораста броја сати налета од 3-5% константно опада и у апсолутним бројевима је са свог пика седамдесетих од 42 несреће годишње 2016. пао на 6 несрећа годишње, при томе треба имати на уму да је по подацима ИСАО-а[2] и годишњем извештају европске комисије о европском ваздухопловном тржишту за 2016 годину из марта 2017. и поред неколико нафтних, тржишних и политичких криза од седамдесетих на овамо дошло до огромног пораста саобраћаја. За то су заслужни не само авиони новије генерације са већим бројем седишта, односно повећаном носивости, већ и повећан обим и фреквенција полетања. Комерцијална авијација по броју превезених путника са нешто испод 400.000.000 путника 1975. данас је на 3.500.000.000 особа, што је повећање капацитета флоте, односно броја летова за готово 9 пута, са скоком од 2003. до 2010. од 53%. Обим превоза робе је доживео и већи пораст, на њему се нећемо задржавати пошто са собом носи мањи друштвени ризик, већи број летова се обавља у време када је нижи обим саобраћаја и ноћу, у авиону је само посада, висинска ограничења практично не постоје итд.

У 2015. години кроз аеродроме у свету је прошло 7 милијарди путника, а само европски превозиоци су имали профит од 7,4 милијарде долара. Овакав скок, поред чињенице да авијација прати тржишна дешавања и подложна је кризама, није забележен на другим пољима саобраћајне и транспортне индустрије.

РЕАЛНЕ НЕСРЕЋЕ И СИМУЛИРАН СЦЕНАРИО

Осмог марта 1974. непосредно након полетања из Париза за Лондон авион DC-10 компаније Turkish Airlines лет 981 пао је због проблема са забрављивањем врата теретног одељка.

Дванаестог августа 1985. Јапан Airlines Боинг 747ср лет 123 из Токија за Осаку је 12 минута након полетања на удаљености око 100 km имао експлозивну декомпресију приликом које је изгубио репни део авиона, погинуло је 15 чланова посаде и 505 од 509 путника. Ово остаје до данас најсмртоноснија несрећа у којој је учествовао само један авион. Разлог пада: лоше урађено одржавање авиона.

Двадесет шестог маја 1991. Боинг 767-300ER компаније Lauda Air лет 004 на лету из Банкока за Беч пада у ковит и при том гине свих 213 путника и 10 чланова посаде. Разлог пада је активирање реверзног потиска у лету, уређаја иначе дизајнираног за помоћ при кочењу након слетања. Разлог је техничка грешка, тј. пропуст у конструкцији и сигурносној опреми која је касније откљоњена.

Током деведесетих низ инцидената са Боингом 737 резултованих непоузданим или чек супротним отклоном у односу на командовани правац кормила довео је до неколико несрећа. У две одвојене несреће погинуло је 157 људи док проблем није коначно детектован и наредбом америчких ваздухопловних власти FAA[3], коначно откљоњен. Проблем је био у електро магнетном вентилу, који је на ниским температурама, или по повратку на више температуре реаговао непоуздано или чак супротно од командованог. Авиони иначе лете на висинама где је температура током целе године око -52°C.

Недавни случајеви, који показују да и поред најбоље воље систем обавезног пријављивања, прикупљања, дистрибуције и релевантне анализе података није заживео везани су за Боинг 737 MAX генерације.

Два догађаја за које ће се брзо испоставити да су повезана су пад LionAir лета 610 29. октобра 2018. и Ethiopian Airlines лет 302 10. марта 2019. на ова два лета је било 346 жртава а појединачно су највеће несреће у историји поменутих компанија. Када су коначно потврђени подаци и установљено да су оба ваздухоплова пала из истог разлога FAA је 13. марта 2019. донела одлуку о приземљењу типа и до 18. марта 2019. године свих 387 примерака је било приземљено. Интересантно је да је још пре 13. марта 51 ваздухопловна власт донела одлуку о приземљењу конкретног типа ваздухоплова. Забрана је трајала до децембра 2020. и након поновне сертификације пловидбености типа, враћен је у оперативну употребу. Оно што је страшно у овим случајевима је чињеница да тенденција да обара нос авиона у погрешном тренутку је била софтверска грешка уочена много пре несрећа које су се догодиле, најалост без одговарајуће реакције произвођача.

Сличан проблем и понашање је примећено и код ваздухоплова другог произвођача исте генерација Ербаса 320 NEO. Међутим EASA је низом тестова у симулатору утврдила да се померањем тежишта (тако што се задњи редови седишта неће попуњавати) ваздухоплов може и даље користити, уз поменуто ограничење. На крају је и на овом типу грешка исправљена.

Моделован сценарио се одвија на замишљеном аеродрому са две писте које се укрштају и различите су дужине и капацитета, пројектоване за истовремену употребу. У сценариу/симулацији након низа пропусти ваздухоплов средње величине излеће са писте и након мањег оштећења и лакших повреда две особе успоставља се нормалан рад аеродрома. Након неколико техничких анализа понашања деловна система одрађена су и безбедносна, сходно препорукама, али и правна у складу са националним прописима. Због обима анализа, овде наводимо само закључке.

Након форензичких и истражних радњи спроведених после удеса дошло се до закључка да се већина несрећа

могла спречити. Пружаоци услуга у ваздухопловству примарно, а потом и произвођачи, почињу са класификацијом и обрадом података о ситуацијама које нису довеле до несрећа, али се могу сврстати у инциденте.

КЛАСИФИКАЦИЈА ПРЕМА EASA

Стратегија и принципи Европске агенције за безбедност ваздушне пловидбе се заснивају практично на смерницама које је поставио ICAO тако да је све универзално применљиво. EASA и њено поље деловања је далеко шире од саме Европе и простире се дуж комплетног Медитерана и делимично на Блиском Истоку и Азији. Смернице ICAO су водиле за целу планету па се овом приликом у скраћеном облику упознајемо са њима.

Процена безбедносног ризика или система управљања безбедношћу увелико зависи од избора методе, тачније од адекватности методе за процену ризика и потребе за правилним разумевањем циљева процене ризика. Оцена безбедносног ризика догађаја је препозната као један од главних приоритета у контексту система управљања безбедношћу. Мерење нивоа ризика практично одређује приоритете. Квантитативне вредности ризика су релативне вредности ризика између догађаја, израчунавају се или пореде на различите начине. Инцидент или пропуст је нешто где нас поступци, вештина, обука или сигурносни системи нису заштитили, већ „срећна околност“. Ово уједно представља најстарији, традиционални метод за процену који се користи од почетка комерцијалног ваздухопловства. У овој методи се безбедносни učinак представља и приказује бројем (или стопом) различитих категорија догађаја, тачније њиховом учесталости, а његова три главна недостатка су: а) квалитативни učinак ограничен на највише 3 категорије, б) нема квантитативне вредности ризика и в) фокус је на очигледним последицама а занемарује се потенцијал ризика. Данас када су несреће веома ретки догађаји (мање од 3 на 10 милиона летова), ова метода постаје неупотребљивља из перспективе пружаоца услуга који су у обавези да квантификују своје перформансе.

МЕТОДЕ ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА

ICAO матрица ризика

ICAO матрица ризика је метода процене ризика заснована на „пројектованој вероватноћи и озбиљности последица могућих исхода постојеће опасности или безбедносног случаја“. Иако се овај метод успешно користи за процену ризика безбедносних проблема, он има видљива ограничења и није довољно осетљив за појединачне процене ризика. Овај метод карактерише прилагођена матрица без разумевања Коксове теореме матрикса (Табела 1)[4].

ВЕРОВATНОЋА	ОЗБИЉНОСТ				
	КАТАСТРОФАЛНО А	ОПАСНО В	ВЕЛИКА НЕСРЕЋА С	МАЊА НЕСРЕЋА D	ЗАНеМАРЉИВО E
УЧЕСТАЛО 5	5A	5B	5C	5D	5E
ПОВРЕМЕНО 4	4A	4B	4C	4D	4E
РЕТКО 3	3A	3B	3C	3D	3E
МАЛО ВЕРОВATНО 2	2A	2B	2C	2D	2E
ГОТОВО НЕМОГУЋЕ 1	1A	1B	1C	1D	1E

Табела 1 Коксова матрица

ERC метода процене ризика

Кључни циљевни методе класификације ризика догађаја према ERC методи[5] (Табела 2) коју је развила радна група ARMS[6] су превазилажење ограничења ICAO-ове матрице и смањење субјективности аналитичара у погледу вероватноће догађаја и последица истог. За разлику од ICAO матрице где се процена ризика заснива на свим сличним догађајима истог типа (догађаји који су последица истог ризичног догађаја), ERC метод се заснива на концепту „нивоа ризика заснованог на самом догађају“ где се ризиком догађаја сматра ризик који је постојао када се догађај десио. Класификација ризика односно процена ризика коју носи догађај се врши коришћењем ERC матрице где се од стручњака за безбедност тражи да одговори на два питања:

1. Да је овај догађај ескалирао у несрећу, који би био највероватнији исход?
2. Која је била ефикасност преосталих баријера између овог догађаја и исхода са највећом вероватноћом?

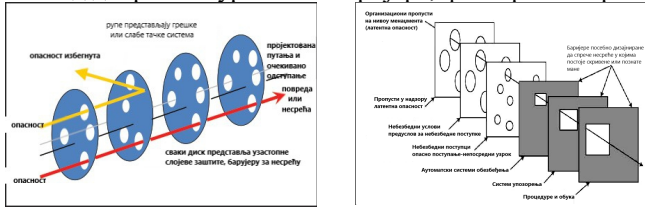
Табела 2 ERC метода процене ризика

ДРУГО ПИТАЊЕ				ПРВО ПИТАЊЕ		
КОЈИКА ЈЕ ЕФИКАСНОСТ ПРЕСТАЛИХ "БАРИЈА" КОЈЕ МОГУ ДА СПРЕЧЕ ДА ДОЂЕ ДО НАЈВЕРОВATНИЈЕГ ЛОШЕГ СЦЕНАРИЈА ?				ДА ЈЕ ПОСМАТРАНИ ДОГАЂАЈ ЕСКАЛИРАО ДО НЕСРЕЋЕ КОЈИ ЈЕ НАЈВЕРОВATНИЈИ ИСХОД ?		
ЕФИКАСНЕ	ЛОШЕ ЕФИКАСНЕ	МИНИМАЛНО ОСЕТЉИВЕ	БЕЗ УТИЦАЈА	НЕСРЕЋА СА МАЊАМ ГИБИ ПОСЛЕДИЦАМА	УГРЕТАК ВАЛУОЗНОЋОРА ИЛИ ВЕЊЕ ЖРТВА	ТИПИЧНА СЦЕНАРИЈА НЕСРЕЋЕ
50	102	502	2500	НЕСРЕЋА СА МАЊАМ ГИБИ ПОСЛЕДИЦАМА	УГРЕТАК ВАЛУОЗНОЋОРА ИЛИ ВЕЊЕ ЖРТВА	УГРЕТАК КОНТРОЛЕ НАД ВАЛУОЗНОЋОРОМ, СУДАР У ВАЛУОЗНОЋОРОМ, НЕКОГНИСНИ ПОВОРА У КАВИНИ, ЕКСПЛОЗИЈА, ГОТОВИО УГРЕТАКМА С ТРУКТОУ ВАЛУОЗНОЋОРА, УДАР У ТЛО
10	21	101	500	ВЕЛИКА НЕСРЕЋА	12 ЖРТВЕ, ВЕЊЕ ТЕШКО ПОВРЕЂЕНИХ ОСОБА, ВАЛУОЗНОЋОВ ОВЊЕЉАНО ОИТВЊЕЊЕ	СУДАР ПРИ ВЕЛИКОЈ БРЖИНИ ТАКСИРАВА, ВЕЛИКЕ ПОВРЕДЕ ИЗАЗВАНЕ ГРЕШОКЦИМА
2	4	20	100	МАЊЕ ПОВРЕДЕ ИЛИ ЛАКО ОИТВЊЕЊЕ ВАЛУОЗНОЋОРОМ	ЛАКШЕ ПОВРЕДЕ И ЗАНеМАРЉИВА ОИТВЊЕЊЕВА ВАЛУОЗНОЋОРА	НЕСРЕЋЕ НАСТАЈЕ ТОКОМ ИСПАРИРАВАЊА ГОСОВОГ, МАЊА ОИТВЊЕЊЕВА У СЛЕД ВРЕМЕНСКИХ ПРМЕНА
1				БЕЗ МОГУЋНОСТИ ДА ДОЂЕ ДО НЕСРЕЋЕ	БЕЗ ПОТЕНЦИЈАЛНЕ НЕСРЕЋЕ ИЛИ ПОВРЕДА	БЕЗ КОЈИ ДОГАЂАЈ КОЈИ НИЈЕ МОГАО ДА ДОЈДЕ ДО НЕСРЕЋЕ, ЧАК И АКО КАО ТАКАВ БИМА ОПЕРАТИВНЕ ПОСЛЕДИЦЕ (КАО ПРОМЕНА ДУГАВЕ, КАШЊЕЊЕ, ВОДЕТ КОЈИ ОПЕРАТИВНОО ОСОБЉА, ПРОИПТЕТ СЛОТ)

Питања која се односе на процену озбиљности слично приступу ICAO матрице ризика, и на вероватноћу исхода, заснивају се на процени преосталих баријера које спречавају ескалацију догађаја до несреће. Овај приступ прати модел узрочности несреће „швајцарски сир“ који је развио Џејмс Рисон[7](Слика 1).

Следеће одговоре на друго питање предлаже група ARMS: Нису ефикасни: Несрећа се догодила или је могла бити спречена само чистом срећом или вештином пилота или другог одговорног лица (котролор лета и сл.).

1. Минимално ефикасне: баријере су постојале, али је њихова укупна ефикасност била минимална
2. Ограничено ефикасне: ефикасност преосталих безбедносних баријера је ограничена. Ово је ванредна ситуација, која је захтевнија за превазилажење, али са значајном преосталом сигурносном маргином
3. Ефикасне: сигурносна маргина је одговарајућа и састоји се од добрих сигурносних баријера, филтера и аларма.



Слика 1 Рисонов модел „швајцарског сира“

ЕРС модел има два излаза:

1. Толеранција на ризик: вредности боја указују на поступке у вези са догађајем.
2. Индекс ризика: квантитативна вредност ризика у опсегу од 1 до 2.500 погодна за мерење безбедносних перформанси.

Неколико аутора је предложило побољшане верзије матрице са бољим резолуцијама (Jochen Mickel[8]), али о овим моделима овде неће бити речи јер следе исте принципе који су претходно наведени.

EASA ERCS метода за процену ризика

EASA ERCS (European Risk Classification Schema)[9] метода за процену ризика (Табела 3) је најкомплекснија од свих до сада обрађених и представља њихову еволуцију, а да ли представља квалитативни помак и стварни напредак, покажаће време.

Европска шема класификације ризика ERCS прати основне принципе методе класификације ризика догађаја и то: 1) Поцена нивоа ризика на основу догађаја, 2) Процена вероватноће заснована на ефикасности заустављања и преосталих баријера и 3) Квалитативна и квантитативна оцена ризика по безбедност догађаја, без уласка у стварне последице. У поређењу са ERC класификацијом ризика догађаја, EASA ERCS метода уводи идентификацију кључних области ризика (укључујући поређење међусобних нивоа ризика) и усклађен приступ за утврђивање озбиљности догађаја и вероватноће, па је стога и много сложенија. Примена ERCS подразумева следеће кораке: 1) утврђивање највероватније врсте несреће, 2) одређивање категорије несреће, 3) оцена озбиљности, 4) идентификовање зауставне баријере из ERCS модела баријере, 5) идентификација ефикасности преосталих баријера, 6) израчунавање суме тежине баријере и одговарајућег резултата баријере и 7) одабир безбедносног скорa и одговарајуће вредности ризика из ЕРЦС матрице.

Табела 3 EASA ERCS метода процене ризика

ОЗБИЉНОСТ		КЛАСИФИКАЦИЈА (ERCS Score)									
ПОТЕНЦИЈАЛНИ РЕЗУЛТАТ ДОГАЂАЈА	БОДОВИ										
ДОГАЂАЈ СА ПОТЕНЦИЈАЛОМ ЗА ЕКСТРЕМНО ВЕЛИКУ НЕСРЕЂУ И ЖРТВЕ (ПРЕКО 100)	X	X9	X8	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0
ВЕЛИКА НЕСРЕЂА СА МОГУЋНОШЋУ ЗА ВЕЛИКИ БРОЈ ПОВРЕЂЕНИХ ИЛИ ЖРТВА (20-100)	S	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
ВЕЛИКА НЕСРЕЂА СА ОГРАНИЧЕНИМ БРОЈЕМ ЖРТВА (2-19) СА ПОВРЕДАМА КОЈЕ УТИЧУ НА КВАЛИТЕТ ЖИВОТА ИЛИ УНИШТЕЊЕМ ВАЗДУХОПЛОВА.	M	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0
НЕСРЕЂА КОЈА ИМА ЗА ПОСЛЕДНИЦУ ЈЕДНУ ЖРТВУ ИЛИ ОСОБУ СА ОЗБИЉНИМ ПОВРЕДАМА ИЛИ ВЕЛИКУ ШТЕТУ НА ВАЗДУХОПЛОВУ	I	I9	I8	I7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I0
НЕСРЕЂА КОЈА ЗА ПОСЛЕДНИЦУ ИМА МАЊЕ ИЛИ ТЕЖУ ПОВРЕДУ БЕЗ УТИЦАЈА НА КВАЛИТЕТ ЖИВОТА И МАЊЕ ОШТЕЋЕЊЕ ВАЗДУХОПЛОВА	E	E9	E8	E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	E0
БЕЗ МОГУЋНОСТИ ДА ДОЂЕ ДО НЕСРЕЂЕ	A	БЕЗ УТИЦАЈА НА БЕЗБЕДНОСТ									
ОДГОВАРАЈУЋИ БОДОВИ ЗА ЗАШТИТНЕ СИСТЕМЕ		9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
ЗНП БОДОВА КВАЛИТЕТА ЗАШТИТЕ		17-18	15-16	13-14	11-12	9-10	7-8	5-6	3-4	1-2	0
ВЕРОВАТНОБА ПОТЕНЦИЈАЛНОГ НЕСРЕЂНОГ ИСХОДА											

ЗАКЉУЧАК

На симулираном моделу може се видети да независно од модела који користимо за процену ризика резултати више варирају у односу на обученост лица него од врсте примењеног модела, док најмању разлику даје управо EASA модел. Најмање одступање је практично везано за детаљну аналитичку методу доделе бројне вредности испитиваном догађају, односно његове квантификације. Нажалост метода је временски захтевна и код необученог корисника могла би да да погрешан резултат, док су друге поменуте методе интуитивније и захтевају много краћи период за усаглашавање са поступком. Резултати и сценарио симулације су даљи предмет истраживачког рада, овде је нагласак на поређења поменутих метода процене ризика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Доступно на: planecrashinfo.com
- [2] ICAO Међународна организација за цивилно ваздухопловство основана од стране Уједињених Нација. Доступно на <https://www.icao.int/>
- [3] FAA Ваздухопловне власти Сједињених Америчких Држава
- [4] ICAO Safety Management Manual (SMM) doc. 9859
- [5] ERC (Event Risk Classification) метода процене ризика развијена од стране ARMS
- [6] ARMS (Airline Risk Management Solutions) првенствени задатак групе је проналажење алата за процену ризика код авио превозника али и код осталих учесника у ваздухопловству
- [7] слика 1 у тексту модел швајцарског сира...

[8] Процена оперативних ризика лета, Bewertung operationeller Flugrisiken
аутор Jochen Mickel, издата само на немачком

[9] European Risk Classification Schema систем за градацију и
класификовање потенцијално ризичних ситуација па све до несрећа ради
лакше обраде и процене опасности коју собом носе за будућност

Нуклеарна форензика – методе за откривање процеса производње, прометовања и кријумчарења недозвољених фисионих материјала

Срећко Илић¹, Радован Радовановић¹, Саша Милић², Александар Алексић², Александар Ивковић¹

¹ *Криминалистичко-полицијски универзитет – департман форензичког инжењерства*

² *Факултет за дипломатију и безбедност*

Апстракт. Савремена технологија са собом доноси савремена и моћна оружја, али и бојазан да она могу бити употребљена ван међународних договора, протокола и обичаја ратовања. Као последица развоја нуклеарних технологија, појавио се нуклеарни тероризам, а нуклеарна форензика је област форензичког инжењерства која се, у садејству са другим традиционалним форензичким методама, бави реконструкцијом догађаја који су претходили неком нуклеарном инциденту или катастрофи. Методологије и мерне методе нуклеарне форензике се користе за откривање кријумчарења и недозвољене производње специјалних фисионих материјала, који су основе језгара у атомским и хидрогенским бомбама. У раду ће бити разматрано више метода са циљем њихове категоризације и систематизације, а детаљно ће бити описане гама-спектрометријска метода, различите методе масене спектрометрије и рендгенска флуоресцентна спектрометрија. Циљ рада је да укаже на значај нуклеарне форензике у имплементацији нуклеарних безбедносних режима, како на локалном, тако и на глобалном нивоу.

Кључне речи: нуклеарна форензика, тероризам, оружје, криминал, инциденти, безбедност

Увод

Открићем нуклеарног наоружања и његовом применом на бојном пољу, у јапанским градовима Хиросима и Нагасаки променио је погледе на обичаје ратовања али и политику и дипломатију. Управо због ове чињенице, данашњи актери на међународној дипломатско-политичкој сцени морају да се обраћају бираним речима једни другима и да њихова дела буду умерена колико год је то могуће. Државе које имају програме нуклеарног наоружања, у једном моменту су, схвативши опасност у којој се свет налази, иницирале механизме за заустављање ширења нуклеарног

наоружања. Тек неколико држава је након тога успело у намери да зварши већ започет нуклеарни програм. Те државе су, заједно са свим осталим које немају нуклеарно наоружање, под будним оком међународне заједнице и МААЕ – Међународне агенције за атомску енергију (*енг.* "IAEA – International Atomic Energy Agency" [1]), проблем је у томе што правни оквири нису у потпуности обавезујући, па су механизми за деловање МААЕ веома сужени.

Чињеница да смо пар држава има нуклеарно наоружање и да је оно инсталирано на територијама неколико других, рекло би се да смо прилично безбедни, али тај простор је попунио нуклеарни тероризам, као стална претња за безбедност незаштићеног становништва било где у свету. У домену је фантастике да терористи могу да дођу до нуклеарног оружја, али они нуклеарне материјале користе у друге сврхе, о чему ће даље у раду бити речи.

Анализом нуклеарних материјала форензичари настоје да установе како, када или где су материјали направљени, односно за шта су коришћени [3, 4]. Треба истаћи да су нуклеарни форензички алати веома значајни за нуклеарне инспекторе приликом у откривања изотопа који се користе приликом конструисања нуклеарног оружја. Ово се односи на инспекцијске надзоре приликом испитивања тврдњи да ли је нека држава покушала да развије или тестира нуклеарни борбени програм и тиме нарушила неки од споразума које је потписала или обогачује материјал за производњу електричне енергије.

Међународни споразуми о неширењу нуклеарног наоружања

Најзначајнији споразум у домену забране нуклеарне безбедности је Споразум о забрани ширења нуклеарног наоружања (*енг.* "NPT – Non-Proliferation Treaty"). Донет је 1968. године, а

ступио је на снагу 1970. године. Споразумом је као најважније издвојено да је предвиђено да дође до престанка ширења нуклеарног оружја, да дође до укидања ове врсте наоружања и да се појача свеобухватна сарадња у циљу ширења знања везаних за мирнодопске примене нуклеарне енергије. Такође, предвиђено је да МААЕ има улогу у контроли спровођења тачака и контроле коришћења нуклеарне енергије. Ово је веома битна ставка за нуклеарну форензику. Наиме, све потписнице се обавезују да ће МААЕ обезбедити увид у нуклеарна истраживања и производњу и размену фисионих материјала у мирнодопске сврхе. Ове ставке указују на то да би се контрола спроводила управо коришћењем нуклеарних форензичких метода, јер се радионуклиди који се за производњу наоружања (недозвољени фисионих материјали) разликују од оних који се користе у мирнодопске сврхе (дозвољени), те би се форензичком контролом и инспекцијским надзором врло лако могло открити уколико нека држава под велом производње нуклеарне енергије тежи да развије нуклеарни борбени програм.

Други по важности је Свеобухватни споразум о забрани нуклеарних проба (*енг.* – "СТВТ - Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty"). Споразуму су претходили неки о делимичној забрани нуклеарних проба, али је овим Споразумом који је донет 1996. године и дефинитивно завршено са нуклеарним пробама. Било је ту и тамо неколико инцидената, односно кршења Споразума, понајвише од стране С. Кореје, али су нуклеарне пробе од стране оних који су их највише изводили и дефинитивно престале.

Поред ова два споразума постоји низ билатералних споразума између САД и Русије. Свим тим споразумима се подразумева редуковање нуклеарног наоружања. Сваки од њих је одиграо неку улогу, али се заправо ништа круцијално, по питању укидања нуклеарног оружја, до данас није десило.

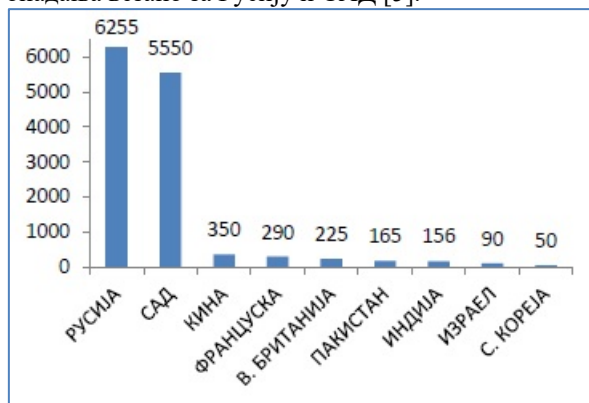
За ову тему значајан акт је свакако Међународна конвенција о спречавању аката нуклеарног тероризма (*енг.* "CNT – International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism") из 2005. године. Конвенцијом је дефинисан низ аката који се сматрају нуклеарним тероризмом, али је и гарантована помоћ МААЕ у сузбијању ове врсте тероризма, као и решавању кризних ситуација и уклањању непожељних материјала са територије угрожене државе.

Безбедносни акти које нисмо посебно описали, редом према времену доношења или предлагања, су: Повеља о Антарктику (1959), Споразум о делимичној забрани нуклеарних проба (1963), Споразум о космосу (1967), Споразум о

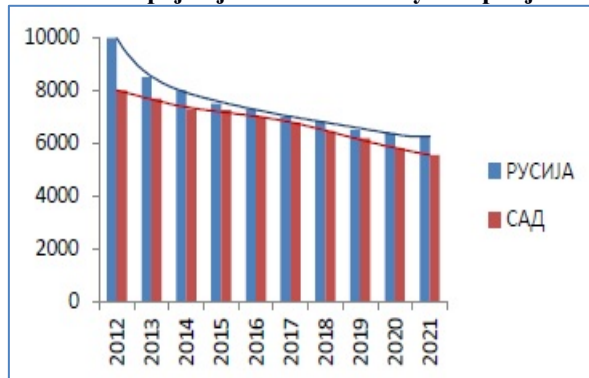
забрани смештања нуклеарног и другог оружја за масовно уништење на дно мора и океана и у њихово подземље (1971), Споразум о Месецу (1979) и Споразум о забрани одређених фисионих материјала (1993).

Тренутно стање у вези са бројем нуклеарних бојевих глава у свету

Од открића нуклеарног наоружања, кроз читав "Хладни рат", па све до данас, Русија и САД су биле водеће војне силе гледано према квантитету нуклеарних бојевих глава. Тренутни тренд у вези са бројем нуклеарних глава у свету можемо видети на графику [5]. Што се тиче тренда раста или опадања, праћењем квантитета бојевих глава у свету, може се уочити да Русија и САД из године у годину смањују број бојевих глава, док остале нуклеарне силе повећавају своје нуклеарне арсенале. Међутим, како остале нуклеарне силе у збиру имају око 10 пута мање бојевих глава од САД и Русије заједно, а тај однос је раније умео да буде и дупло већи, јасно је да је нуклеарно разоружавање у рукама две водеће силе и зато су нам оне, у смислу анализе, најбољи показатељ параметара раста или пада. Тренд опадања везано за Русију и САД [5].



Слика 1. Број бојевих глава по нуклеарној сили



Слика 2. Однос нуклеарних бојевих глава Русије и САД током последњих 10 година

*Систем инспекцијског надзора у оквиру
Међународне агенције за атомску енергију*

Оснивањем Међународне агенције за атомску енергију и изгласавањем њеног Статута 1957. године, било је предвиђено да постоји инспекцијски надзор који би обухватао низ техничких мера којима се врши праћење обавеза држава да не користе нуклеарне мирнодопске системе за развој нуклеарног наоружања, што је забрањено тачком 5. става А, члана 3. Статута. Инспекторски систем на неки начин представља извршно тело у оквиру нуклеарних безбедносних режима. На оснивање инспекцијског система се чекало две године. Договорен је у Канади 1959. године, међутим, документ који је регулисао рад овог тела се чекао још толико. Године 1961. потписан је први документ који је регулисао процедуре за аплицирање и упутства за рад „IAEA“ инспектора. Овај документ је познат под називом „INFCIRC/26“, а након допуне, 1965. године, заведен је под називом „INFCIRC/66“. Када је 1970. године на снагу ступио Споразум о забрани ширења нуклеарног наоружања, створили су се услови за „озбиљније“ деловање Агенције, што је 1971. године, довело до увођења новог „INFCIRC/153“ документа о инспекцији, који је пре свега увео Свеобухватан инспекцијски надзор (*енг.* CSA – Comprehensive Safeguards Agreements). Он је дефинисао начин сарадње између Агенције и држава потписница и то, пре свих, држава које нису декларисане нуклеарне силе, а имају установе које користе нуклеарну енергију у мирнодопске сврхе. Ове државе су се, потписивањем документа, обавезале на свеобухватан инспекцијски надзор од стране „IAEA“ на својој територији, те да ће омогућити инспекторима све податке који су у вези са нуклеарним постројењима и применом радионуклида у било којој области. У оквиру истог акта дефинише се Протокол о малим количинама, који се односи на државе које не поседују велика нуклеарна постројења него имају јако мале количине нуклеарних материјала или их немају уопште. Наиме, њиме се уређује да у државама које потпишу Протокол Агенција нема сталан инспекторски надзор. С друге стране, Протокол не искључује установљене обавезе према Агенцији и разним потписаним споразумима. Дакле, држава која је приступила Протоколу се одриче великих нуклеарних истраживања, што је чини изузетом од сталне инспекторске контроле, али мора да пошаље извештај Агенцији о свим радионуклидима које поседује или жели да набави, као и да одговори на све прописане захтеве „IAEA“ уколико за тим постоји потреба.

Деловање инспектора Агенције у циљу спречавања ширења нуклеарног наоружања у основи се може поделити у четири групе, сакупљање и процена информација, унапређење сарадње са државама, планирање, спровођење и унапређење свих активности, укључујући и рад на терену, као и деловање командног центра у Бечу и доношење закључака и њихово представљање. Агенција у оквиру инспекторских послова прикупља велики број информација. Извори из којих се долази до њих могу се поделити у три групе:

- 1) информације које је обезбедила сама држава у којој се врши надзор (извештај државе о нуклеарним активностима и радиоактивним материјалима),
- 2) информације које су произашле из података са терена (прикупљени узорци) и обраде у командном центру (подаци из прикупљених узорака, али и они добијени помоћу детектора и камера постављених у нуклеарним постројењима широм света),
- 3) информације из других релевантних извора као што су отворени извори (интернет и други) и они које је доставила трећа страна.

Информације из свих извора морају бити међусобно конзистентне. У супротном Агенција је принуђена да са државом превазилази проблем кроз низ консултација, али и увођењем посебних мера уколико је то неопходно.

Услед немогућности Агенције да, заједно са својим инспекторима, одговори на изазове који су пред њу постављени, дошло је до потребе да се уведе Додатни протокол (INFCIRC/540) у оквиру механизма који се спроводе у циљу поштовања Споразума о забрани ширења нуклеарног наоружања. Овај Протокол Агенцији и њеним инспекторима проширује овлашћења и омогућава већа права на информације од значаја, те лакше откривање забрањених нуклеарних активности. Додатни протокол је донет 1997. године.

**Нуклеарна форензика – организације,
лабораторије и методе**

Нуклеарна форензика је релативно млада област форензике. Свој нагли развој је почела да доживљава развојем нових технологија и то крајем прошлог века, да би у 21. веку доживела потпуни процват. Далеко од тога да неке методе које она

користи нису постојале и раније и далеко од тога да нису постојали начини за откриће забрањених нуклеарно-безбедносних активности, али она тада просто није била установљена као дисциплина, а њене методе нису биле свеобухватне као данас. У нека старарија времена, просто су се користиле методе нуклеарне физике у циљу откривања недозвољених активности. Данас постоји низ организација широм света које раде на јачању ове научне дисциплине, а једна од њих је и МААЕ. Нуклеарна форензика је једини практичан механизам којим се може деловати у циљу спречавања кршења нуклеарних безбедносних режима и ширења нуклеарног наоружања.

Релевантне организације

Иако је МААЕ кровна организација по питању нуклеарне безбедности, она ипак није кровна организација која ради на примени и развоју нуклеарне форензике. Најрелевантнија организација на светском нивоу је МТРГ – Међународна техничка радна група за нуклеарну форензику (*енг.* "ITWG – The Nuclear Forensics International Technical Working Group"). Сматра се да је Радна група основана 1995. године, иако је активно учешће у развоју програма узела тек двадесетак година касније (2016.). Она броји више од 50 земаља потписница, међу којима је и Србија, као и 11 релевантних међународних организација, међу којима је и МААЕ, али и ИНТЕРПОЛ, ЕУРОПОЛ и ОЕБС. Такође, на списку организација је и Глобална иницијатива за борбу против нуклеарног тероризма (*енг.* "GICNT – Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism") која се убраја у значајне чиниоце у борби против злоупотребе нуклеарних материјала, а самим тим и у развоју нуклеарне форензике и њених метода. Ова организација се састоји од три групе, од којих је једна Радна група за нуклеарну форензику (*енг.* "NFWG – Nuclear Forensics Working Group") чији главни циљеви леже у охрабрењу држава да формирају националне нуклеарно-форензичке лабораторије и националне нуклеарно-форензичке библиотеке [6].

Међународна техничка радна група је подељена у више мањих група. Свака група има своје деловање. Поред Групе за прикупљање доказа, веома је активна и Група за вежбе. Примарни циљ овог сектора је повећање спремности лабораторија за поступање у случају потреба. Пре договореног састанка Групе, свака лабораторија добија радиоактивни узорак за који треба да изврши анализу коришћењем метода нуклеарне форензике. Група инсистира на анализама које се врше у року од 24 часа од добијања узорка, затим након 7 дана и

последња након 2 месеца. Након тога се сви учесници састају и размењују искуства уз дискусију. Постоје још и Група за смернице, која ради на развоју техничких докумената ове организације, затим Група за формирање националних библиотека за нуклеарну форензику и Група за тренинге, која пружа помоћ у развоју нуклеарне форензике државама и организацијама које то затраже [6].

Методе нуклеарне форензике

У различитим литературама постоје различите категоризације нуклеарних форензичких метода. Оне су углавном извршене према различитим критеријумима. Чак је и "ITWG" у документу бр. 2 серије докумената Међународне агенције за атомску енергију под насловом "Нуклеарна безбедност", дала предлог редоследа метода којим би требало да се приступа у случају вршења нуклеарно-форензичког испитивања, а који се може сматрати одличном категоризацијом датих метода, пре свега према времену испитивања, али и врсти испитивања у смислу избора научне методе.

Високо-резултивна гама спектрометрија (*енг.* "HRGS – High-Resolution Gamma Spectrometry"). Обично се користи у почетној фази испитивања. Неинвазивна је и прилично поуздана за почетни стадијум испитивања, па се користи као незаобилазна метода за добијање смерница за даље испитивање. Заснива се на детектовању γ -фотона и њиховом идентификовању у датом спектру. γ -кванти настају када језгро, након распада, прелази из енергетски побуђеног у неко ниже енергетско стање. Како је енергија γ -фотона једнака разлици енергија које је језгро имало и које има након емисије кванта, јасно је да се тумачењем спектра може доћи до закључка до ког распада је дошло.

Разне врсте масене спектрометрије (*енг.* "MS – Mass Spectrometry"). Масена спектрометрија је веома распрострањена метода. Поуздана је и осетљива, али је и инвазивна, јер узорак пре употребе мора да прође кроз одређене физичко-хемијске припреме. Користи се углавном за одређивање састава неке супстанце. Сепарација појединачних елемената се врши на основу њихове масе. Овде се користи чињеница да наелектрисане честице када се нађу у хомогеном магнетном пољу, почињу да се крећу по кружној путањи. Што је већа маса честице, већи је и полупречник кружне путање. То нас води до тога да ће се честице различите масе различито понашати у магнетном пољу, оне са мањом масом ће описивати кругове мањег полупречника и обрнуто.

У нуклеарној форензици се често користе методе чија је основа масена спектрометрија, али поред ове методе обухватају још неки вид додатне анализе. Од ових метода најчешће се користе:

Масена спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом (енг. "ICP-MS"), **Масена спектрометрија термалном јонизацијом** (енг. "TIMS"), **Масена спектрометрија раствора изотопа** (енг. "IDMS"), **Гасна хроматографија – масена спектрометрија** (енг. "GS/MS"), **Масена спектрометрија секундарним јонима** (енг. "SIMS"), **Масена спектрометрија акцелератором** (енг. "AMS"). Надоградњом методе "ICP-MS" додатним алатима, добијају се још неке сложеније варијанте ове методе, као што су: **Ласерска аблација масена спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом** (енг. "LA-ICP-MS") и **Мулти-колекторска масена спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом** (енг. "MC-ICP-MS") [3, 7].

Поред претходно побројаних метода, у нуклеарној форензици су присутне и следеће методе: **Скенирајућа електронска микроскопија** (енг. "SEM"), **Трансмисиона електронска микроскопија** (енг. "TEM"), **Рендгенска флуоресценција** (енг. "XRF"), **Рендгенска дифракција** (енг. "XRD"), **Инфрацрвена спектроскопија Фуријеовим трансформацијама** (енг. "FTIR"), **Оптичка емисиона спектрометрија са индуковано спрегнутом плазмом** (енг. "ICP-OES"), **Ласерски индукована спектроскопија пробоја** (енг. "LIBS"), **α -спектрометрија** (енг. "AS"), **Микро-Раман Спектроскопија** (енг. "micro Raman Spectroscopy"), као и комбиноване "SEM/XRF", али и "SEM/EDX" или "SEM/WDX" [3, 7].

Све набројане методе су аналитичке и представљају срж нуклеарно-форензичких испитивања. На овај начин добијени подаци се сврставају у категорију која се на енглеском назива "ESS – Environmental Sampling for Safeguards"). Поред њих се користе и методе конвенционалне форензике, нпр. ДНК анализе и узимање отисака прстију. Осим тога, користе се и разне методе мониторинга, праћења итд. Те методе су: откривање недозвољених материјала **вишеканалним анализаторима** (енг. "MCA"), откривање недозвољених материјала **детекторима легура** (енг. "ALEX"), коришћење **инструмената за праћење промена у животној средини** (енг. "Environmental monitoring instruments"), коришћење система **дигиталног видео надзора** (енг. "Digital video surveillance systems"), коришћење **сателитског снимања** (енг. "Satellite imagery"), коришћење **инспекцијске базе података** (енг. "Inspection Database"). У ову групу метода спадају и софтвери који се користе у ове сврхе, а то су: **Скуп неуралних**

мрежа (енг. "CNN"), **Морфолошка анализа за атрибуцију материјала** (енг. "MAMA") [7, 8].

Табела 1. даје поделу према времену коришћења и према групи у коју дата метода спада.

Табела 1 Редослед корака који треба предузети приликом испитивања узорка, према упутству (ITWG) [4]

Врста методе	24 h	7 дана	2 месеца
Радиолошки метод	Брзина дозе (α , β , γ , n) Површинска контаминација Радиографија		
Физичка карактеризација	Визуелни преглед Фотографисање Утврђивање масе и димензија Оптичка микроскопија Густина HRGS	Микроструктура Морфологија SEM XRD	Наноструктура Морфологија TEM
Анализа изотопа		TIMS ICP-MS	SIMS Технике радиоактивног бројања HRGS (sa U) α -Spectrometry GC-MS
Радиохронометрија	HRGS (sa Pu)	TIMS ICP-MS	
Хемијски састав	XRF	ICP-MS Хемијско испитивање FTIR SEM IDMS	
Традиционалне форензичке методе	Примена традиционалних форензичких дисциплина (отисак прста, ДНК анализа власитл.)		

У табели 2. је дат преглед метода према томе у коју сврху се користе. Табела није преузета, али су подаци у њој систематизовани коришћењем података одређеног извора [8]. Ови подаци су приказани табеларно ради веће прегледности. У табели 3. су дате методе према врсти алата у које се убрајају. У табели 4. подела је према величини узорка и информацијама које се о узорку добијају.

Табела 2 Подела метода према томе у коју сврху се користе [8]

Информације које се добијају из дате методе	Врста методе
Елементарни и молекуларни потписи	ICP-MS ICP-OES LA (LA-ICP-MS) LIBS (за мале количине узорка) α -Raman Spectroscopy MC-ICP-MS TIMS AMS SIMS SIMS MC-ICP-MS
Карактеризација изотопа	LA-MC-ICP-MS SIMS XRF SEM/EDX SEM/WDX α -Raman Spectroscopy MAMA CNN
Датирање	
Информације о нехомогености недозвољених нуклеарних материјала	
Морфологија у нуклеарној форензици	

Табела 3 Врста алата и метода у оквиру алата [9]

Врста алата	Метода
Алати за анализу елемента или изотопа	Радиометријске технике (α , β и γ спектрометрија) Масена спектрометрија (TIMS, ICP-MS) Хемијски огледи Радиохемијске методе XRF XRD GC/MS
Алати за визуелну анализу	Визуелно осматрање и фотографија Аутордиографија Оптичка микроскопија SEM TEM
Алати за микроанализу	Рендгенске микроанализе (SEM/EDX и SEM/WDX) SIMS ИЦ спектроскопија α -Раман спектроскопија

Табела 4 Карактеризација према величини узорка и границама детекције [6]

Врста алата	Метода	Врста информације о материјалу	Граница детекције	Просторна резолуција
Алати за анализу елемента или изотопа	HRGS	Изотопске	пг-μг	
	Хемички огледи	Елементарне	пг	
	Радиохемијске/ Радиометријске методе	Изотопске/ Елементарне	фг-пг	
	TIMS	Изотопске/ Елементарне	пг-пг	
	ICP-MS	Изотопске/ Елементарне	пг-пг	
	XRF	Елементарне	10 ppm	
	XRD	Молекуларне	~ 1 ат%	
Алати за визуелну анализу	GS/MS	Молекуларне	ppm	
	Визуелна инспекција	Макроскопске		0.1 mm
	Аутордиографија	Микроскопске		10 – 50 μm
	Оптична микроскопија	Микроскопске		1 μm
	SEM	Микроскопске		1 nm
Алати за микроанализу	TEM	Микроскопске		0.1 nm
	SIMS	Елементарне/ Изотопске	0.1 ppb – 10 ppm	0.1 – 1 μm
	SEM/EDX (WDX)	Елементарне	0.1 – 2 mμ %	1 μm
	FTIR	Молекуларне	0.1 – 1 mμ %	10 μm
	цРаман	Молекуларне	~ 1 mμ %	1 μm

Закључак

Развојем нуклеарно-форензичких метода, нуклеарна безбедност је подигнута на виши ниво. Нуклеарни безбедносни режими су без ових алата немоћни. Постојање метода, значајно је допринело заустављању ширења нуклеарног наоружања, нуклеарног тероризма и недозвољене производње и употребе оружја које се везује за атомску и нуклеарну енергију. Ипак, и поред ових озбиљних метода није дошло до онога чему се тежи, а то је да се у потпуности укине нуклеарно наоружање, које би у некој будућој ескалацији сукоба између сила довело до престанка света каквим га познајемо. Међутим, кривица је у политици, а методе су моћан алат у имплементацији споразума.

Литература

- [1] International Atomic Energy Agency, *IAEA Safeguards Glossary* (No. 3) [Electronic version], Retrieved June 2002, from: https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_safeguards_glossary.pdf
- [2] EU Non-Proliferation Consortium, *Nuclear Forensics Material Analysis for Security Purposes*, Non-Proliferation Papers No. 60 (2017)
- [3] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Forensics in Support of Investigations*, IAEA Nuclear Security Series No. 2-G (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2015.
- [4] K. Mayer, M. Wallenius, K. Lützenkirchen, J. Galy, Z. Varga, N. Erdmann, R., Buda, J.-V. Kratz, N. Trautmann, K. Fifield, *Nuclear Forensics: A Methodology Applicable to Nuclear Security and to Non-Proliferation*, International Nuclear Physics Conference (2010)
- [5] Sipri, *Arms, Disarmament and International Security*, Yearbooks (2012-2021), from: <https://www.sipri.org>
- [6] International Technical Work Group: <http://www.nf-itwg.org/>
- [7] Z. Varga M. Wallenius, M. Krachler, N. Rauff-Nisthar, L. Fongaro, A. Knott, A. Nicholl, K. Mayer, *Trends and perspectives in Nuclear Forensic Science*, Trends in Analytical Chemistry 146 (2022) 116503
- [8] David L. Donohue, *Key Tools For Nuclear Inspections*, IAEA (2002), from: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publication/s/magazines/bulletin/bull44-2/44202451723.pdf>
- [9] M. J. Kristo, *Handbook of Radioactivity Analysis Volume 2: Radioanalytical Applications*, Lawrence Livermore National Laboratory (2018)

Stabilnost frekvencije kvarcnih oscilatora

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Tomislav Šekara

Apstrakt—Oscilatorna kola su neizbežni deo praktično svih elektronskih uređaja. Najčešće se koriste kola na bazi kvarcnih kristala. Prikazan je proces proizvodnje i princip rada kvarcnih oscilatora, kao i podele kristala i oscilatornih kola. Analizirane su metode kvantitativnog opisivanja greške odnosno nestabilnosti frekvencije. Efekti koji utiču na promene frekvencije su klasifikovani po fizičkom poreklu i vremenskom periodu u kom se dešavaju.

Cljučne reči—Kvarcni kristal, oscilator, frekvencija, vreme, stabilnost, preciznost

I. UVOD

Piezoelektricitet je pojava međuzavisnosti između normalnog napona, koji izaziva mehaničku deformaciju, i naelektrisanja na krajevima materijala. Pritisak na materijal izaziva električnu polarizaciju, i obrnuto, primena električnog napona izaziva deformaciju materijala. Piezoelektrični oscilatori su električna kola koja koriste piezoelektrične karakteristike kvarcnih kristala ili drugih materijala da stvore električni signal približno konstantne frekvencije. U današnje vreme piezoelektrični, uglavnom kvarcni, oscilatori su glavni izvor takta u elektronskim napravama, a praktično ne postoji elektronski uređaj bez oscilatora. Alternative kvarcu su drugi kristali (npr. turmalin, topaz ili kalijum-natrijum tartarat) ili neke vrste keramike. Keramički materijali, dobijeni sinterovanjem, i pored nekih prednosti, imaju mnogo nestabilniju frekvenciju oscilovanja [1].

U novije vreme javljaju se i MEMS oscilatori koji ne moraju raditi na piezoelektričnom principu. I pored značajnog poboljšanja nekih karakteristika, prvenstveno stabilnosti frekvencije [2], MEMS oscilatori su još uvek daleko od preuzimanja primata kvarcnim oscilatorima, jer imaju i veću cenu i veću potrošnju energije (bitno kod baterijski napajanih sistema). S obzirom na tendencije razvoja u pravcu smanjenja potrošnje i cene, izgleda da će se kvarcni oscilatori koristiti još dugo godina.

II. KVARCNI KRISTALI

Kvarc, koji predstavlja kristalni oblik silicijum dioksida, se najčešće dobija iz površinskih kopova u raznim delovima sveta. Kristali su uglavnom providni i bezbojni, a mogu biti i

Miodrag Malović – Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11120 Beograd (e-mail: ofiss@malovic.in.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-0691-4626>).

Ljiljana Brajović – Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd (e-mail: brajovic@grf.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-2265-7308>).

Tomislav Šekara – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: tomi@etf.rs) (<https://orcid.org/0000-0001-8031-3135>).

u različitim nijansama u zavisnosti od primesa. Prirodni kristali kvarca (Sl. 1a) se mrve, rastvaraju, i ponovo kristališu pod kontrolisanim uslovima. Veštački uzgojeni kristali (veličine u santimetrima) zahtevaju par meseci rasta pod strogo kontrolisanim uslovima (na visokoj temperaturi i pritisku). Komadići kristala pravilnog oblika, veličine tipično nekoliko milimetara, isečeni iz njih na različite, strogo definisane načine koji se nazivaju rezovi (*cuts*), koriste se kao osnove elektronskih oscilatornih kola. U odnosu na RLC kola, kvarcni oscilatori imaju manji koeficijent prigušenja, odnosno manje gubitke, te zahtevaju vrlo malo snage za održavanje oscilacija.



Sl. 1. a) Prirodni kristali kvarca; b) AT rez; električna osa (x) spaja naspramne uglove heksagonalnog preseka, a mehanička (y) je normalna na naspramne površine; svaki kristal ima tri x i tri y ose.

Rezonantne frekvencije kvarcnih kristala su u praksi u većini slučajeva u opsegu od kHz do više stotina MHz. Rezonantna učestanost primarno zavisi od vrste, oblika i veličine kristala (reza), i primenjenih statičkih sila.

Izborom pogodnih oblika kristala dobijaju se oscilatori relativno stabilni u odnosu na temperaturske promene (koje su glavni izvor kratkoročnih fluktuacija frekvencije). Najčešće korišćeni oblik kristala je tzv. AT rez. AT pločice se seku kao isečci pod uglom od $35^{\circ} 15'$ u odnosu na optičku osu, kao na Sl. 1b (x ose se poklapaju).

Osim AT reza, evo kratkog opisa nekih od mnogobrojnih drugih tipova:

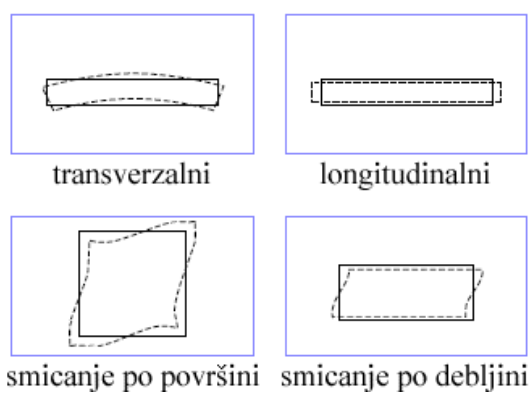
- BT rez: manje temperaturno stabilan ali se za visoke frekvencije lakše proizvodi (jeftiniji je); seče se pod uglom od 49° u odnosu na optičku osu

- SC rez: izvedeno od „stres kompenzacije“; kompleksnijeg procesa proizvodnje, koristi se u temperaturski kompenzovanim oscilatorima, sa većom stabilnošću frekvencije u odnosu na temperaturu i mehaničke uticaje; seče se pod strogo definisanim uglom ne samo u odnosu na optičku ($35^{\circ} 15'$, kao AT), već i na električnu osu ($21^{\circ} 54'$); slični

rezovi se nazivaju dvostruko rotirani rezovi

- XY rez: koristi se za manje frekvencije, tipično za 32768 Hz (popularna kao 2^{15} , tako da se 1 sekunda registruje prenosom 15-bitnog brojača); često korišćeni *tuning fork* kristali (u obliku zvučne viljuške) koriste ovaj tip reza; seče se poprečno ili skoro poprečno u odnosu na optičku osu (u xy ravni)

Geometrija oscilovanja kvarcnog kristala varira. Najčešće imamo pojavu tzv. *thickness-shear* (smicanje po debljini) oscilovanja, što znači da gornja i donja površina pločice osciluju longitudinalno u različitim smerovima, kao što je grafički prikazano na Sl. 2, dole desno. Ovo je uobičajeni režim rada za AT rezove. Sledeći najčešći modovi oscilovanja su: longitudinalni (*length* ili *extensional*) i transverzalni (*flexure*), ekvivalentno poznatim režimima oscilovanja žica i štapova, kao i režim smicanja po površini (*face-shear*). Transverzalne oscilacije su tipične za XY rez.



Sl. 2. Najčešći modovi oscilovanja kvarcnih kristala.

Smicanje po površini je na Sl. 2 prikazano odozgo (za kvadratnu pločicu manje debljine) a ostali modovi sa strane. Ovo su najčešće geometrije, ali postoje varijacije i na ovaj raspored dimenzija. Takođe, postoje i drugi modovi oscilovanja (npr. torzioni), kao i drugi oblici pločica (npr. disk), koji se ređe koriste.

III. MATEMATIČKO OPISIVANJE FLUKTUACIJA FREKVENCIJE

Preciznost i tačnost frekvencije su dva pojma koja treba razlikovati. Greška je razlika između stvarne frekvencije, koju je nemoguće savršeno odrediti, i nominalne (deklarisane) frekvencije. Tačnost je obrnuto proporcionalna greški. Preciznost ili stabilnost oscilatora je inverzna mera varijacije frekvencije. Uređaj može biti tačan ali neprecizan ako mu je srednja frekvencija blizu nominalne ali pokazivanje više varira, ili netačan a precizan ako frekvencija nije dobro podešena ali manje varira u vremenu.

Stabilnost se obično deli na kratkoročnu i dugoročnu, mada je ponekad u upotrebi i izraz srednjoročna stabilnost. Ne postoji striktna vremenska podela na kratkoročne i dugoročne promene frekvencije u smislu apsolutne vrednosti vremena. Kratkoročna stabilnost označava promene u toku vremena reda veličine sekundi ili minuta (u toku jedne sesije rada sa

uređajem, recimo), dok se dugoročna stabilnost odnosi na periode reda veličine meseci ili godina. Često se reč stabilnost koristi isključivo da opiše kratkoročnu preciznost, dok se dugoročne promene opisuju pojmom „starenje“.

Kod starenja, za kvantitativnu meru stabilnosti uzimamo jednostavno relativni odnos apsolutne promene frekvencije i njene početne, krajnje ili nominalne vrednosti (koje su približno jednake, a stabilnost ne zahteva toliko preciznu deklaraciju, pa možemo upotrebiti bilo koju od njih).

Za opisivanje kratkoročne stabilnosti koriste se različite metričke funkcije. Peak-to-peak devijacija predstavlja razliku između maksimalne i minimalne izmerene frekvencije u nekom vremenskom intervalu, i može se izražavati u apsolutnim ili relativnim jedinicama:

$$\Delta f_{p-p} = f_{\max} - f_{\min}$$

$$\delta f_{p-p} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\bar{f}} \quad (1)$$

Standardna devijacija predstavlja koren iz srednjeg kvadrata razlike u odnosu na srednju vrednost (varijanse):

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}{N}} \quad (2)$$

i takođe se često deli sa srednjom vrednošću frekvencije da bi se izrazila u relativnim jedinicama. Ipak, ako se drugačije ne naglasi, u metrologiji se najčešće podrazumeva da se koristi Alanova devijacija:

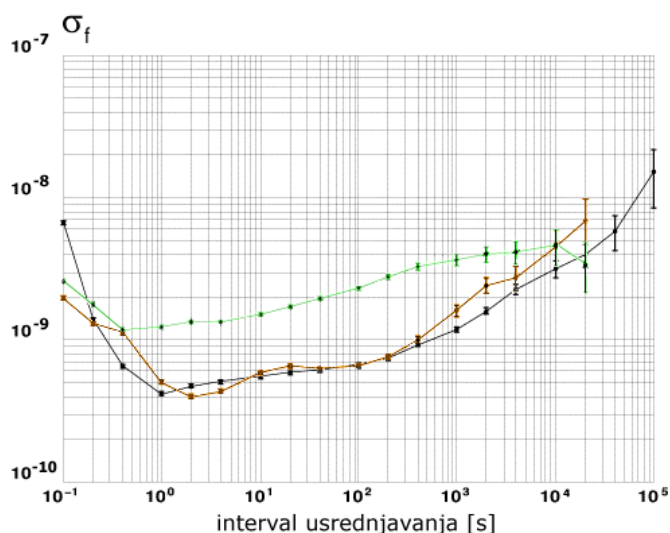
$$\sigma_f(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\bar{f}(t_{i+1}) - \bar{f}(t_i))^2}{2(N-1)}} \quad (3)$$

Alanova devijacija je funkcija vremenskog intervala (koji se najčešće naziva interval usrednjavanja) t , i uzima u obzir usrednjene frekvencije u isključivo susednim intervalima tog trajanja. Da bismo, na primer, odredili Alanovu devijaciju frekvencije za interval usrednjavanja od 1 s, izbrojaćemo impulse u N susednih sekundi (najmanje dve) i podeliti broj impulsa sa vremenom (tj. 1 s; za određivanje protoka vremena koristi se tačniji, etalonski sat) da bismo dobili f_{sr} za svaki period. Zatim određujemo Alanovu devijaciju kao koren iz srednjeg kvadrata razlika isključivo susednih članova, podeljenog sa dva. Bitno je zapaziti da na ovaj način driftovi frekvencije izvan intervala za koji se stabilnost deklariše ne utiču na rezultat, što nije slučaj sa standardnom devijacijom ili peak-to-peak vrednošću. Alanova devijacija se, kao i standardna, često izražava u relativnim jedinicama (podeljena sa srednjom vrednošću).

Renomirani proizvođači određuju stabilnost frekvencije laboratorijski i predstavljaju tipične rezultate kao Alanovu devijaciju u zavisnosti od perioda posmatranja. Radi se o

šumu frekvencije, bez merljive promene spoljašnjih faktora, dakle pod konstantnim laboratorijskim uslovima. Stabilnost se predstavlja na logaritamskom grafiku, najčešće za periode od dela sekunde do 10^4 ili 10^5 sekundi. Stabilnost je slabija za manje intervale, i poboljšava se sa povećanjem perioda posmatranja kao posledica usrednjavanja, do optimalne vrednosti za periode reda veličine 1 s. Sa povećanjem kvaliteta oscilatora, raste i vreme za koje se javlja maksimum stabilnosti (ide i preko 10^4 s kod najkvalitetnijih kontrolisanih oscilatora) [3]. Pri daljem povećanju perioda usrednjavanja, nestabilnosti temperature, napajanja, i dr, preuzimaju dominantni uticaj, pa opet dolazi do (nešto sporijeg) pogoršanja. Za najkvalitetnije kvarcne oscilatore, stabilnost može imati vrednost ekstremuma (numerički minimum, odnosno kvalitativno maksimum) reda veličine i boljeg od 10^{-13} (dok je uobičajeno nekoliko redova veličine lošija), u relativnim jedinicama [4].

Na Sl. 3 je prikazan primer dijagrama vremenske stabilnosti za tri eksperimentalno testirana komada TCXO oscilatora modela HTV2 proizvođača Connor-Winfield [5].



Sl. 3. Eksperimentalno određena stabilnost frekvencije tri komada temperaturni kompenzovanih oscilatora Connor-Winfield HTV2 [5].

IV. IZVORI KRATKOROČNE I DUGOROČNE NESTABILNOSTI FREKVENCije

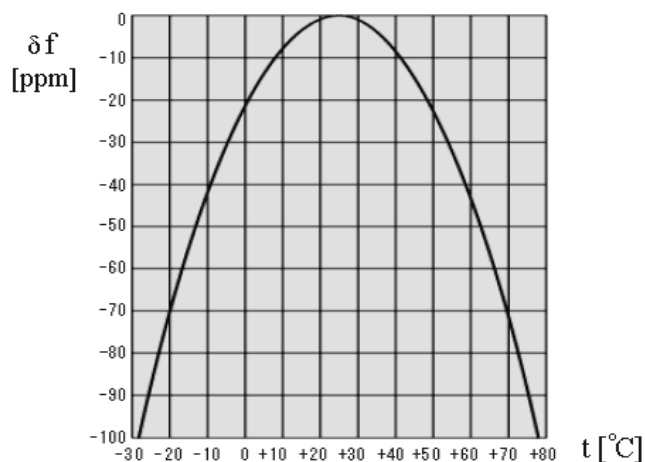
Od kratkoročnih varijacija najčešće su one izazvane promenama temperature, mada i mnogobrojni drugi fizički efekti doprinose stalnim kako skokovitim tako i laganim promenama (driftovima) rezonantne frekvencije [6]. U njih spadaju šokovi (fizički udarci), promena položaja, vibracije, promena napona napajanja, elektromagnetske smetnje, radioaktivnost, itd.

Mnoge od ovih pojava imaju izražen histerzis, a prvenstveno temperatura i napajanje. Pojava skokovite promene frekvencije prilikom gašenja i ponovnog paljenja uređaja se naziva *retrace* efekat. Regularne vibracije, promene položaja, i napona napajanja uglavnom ne proizvode intenzitet relativne promene frekvencije veći od 10^{-9} . Ritrejs ili jači

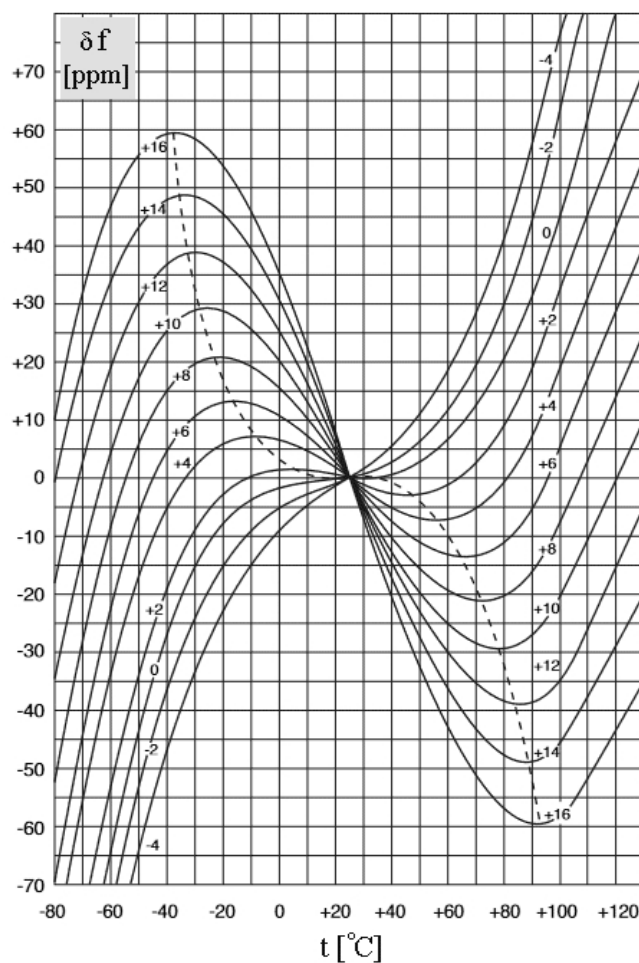
šokovi mogu imati nešto veći efekat, obično oko 10^{-8} [7].

Zavisnost frekvencije od temperature je parabolična sa negativnim koeficijentom (kao na Sl. 4), tj. ima maksimum na željenoj radnoj temperaturi kod većine rezova:

$$f(t) = f_0(1 - k(t - t_0)^2) \quad (4)$$



Sl. 4. Parabolična zavisnost $f(t)$ za BT, XY, i mnoge druge tipove rezova kvarcnog kristala.



Sl. 5. Skup funkcija $f(t)$ za AT tipove kristala sa različitim uglom rezanja.

dok AT i SC tipovi kristala imaju približno kubnu zavisnost rezonantne frekvencije od temperature:

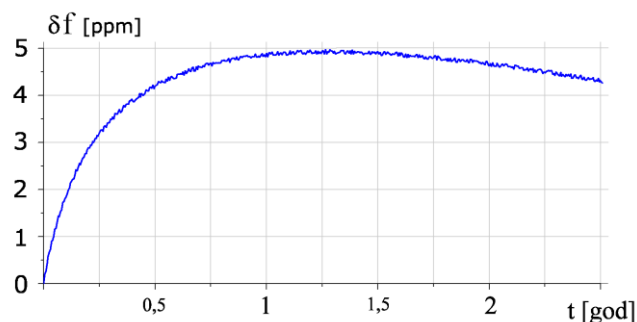
$$f(t) = f_0(1 + k_1(t - t_0) + k_2(t - t_0)^2 + k_3(t - t_0)^3) \quad (5)$$

Središnji deo obe krive obično se nalazi na sobnoj temperaturi ($t_0 \approx 25^\circ\text{C}$), pošto je to ciljna temperatura rada većine kristala, dok je nešto više kod SC rezova ($65\text{--}95^\circ\text{C}$), koji se koriste u kontrolisanim, zagrejanim komorama. Kod uobičajenog AT reza pod optimalnim uglom od oko $35^\circ 15'$, imamo slabu zavisnost od temperature (relativne promene reda veličine ppm, tj. 10^{-6} , za ceo opseg temperatura $0\text{--}50^\circ\text{C}$).

Pri promeni ugla rezanja, vidimo da dolazi do krivljenja funkcije (na Sl. 5 imamo po jednu nacrtanu krivu na svaka 2 minuta promene ugla reza). Tačke lokalnih ekstremuma kubne zavisnosti, koji se javljaju u ovom slučaju, nazivaju se LTTP i UTTP (*lower temperature turning point* odnosno *upper temperature turning point*), i spojene su isprekidanim linijama na slici. Kristali se nekada koriste i u ovom režimu (oko ovih temperatura).

Kod kristala ekonomske klase, varijacije rezonantne frekvencije posmatrane između različitih komada kristala, istog modela, iznose tipično oko 10^{-5} , a retko preko 10^{-4} .

Dugoročne promene frekvencije se odnose na duže periode koji su reda veličine meseci ili godina. Uzrok dugoročnih promena su kretanja molekula primesa unutar kristala, i fizičkih promena oblika samog kristala kao i delova sa kojima je doveden u dodir (postolja). Naravno, kvalitet izrade kristala i oscilatora određuje ove parametre - čistoća kako materijala tako i punjenja kutije oscilatora od inertnog gasa, i kvalitet zaptivanja povećavaju stabilnost frekvencije. Tipična kriva promene frekvencije kvarcnog kristala usled starenja data je na Sl. 6. Eksponencijalna komponenta, dominantna na početku života kristala, uglavnom potiče od promena oblika (tzv. *stress relief* odnosno ublažavanje naprezanja, ili sleganje), dok sporo opadajuća komponenta koja preuzima primat u kasnijim godinama predstavlja efekte kontaminacije (kretanje molekula primesa) [8].



Sl. 6. Tipična promena rezonantne frekvencije kvarcnog kristala usled starenja.

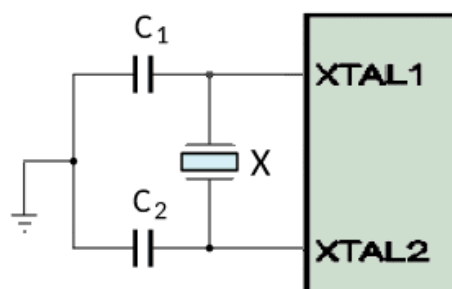
Starenja većine komercijalnih oscilatora su reda veličine 10^{-6} do 10^{-5} na nivou više godina. U literaturi se može sresti i podela starenja na aktivno i pasivno. Pod aktivnim starenjem

se podrazumeva starenje u toku rada, dok je pasivno starenje „na polici“ tj. kada se kristal ne koristi. Moguće je i eksperimentalno ubrzano starenje kristala. Ovo se izvodi aktivno, na većoj temperaturi. Smatra se da rad na 85°C od mesec dana do 1000 sati, ili rad na 105°C nedelju dana, proizvodi efekte starenja kao i regularna operacija na sobnoj temperaturi tokom jedne godine. Ubrzano starenje na temperaturama od $125\text{--}150^\circ\text{C}$ često ispoljava izmene nagiba opadajuće dugoročne komponente, dakle postoje promene u fizici procesa kontaminacije, te se ne može smatrati za tačnu repliku originalnog procesa i ovakva testiranja nemaju veliku vrednost [9].

V. TIPOVI OSCILATORA

Kao što je već rečeno, kvarcni kristali se koriste kao osnovni elementi u oscilatornim kolima (oscilatorima). Oscilatori mogu imati komponente koje služe za stabilizaciju frekvencije, kao i kola za multiplikaciju frekvencije, kojima se osnovna frekvencija kristala povećava ceo broj puta (najčešće 2^n).

Najprostiji tip oscilatora se dobija vezivanjem dva kondenzatora između krajeva kristala i mase, i koristi se za davanje takta mikroprocesorima, kao što je ilustrovano na Sl. 7. Malo kompleksniji modeli poznati su iz analogne i digitalne elektronike, kao što su Kolpicov i Piersov oscilator [10].



Sl. 7. Uobičajeni način vezivanja kvarcnog kristala (X) na CPU - mikroprocesorski oscilator.

Osnovna podela oscilatora je na tri kategorije: RTXO, TCXO i OCXO (gde kovanica XO označava kristalni oscilator), a postoje i druge skraćenice od kojih ćemo neke spomenuti.

Jednostavna kola koja ne vrše nikakvu kompenzaciju temperaturnih promena spadaju u kategoriju RTXO (*room temperature crystal oscillators*). Većina ekonomskih uređaja koriste RTXO kola, ne samo zbog manje cene, već i zbog znatno niže potrošnje energije, što je važan faktor u projektovanju baterijski napajanih uređaja.

TCXO (*temperature compensated crystal oscillators*) sadrže termometre, mere temperaturu, i uvode korekcije da bi se rezonantna frekvencija učinila stabilnijom. Uobičajeni princip rada TCXO je VCXO: *voltage controlled crystal oscillator*. VCXO je nešto širi pojam, koji obuhvata sve kristalne oscilatore čija se frekvencija kontroliše naponom (ne samo one kod kojih je cilj postizanje stabilne frekvencije). Kod TCXO sa VCXO (takođe zvanih i VC-TCXO),

kontroliraju se napon napajanja kristala tako da se kompenzuju promene frekvencije koje potiču od promene temperature (koja se monitoriše). Digitalni TCXO se referenciraju i imenima DCXO - *digitally controlled crystal oscillators* ili MCXO - *microprocessor controlled crystal oscillators*.

Kod OCXO (*oven controlled crystal oscillators*) se kolo grejanjem održava na konstantnoj temperaturi, u kućištu koje predstavlja zatvorenu temperatursku komoru (*oven*), tako da su temperaturski uticaji zanemarljivi. Ovo je još skuplji i energetski zahtevniji tip oscilatora. U ekstremnim slučajevima, koriste se još skuplji, krupniji i snažniji DOCXO (dupli OCXO), koji rade istu stvar u dva koraka - imaju spoljnu i unutrašnju komoru, i umesto standardne stabilnosti frekvencije za OCXO reda veličine 10^{-8} relativno na dnevnom nivou, postižu uobičajenu standardnu stabilnost reda veličine 10^{-11} i bolje [11].

VI. GPS DISCIPLINOVANI OSCILATORI

Kombinovanjem OCXO, a ređe i TCXO, koji ne moraju biti striktno bazirani na kvarcu (mada kvarc jeste jedan od osnovnih tipova kristala koji se koriste), sa GPS prijemnikom, dobijamo u novije vreme popularnu kategoriju GPS disciplinovanih oscilatora (GPSDO) [12].



Sl. 8. GPSDO modul, bez prijemnika, proizvođača Acquisys [14].

GPS (*global positioning system*) servis pruža uslugu takozvanog PPS-a, odnosno *pulse per second*. Iako PPS ne pruža informaciju o fizičkom vremenu (vreme-datumu), on daje pouzdanu informaciju o protoku jedne sekunde, koja se konstantno usklađuje sa referentnim laboratorijama najvišeg nivoa tačnosti na zemlji. Istina je da u prijemu PPS signala postoji značajna neodređenost, uslovljena procesom prenosa signala sa satelita do prijemnika u uređaju (nesavršenosti elektronike transmitera i prijemnika, kao i neodređenost putanje prenosa kroz sredinu promenljivih karakteristika), što čini da je kratkoročna stabilnost PPS frekvencije mala (čak i do 10^{-6}). Međutim, dugoročna stabilnost ovog signala je superiorna u odnosu na sve samostalne oscilatore, i GPS disciplinovani oscilatori (koji predstavljaju kompleksne elektronske uređaje sa sofisticiranim softverom) kombinuju ovu stabilnost sa superiornom kratkoročnom stabilnošću OCXO oscilatora. Procesor monitoriše frekvenciju PPS i OCXO signala, i izvodi neophodne korekcije da bi izlaz oscilatora uskladio sa dugoročno analiziranim PPS signalima. Budući da se radi o softverskoj kontroli, GPSDO lako izlazi

na kraj sa propuštenim PPS signalima. Promene rezonantne frekvencije kristala nastale kao posledica starenja se pamte pa možemo reći da se izvodi kontinualna kalibracija frekvencije.

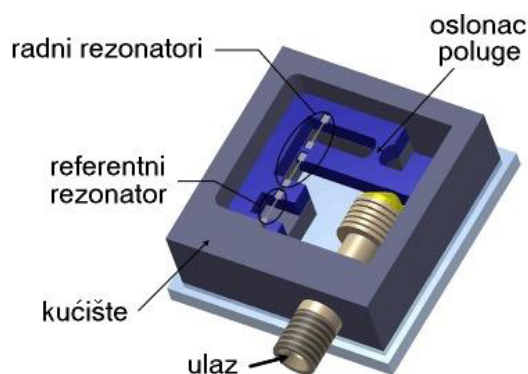
Jedna od mana ove vrste oscilatora (osim očiglednih: veličine, potrošnje i cene, koja je za bolje modele preko hiljadu dolara) je nemogućnost da se radi na mestima gde ne postoji dostupnost GPS signala (bez dodatnog antenskog sistema), a ovaj je poznat po svojoj slaboj prodornosti u zatvorene prostore [13].

Primer GPSDO modula (bez prijemnika), proizvođača Acquisys [14], prikazan je na Sl. 8. Dimenzije modula iznose $10,4 \times 7,0 \times 2,6$ cm.

VII. SENZORI NA BAZI VARIJABILNOSTI FREKVENCije

Promenljivost frekvencije oscilovanja kristala je pojava koju možemo i iskoristiti. Neki senzori rade tako što prate promene rezonantne frekvencije u funkciji posmatrane fizičke veličine. Naravno, kvalitet ovih senzora je limitiran zavisnošću iste frekvencije od drugih faktora. Jedan od metoda koji se koriste za eliminaciju zavisnosti od neželjenih parametara jeste upotreba još jednog, referentnog kvarcnog kristala, koji se izlaže koliko je moguće identičnim uslovima, osim pobude. U ovom slučaju izlaz senzora predstavlja razliku između frekvencija oscilovanja pobuđenog i referentnog kristala.

Jedan od takvih sistema, za merenje pritiska, realizovan je na univerzitetu u Ksi Anu, u Kini [15]. Šema je prikazana na Sl. 9. Ideja je slična Vitstonovom mostu sa poluprovodničkim mernim trakama: dva rezonatora koji se istežu u suprotnim smerovima povećavaju osetljivost, dok treći služi za kompenzaciju temperaturnih i drugih efekata.



Sl. 9. Šema senzora pritiska razvijenog na Univerzitetu u Ksi Anu, Kina [15].

Integrirani senzori ubrzanja na principu promenljive frekvencije kvarcnog rezonatora su u upotrebi od osamdesetih godina prošlog veka, ali su u početku bili višekomponentni, tj. probna masa se sastavljala sa kućištem i kristalom (koji je obično bio tipa DETF - *double ended tuning fork*, odnosno zvučna viljuška spojena na oba kraja). Ovakvi sistemi su termalno nehomogeni, tj. unose grešku po osnovu različitih koeficijenata termalnog širenja različitih materijala od kojih se sastoje. Zato se u novije vreme proizvode tzv. monolitni MEMS senzori koji su u potpunosti izgrađeni od kvarca [16].

QCM - *quartz crystal microbalance*, predstavlja kategoriju merenja koja se zasnivaju na promeni mase kvarcnog kristala, koja uzrokuje promenu rezonantne frekvencije [17]. Dodavanjem slojeva materijala na kvarc, frekvencija oscilovanja se smanjuje. QCM kvarcni kristali, po pravilu oblika okrugle pločice (diska), imaju tanak film kojim su obloženi, a koji menja masu putem interakcije sa sredinom u kojoj se nalazi. Najčešće se vrši detekcija gasova, koji stupaju u hemijsku ili fizičku interakciju sa slojem, koja uzrokuje promenu njegove mase. Naravno, neophodno je da ova interakcija bude reverzibilna. Jedna od čestih primena QCM je merenje vlažnosti (upijanjem molekula vode od strane sloja materijala kao što je grafen).

Merenja viskoznosti tečnosti uranjanjem celog kristala ili, češće, njegovog dela u tečnost poznate gustine takođe se svrstavaju u kategoriju QCM. Teškoća u primeni ovih tehnika je činjenica da dolazi do velike promene u faktoru prigušenja što izaziva dodatnu nestabilnost frekvencije, pa čak i mogućnost prestanka oscilovanja. U novije vreme koriste se senzorski sistemi u kojima se određuju dimenzije kapljica tečnosti koje se zatim spuštaju na površinu kristala čija se frekvencija meri [18]. Istina je da je automatizacija ovakvog procesa teško izvodljiva, ali kontinualna terenska merenja viskoznosti su retko potrebna.

VIII. ZAKLJUČAK

Opisani su kvarcni kristali i oscilatori koji ih koriste kao svoje komponente. Analizirani su faktori koji utiču na promene rezonantne frekvencije, odnosno njene kratkoročne i dugoročne nestabilnosti. Dat je i kratak pregled savremenih senzora koji koriste promene rezonantne frekvencije za merenje različitih fizičkih veličina.

Iako su u novije vreme razvijeni MEMS oscilatori sa boljom stabilnošću frekvencije, mala potrošnja i cena će definitivno uticati na to da kvarcni kristali ostanu osnova većine oscilatornih kola u doglednoj budućnosti.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju za podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovori 451-03-68/2022-14/200287, 451-03-68/2022-14/200092 i projekat TR-33020).

REFERENCE

- [1] K. Uchino, "The development of piezoelectric materials and the new perspective," in *Advanced Piezoelectric Materials*, Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2017, ch. 1, pp. 1-92.
- [2] G. Wu, J. Xu, E. J. Ng, W. Chen, "MEMS resonators for frequency reference and timing applications," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 1137-1166, Sep. 2020.
- [3] W. J. Riley, "Techniques for frequency stability analysis," in Proc. of IEEE international frequency control symposium, Tampa, FL, USA, vol. 4, pp. 10-33, May 2003.
- [4] C. Calosso C, B. Francois, R. Boudot, P. Yun, M. Gozzelino, E. Bertacco E, S. Micalizio, "Local oscillators and digital electronics for compact atomic clocks," in *Microwave Technology and Technique Workshop*, Noordwijk, Netherlands, hal-02472712, Apr. 2017.
- [5] LeapSecond.com :: Museum of Time & Frequency (2003). *Connor-Winfield HTV-series TCXO*, [Online]. <http://www.leapsecond.com/museum/htv2>
- [6] W. J. Riley, "NIST special publication 1065: Handbook of frequency stability analysis," US Dept. Commer., Nat. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD, USA, 2008.
- [7] H. Zhou, C. Nicholls, T. Kunz, H. Schwartz, "Frequency accuracy & stability dependencies of crystal oscillators," Carleton Univ., Ottawa, Canada, Rep. SCE-08-12, 2008.
- [8] J. Cartright, "Aging performance in crystals," Connor-Winfield Corp., Tech. rep., 2008.
- [9] J. R. Vig, T. R. Meeker, "The aging of bulk acoustic wave resonators, filters and oscillators," Proc. of the 45th Annual Symposium on Frequency Control, Los Angeles, CA, USA, pp. 77-101, May 1991.
- [10] H. H. Currie, "The Pierce Oscillator," in *Mixed-Signal Embedded Systems Design*, Cham, Switzerland, Springer, 2021, ch. 13, pp. 599-616.
- [11] A. G. Nikonov, A. V. Kotyukov, A. S. Kamochkin, N. I. Dyakonova, "Recent achievements in performance of low profile ultra precision single oven quartz oscillators," in *IFCS-EFTF 2012: European Frequency and Time Forum*, Gothenburg, Sweden, pp. 279-285, Apr. 2012.
- [12] M. A. Lombardi, "The use of GPS disciplined oscillators as primary frequency standards for calibration and metrology laboratories," *NCSLI Meas.*, vol. 3, no. 3, pp. 56-65, Sep. 2008.
- [13] G. Dedes, A. G. Dempster, "Indoor GPS positioning - challenges and opportunities," in Proc. of IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, Dallas, TX, USA, vol. 1, pp. 412-415, Sep. 2005.
- [14] Acquisys, *GPS Disciplined Oscillator Module*, [Online]. <https://www.acquisys.fr/en/product/gpsdo-2>
- [15] Q. Zhang, C. Li, Y. Zhao, B. Li, C. Han, "A high sensitivity quartz resonant pressure sensor with differential output and self-correction," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 6, 065003, Jun. 2019.
- [16] C. Han, C. Li, Y. Zhao, B. Li "High-Stability Quartz Resonant Accelerometer with Micro-Leverages," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 184-192, Jan. 2021.
- [17] X. Qiao, X. Zhang, Y. Tian, Y. Meng, "Progresses on the theory and application of quartz crystal microbalance," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 3, no. 3, 031106, Sep. 2016.
- [18] Q. Bai Q, X. Huang, "Using quartz crystal microbalance for field measurement of liquid viscosities," *J. Sensors*, vol. 2016, 7580483, Jan. 2016.

ABSTRACT

This paper presents a short review of quartz oscillators frequency stability issues. Quartz crystals are a base building block of majority of oscillator circuits, which are unavoidable part of practically any modern electronic device. The principle of operation, process of production, and classification of crystals were described briefly. Metrics for mathematical description of frequency error and stability were analysed. Phenomena affecting frequency fluctuations were classified by their physical origin and the time scale on which they occur. Several types of sensors employing the effect of frequency variability were also described.

Quartz Oscillators Frequency Stability

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Tomislav Šekara

Natural Polymers As Nanocapsule Carriers

Danijela Rajić, Srđan Vuković, Svetlana Pelemiš, Mileša Srećković

Abstract— Natural polymers obtained from renewable sources have recently been increasingly considered as suitable carriers, in the form of nanocapsules, for various active components. They enable the formation of a system for the delivery of active substances so that it is possible to encapsulate, protect, and release bioactive substances in drugs and food. Encapsulation of active components also enables the protection of sensitive and easily volatile components. Particular attention is paid to their application in the food industry for the production of functional foods, which, in addition to being nutritional, also have a certain therapeutic effect. In the pharmaceutical industry, more and more research is being devoted to them in the area of long-release drugs. Nanocapsules outperform most other colloidal carriers because of their small size, greater encapsulation potential, greater encapsulation power, and targeted action. Most of the existing carriers based on natural proteins used in the food and pharmaceutical industries are hydrophilic, so the encapsulation of hydrophobic active substances is a special challenge. This paper presents an overview of natural polymers used as suitable carriers and the possibilities of their use in the synthesis of nanocapsules for various uses.

Index Terms— natural polymers; renewable sources; nanocapsule carriers; drugs; active components.

I. INTRODUCTION

Natural polymers derived from food are considered desirable materials for constructing delivery systems to encapsulate, protect, and release bioactive components in nutraceuticals, pharmaceuticals and food [1]. Food proteins are of particular interest in the design of delivery systems, due to their high nutritional value, abundant sources, structural versatility and considerable functional properties [2, 3]. Nanoparticles constructed of food proteins have suitable physicochemical properties and functional attributes, which allow them to entrap both hydrophilic and hydrophobic bioactive compounds. They are increasingly being applied as delivery systems in the food industry to improve the stability and oral bioavailability of bioactive components [4]. Nanocapsules have an advantage over most of the other colloidal carriers due to their smaller size, higher encapsulation efficiency, more effective penetration ability and targetability [5]. Nanobiotechnology have wide range of application [6]. Nanocapsules were first developed around

Danijela Rajić is with the Faculty of Technology, University of East Sarajevo, Karakaj 34 A, 75400 Zvornik, Bosnia and Herzegovina (e-mail: danijelarajic@tfzv.ues.rs.ba).

Srđan Vuković is with the Faculty of Technology, University of East Sarajevo, Karakaj 34 A, 75400 Zvornik, Bosnia and Herzegovina (e-mail: srdjan.vukovic@tfzv.ues.rs.ba).

Svetlana Pelemiš is with the Faculty of Technology, University of East Sarajevo, Karakaj 34 A, 75400 Zvornik, Bosnia and Herzegovina (e-mail: svetlana.pelemis@tfzv.ues.rs.ba).

1970. They were initially devised as carrier for vaccines and anticancer. Over the past few decades, there has been considerable interest in developing biodegradable nanocapsules (liposome, virus like particle (VLP), protein, etc.) as effective food and drug delivery device [2].

Nanocapsules have become an important area of research in the field of food and drug delivery vehicles [7]. Scientific community working at the interface of chemistry and biology is always on the lookout for biopolymers from natural and sustainable sources to generate newer structures which could be used for applications ranging from product structuring to the in vivo delivery of bioactives. Since, most of the biopolymers approved and been used for food and pharmaceutical applications (such as gelatin, casein, dextran, etc.) are water soluble in nature; it becomes necessary to involve steps of physical and chemical alterations like cross-linking and hydrophobic modifications in order to generate colloidal particles from these materials [8].

Nanocapsules have an advantage over hydrogels, organogels, liposome, and microparticles due to their smaller particle size, higher encapsulation efficiency, more effective penetration ability and targetability. Nanocapsules are usually fabricated from varieties of natural polymers, mainly including food- grade proteins and polysaccharides, because they are biocompatible, biodegradable, and non-toxic properties, such as soy protein lactoferrin, gelatin, chitosan and alginate [5]. Nanocapsules generally vary in size from 10 to 1000 nm [9,10]. Recently protein nanoparticles have been shown efficacy as biodegradable carrier which can incorporate variety of drugs in relatively non-specific fashion [11]. The food or drug is dissolved, entrapped, encapsulated or attached to a nanoparticles matrix and depending upon the method of preparation, nanoparticles, nanospheres or nanocapsule can be obtained. Nanocapsules are vesicular systems in which the drug is confined to a cavity surrounded by a unique polymer membrane, while nanospheres are matrix systems in which the drug is physically and uniformly dispersed [7,9]. Figure 1 shows the schematic diagram of nanocapsulated and nanosphere particles loaded with food or drug.

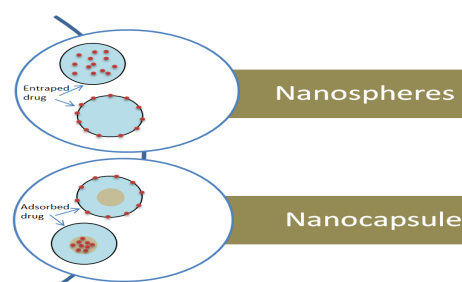


Fig. 1. Schematic diagram of nanospheres and nanocapsules

Among these colloidal system those based on protein may be vary promising since they are biodegradable and non-antigenic relatively easy to prepared and their size distribution can be monitored easily [12]. A wide variety of drugs can be delivered using nanoparticulate carriers via a number of routes. Food-borne diseases are becoming one of the serious problems faced by humans along with environmental contamination and because of that technological innovations in food safety related to consumer confidence and human health are becoming extremely urgent [13].

II. PLANT PROTEINS

Among various natural or synthetic polymer-based particulate systems potentially available to food applications, plant protein-based micro- and nanoparticles are preferably used for nutrient or drug delivery because they offer advantages over other materials in terms of biodegradability, abundant renewable sources, safety status *in vivo*, and many useful functional properties [14-18]. Additionally, they also exhibit high loading capacity of various bioactives due to their amphiphilic structure, multiple binding sites, and a variety of possible binding mechanisms include electrostatic attractions, hydrophobic interactions, hydrogen and covalent bonding. Due to the known characteristics of microencapsulation, easy surface modification and scale-up feasibilities, particulate systems in micron and nanometre scales provide better opportunities for targeted delivery of bioactive ingredients [16, 19, 20]. The plant proteins most commonly used in the production of nanocapsules are zein, soy, and wheat proteins, and they will be discussed in this paper.

A. Zein

Zein is a protein classified within the group of prolamins. It is attractive for use in nanotechnology as a polymer matrix and is classified as Generally Recognized As Safe (GRAS) by the U.S. Food and Drug Administration (FDA). In addition, zein has promising characteristics, such as biocompatibility, biodegradability, and low toxicity. It is widely used in that it can encapsulate generally different insoluble compounds in water to provide stability and control of release when is in the GastroIntestinal Tract (GIT) [14, 21]. Zein is the main form of protein storage contained in the endosperm tissue of corn and comprises almost 80% of the whole protein content in the corn. In the past, zein was considered more of a by-product of corn processing industries; the consensus indicated zein to be a low-valued material without important potential technological uses. However, due to several recent methodologies and developing processes allowing applications in different fields, nowadays, there is new thought related to zein and zein-based materials towards considering them as more valuable materials. Potential applications of zein include uses as biodegradable plastics, fibers, adhesives, coatings, ceramics, inks, cosmetics, textiles and chewing gum [14, 22, 23, 24].

B. Soy proteins

Soy proteins, the by-product of soy oil processing, is now one of the most widely used protein ingredients in food processing. When different processing methods are conducted, soy protein aggregates with different structures and functionalities could be formed along different pathways [25]. In addition to zein, soy protein-based particles are also promising candidates as delivery systems for nutraceuticals or drugs. Due to the ligand binding properties, soy proteins can serve as an effective carrier for various bioactive molecules. They can bind these molecules to form complexes in nanoscale through physical interactions, mainly hydrophobic interactions, hydrogen bonds and van der Waals attraction. Recent studies suggest that soy proteins have the potential to be used as carriers for both hydrophobic and hydrophilic bioactive compounds, such as vitamin B12, cranberry polyphenols, curcumin, resveratrol (RES), and polyphenols from Concord grape pomace, to improve their water solubility, stability and bioavailability [14].

C. Wheat gliadins

Nanocapsules made from gliadin, a component of wheat gluten, have been prepared for nutrient/drug delivery and controlled release applications. For example, gliadin nanocapsules has been used as carriers for all-trans-retinoic acid (RA) [26]. Gliadin nanocapsules (450–475 nm) were showed to be a suitable delivery and controlled release system for nutrients and drugs with different polarity (hydrophobic and amphiphilic). It was found that the amounts of the entrapped drug increased with an increase in the drug hydrophobicity, confirming a strong interaction between gliadins and apolar compounds. Their essential feature is low price and availability [14, 26].

III. PREPARATION METHODS

Protein nanocapsules can be obtained by different methods [11]. Protein nanocapsules have been extensively studied as suitable for drug delivery since they are biodegradable, non-toxic and non antigenic, because of their defined primary structure and high content of charged amino acids (that is, lysine). The protein-based nanocapsules could allow the electrostatic adsorption of positively or negatively charged molecules without the requirements of other compounds. In addition, protein nanocapsules can be easily prepared under soft condition, by coacervation or controlled desolvation processes [2]. Among the available potential colloidal drug carrier systems covering the size range described, protein-based nanocapsules play an important role [11]. Biopolymers, such as proteins, are commonly used to encapsulate oil-in-water emulsions. Simple and complex coacervation, spray drying and heat denaturation represent three major microencapsulation techniques based on proteins. Their principles are quite similar: emulsification of the core material (oil) is followed by microcapsules wall formation induced by environmental conditions changing. Concerning simple coacervation method, the protein precipitation around

oil droplets is obtained by changing pH and temperature or by the “salting-out” technique. Widespread presence of microcapsules based on animal proteins such as gelatin, casein or albumin contrasts with a very limited use of plant proteins. Wheat gliadin was one of the rare plant storage proteins used for encapsulation of dispersed oil phase by simple coacervation method. The microparticles made from soy protein isolate (SPI) were mainly fabricated by using spray-drying, coacervation, and cold gelation techniques [11, 14, 27]. The table 1 provides an overview of nanoparticle types and methods of their preparation.

TABLE I
OVERVIEW OF PLANT-PROTEIN BASED NANOCAPSULES AND TYPE OF PREPARATION [14]

Type of particles	Preparation
Zein microparticles	Spray drying or supercritical antisolvent method
Zein microparticles	Spray or freeze drying
Zein nanoparticles	Liquid-liquid dispersion method
Zein nanoparticles	Phase separation or liquid-liquid dispersion method
Zein nanoparticles	Liquid-liquid dispersion method or electrospraying
Zein nanoparticles	Supercritical anti-solvent
Zein nanoparticles	Liquid-liquid dispersion method or electrospraying
Zein-chitosan complex nanoparticles	Low-energy phase separation method
SPI-zein complex microparticles	Ca ²⁺ -induced cold gelation method
SPI/FA-conjugated SPI nanoparticles	Ethanol desolvation method
SPI nanoparticles	Ca ²⁺ -induced cold gelation method
Soy protein nanocomplex	Ligand binding properties
SPI-CMCS complex nanoparticles	Ca ²⁺ induced co-gelation method
Soy protein-soy polysaccharide complex nanogels	High-pressure homogenization and heating procedures
Soy lipophilic protein nanoparticles	Ultrasonic treatment
Gliadin nanoparticles	Antisolvent precipitation method

IV. CONCLUSION

Natural polymers show great potential for developing promising delivery vehicles to incorporate and protect various bioactive ingredients, and control their release behaviour under the different conditions. It could be used to produce a wide range of delivery systems, such as micro- and nanoparticles, fibers, films and hydrogels, all of which can be tailored for the design of innovative functional foods. As the interest in functional foods is rapidly growing, the development of advanced plant protein-based delivery systems will expand the possible applications. Nanocapsules outperform most other colloidal carriers because of their small size, greater encapsulation potential, greater encapsulation power, and targeted action. Nevertheless, the delivery of functional ingredients in the complex food systems is rather challenging as it is essential to evaluate not only the impact of complex food matrix on the storage stability and bioavailability of the encapsulated ingredients, but also the effect of the delivery systems on the food product functionality, such as stability, texture, taste, appearance and bioavailability of the ingredients.

The work also has a wide application from forensics to herritology.

REFERENCES

- [1] J. Xue, Y. Zhang, G. Huang, J. Liu, M. Slavin, L. Yu, „Fabrication and Characterization of Zein Composite Particles Coated by Caseinate-Pectin Electrostatic Complexes with Improved Structural Stability in Acidic Aqueous Environments“, *Food Hydrocoll.* Vol. 83, no. 25 (2018). <https://doi.org/10.3390/molecules24142535>
- [2] M. Rahimnejad, N. Mokhtarian, M. Ghasemi, „Production of protein nanoparticles for food and drug delivery system“ *African Journal of Biotechnology*, vol. 8, no. 19, 4738-4743(2009).
- [3] Z. L. Wan, J. Guo, X. Q. Yang, „Plant protein-based delivery systems for bioactive ingredients in foods“, *Food Funct.* vol. 6 (2015). <https://doi.org/10.1039/c5fo00050e>
- [4] C. Yang, Y. Wang, L. Lu, L. Unsworth, L. L. Guan, L. Chen, L. „Oat protein-shellac beads: Superior protection and delivery carriers for sensitive bioactive compounds“, *Food Hydrocolloids*, vol. 77, pp. 754–763, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.017>
- [5] S. Chen, C. Xu, L. Mao, F. Liu, C. Sun, L. Dai, Y. Gao, „Fabrication and characterization of binary composite nanoparticles between zein and shellac by anti-solvent co-precipitation“. *Food and Bioproducts Processing*, vol. 107, pp. 88–96,(2018).
- [6] A. Rieux, F. Virginie, M. Garinot, Y. Schneider, V. Preat, „Nanoparticles as potential oral delivery systems of proteins and vaccines: A mechanistic approach“, *J. Control. Release*, vol. 116, pp. 1-27, (2006).
- [7] M. L. Hans, A. M. Lowman, „Biodegradable nanoparticles for drug delivery and targeting“, *Curr. Opin. Solid State Materials Sci*, vol. 6, pp. 319- 327,(2002).
- [8] A. R. Patel, K. P. Velikov, „Zein as a source of functional colloidal nano- and microstructures“, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 19, no. 5, pp. 450–458, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.08.001>
- [9] S. Kumaresh, T. M. Aminabhavi, A. R. Kulkarni, W. E. Rudzinski, „Biodegradable polymeric nanoparticles as drug delivery devices“, *J. Control Rel.*, vol. 70, pp.1-20, (2001).
- [10] P. Couvreur, R. Gref, K. Andrieux, C. Malvy, „Nanotechnologies for drug delivery: Application to cancer and autoimmune diseases“, *Progress Solid State Chem.* vol. 34, pp. 231-235, (2006).
- [11] M. Rahimnejad, M. Jahanshahi, G. D. Najafpour, „Production of biological nanoparticles from bovine serum albumin for drug delivery“, *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 5, no. 20, pp.1918-1923,(2006).

- [12] C. Weber, C. Coester, J. Kreuter, K. Langer, „Desolvation process and surface characterisation of protein nanoparticles“, *International Journal of Pharmaceutics*, vol.194, no.1, pp. 91–102, (2000). [https://doi.org/10.1016/s0378-5173\(99\)00370-1](https://doi.org/10.1016/s0378-5173(99)00370-1)
- [13] Y. Cao, T. T. Chen, W. Wang, M. Chen, H. J. Wang, „Construction and functional assessment of zein thin film incorporating spindle-like ZnO crystals“, *RSC Advances*, vol. 7, no. 4, pp. 2180–2185, (2017). <https://doi.org/10.1039/c6ra25290g>
- [14] Z. L. Wan, J. Guo, X. Q. Yang, „Plant protein-based delivery systems for bioactive ingredients in foods“, *Food Funct.* vol. 6, (2015). <https://doi.org/10.1039/c5fo00050e>
- [15] L. Chen, G. E. Remondetto, M. Subirade, „Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems“, *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 17., pp. 272-283, (2006).
- [16] N. Reddy, Y. Yang, „Potential of plant proteins for medical applications“, *Trends Biotechnol.*, vol. 29, pp. 490-498, (2011).
- [17] A. O. Elzoghby, W. M. Samy, N. A. Elgindy, „Protein-based nanocarriers as promising drug and gene delivery systems“, *J. Controlled Release*, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.04.036>
- [18] A. O. Elzoghby, W. M. Samy and N. A. Elgindy, „Albumin-based nanoparticles as potential controlled release drug delivery systems“, *J. Controlled Release*, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.07.031>
- [19] I. J. Joye and D. J. McClements, „Biopolymer-based nanoparticles and microparticles: Fabrication, characterization, and application“, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 19, pp. 417–427, (2014).
- [20] L. Brannon-Peppas, „Recent advances on the use of biodegradable microparticles and nanoparticles in controlled drug delivery“, *Int. J. Pharm.*, vol. 116, pp. 1-9. (1995).
- [21] H. Chen, Q. Zhong, „A novel method of preparing stable zein nanoparticle dispersions for encapsulation of peppermint oil“, *Food Hydrocolloids*, vol. 43, pp. 593–602. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.018>
- [22] L. Wang, Y. Zhang, „Heat-induced self-assembly of zein nanoparticles: Fabrication, stabilization and potential application as oral drug delivery“, *Food Hydrocoll.* vol. 90, oo. 403-412, (2019).
- [23] Y. C. Luo, Q. Wang, „Zein-based micro- and nano-particles for drug and nutrient delivery: A review“, *J. Appl. Polym. Sci.* vol. 131, (2014).
- [24] D. Rajić, L. Spasojević, V. Gojković Cvjetković, S. Bučko, J. Fraj, J. Milinković Budinčić, L. Petrović, B. Pilić, A. Sharipova, A. Babayev, S. Aidarova, J. Katona, „Zein–resin composite nanoparticles with coencapsulated carvacrol“, *Journal of Food Processing and Preservation*, e15741, (2021). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15741>
- [25] J. Guo, X. Q. Yang, X. T. He, N. N. Wu, J. M. Wang, W. Gu, Y. Y. Zhang, „Limited Aggregation Behavior of β -Conglycinin and Its Terminating Effect on Glycinin Aggregation during Heating at pH 7.0“, *J. Agric. Food Chem.*, vol. 60, pp. 3782-3791, (2012).
- [26] I. Ezpeleta, J. M. Irache, S. Stainmesse, C. Chabenat, J. Gueguen, Y. Popineau, A. M. Orecchioni, „Formation of gliadin nanoparticles: Influence of the solubility parameter of the protein solvent“, *Int. J. Pharm.*, vol. 131, pp.191-200, (1996).
- [27] A. Nesterenko, I. Alric, F. Silvestre and V. Durrieu, „Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness“, *Ind. Crops Prod.*, vol. 42, pp. 469-479, (2013).

Kvantne generativne suparničke mreže za generisanje naučnih rezultata

Vladimir Arsoski

Apstrakt—Već dugi niz godina smo svedoci da je veliki broj publikacija efikasno sredstvo za priznavanje izuzetne kompetentnosti i talenta u nauci, što može omogućiti pojedincu veliku moralnu i finansijsku satisfakciju. Čuvena fraza u akademskim krugovima “objavi ili nestani” postaje surova realnost. U želji da objave senzacionalna otkrića, pojedinci pokušavaju da lažiraju naučne rezultate, kako bi stvorili privid izuzetnosti. Savremeni programi za analizu slika, zasnovani na veštačkoj inteligenciji, su se pokazali kao efikasno sredstvo za razotkrivanje lažiranih prikaza naučnih rezultata i doveli su do povlačenja velikog broja sumljivih publikacija iz časopisa u poslednjih nekoliko godina. Novi algoritmi veštačke inteligencije zasnovani na generativnim suparničim mrežama pružaju mogućnost za generisanje slika koje mogu biti klasifikovane kao verodostojne. Implementacija ovih algoritama na kvantnim računarima se pokazala kao potencijalno superioran metod generacije slika, te predstavlja realnu opasnost da slučajevi lažiranja naučnih rezultata ostanu neprimećeni. Ovo nameće potrebu da se u bliskoj budućnosti razvije disciplina koja bi se mogla opisati kao forenzika naučnih rezultata i koja bi se bavila razotkrivanjem primena ne samo klasičnih, već i kvantnih algoritama za generisanje rezultata.

Ključne reči — generativne suparničke mreže; veštačka inteligencija; kvantni računari.

I. UVOD

Proces publikovanja naučnih radova u časopisima je započeo sredinom 17. veka kada je na inicijativu Henry Oldenburg-a, prvog sekretara Kraljevskog društva, pokrenut prvi naučni časopis *Philosophical Transactions of Royal Society* [1]. Pre toga su naučnici razmenjivali ideje i rezultate na naučnim skupovima i putem privatnih korespondencija, što je ograničavalo pristup najnovijim saznanjima široj populaciji. Koncept publikovanja radova u časopisima zasnivao se na ideji diseminacije i verifikacije novih ideja, saznanja i rezultata u cilju progresa nauke. Vremenom je razvijena metodologija bavljenja naučnim radom, koja je standardizovala i formalizovala istraživačke metode, kao i način prezentacije naučnih radova i zacrtala osnovna moralna načela, koja su vezana za akademski integritet i čestitost.

Od početka devetnaestog veka, mnogi poznati univerziteti u Evropi su počeli da pridaju podjednak značaj podučavanju i naučnom radu [1]. U poslednje vreme, rasprostranjeno je mišljenje da naučni rad ima mnogo veći značaj od nastavnog

rada. Mnogi univerziteti vrše selekciju kandidata na osnovu broja publikacija, što može da usmeri nastavnike i saradnike da se intenzivno bave naučnim radom zapostavljajući nastavne delatnosti i mentorski rad. Neretko se dešava da nastavnici organizuju intenzivne prezentacije svojih naučnih dostignuća, čak i na predavanjima, kako bi privukli što veći broj potencijalnih kandidata za bavljenje naučnim radom u nadi da će povećati produktivnost publikovanja. Pritom, zbog sopstvenog angažovanja u nastavi i naučnom radu, često nemaju vremena da se dovoljno posvete mentorskom radu. Dešava se da mladi istraživači iz neznanja proizvode nedovoljno kvalitetne radove, sa pogrešnim ili modifikovanim rezultatima i bez citiranja korišćenih referenci.

Povećanje produkcije radova na godišnjem nivou dovodi do porasta broja naučnih časopisa [2]. U poslednja tri veka, rast broja aktivnih naučnih časopisa godišnje u procentima je približno konstantan i varira oko srednje vrednosti 3.46 %, što odgovara udvostručenju broja časopisa na svakih 20 godina [3]. Poslednjih godina, ovaj trend se povećava, te smo svedoci skoro svakodnevnih pojava raznih časopisa čiji je naziv povezan sa oblašću, koja je u žiži naučnog interesovanja. Većina časopisa proverava originalnost, kvalitet prezentacije i značaj razmatrane problematike, tako što vrši selekciju radova pomoću ocenjivanja od strane dva ili više stručnjaka iz oblasti rada (engl. peer-reviewed). Iako se naučna zajednica i broj znalaca u većini oblasti rapidno povećava, postavlja se pitanje njihove raspoloživosti za recenziju rada, što je često vezano za veliko angažovanje samog recenzenta na produkciji radova. Velikom broju naučnih radnika se dešavalo da rad bude predložen za publikaciju ili bude odbijen bez detaljnijeg i konkretnog objašnjenja od strane recenzenta.

Sve veća ulaganja u istraživanja i nauku, kao i velika konkurencija istraživačkih grupa, dovela je poslednjih godina do pojave slučajeva tendencioznih prevara pri akviziciji i prezentovanju naučnih rezultata. U praksi su postale standardne prevare poput *plagijarizma* (prisivajanje tuđih naučnih rezultata), *autoplajijarizma* (objavlivanje istih rezultata u više naučnih časopisa), “*seckanja salame*” (prezentacija jednog naučnog dostignuća kroz seriju radova pod izgovorom obimnosti problematike), “*autora duhova*” (dodavanje na rad autora koji nisu dali značajan doprinos radu) i raznih drugih neetičkih radnji [4].

Statistika je pokazala da samo oko 45 % radova objavljenih u vrhunskim naučnim časopisima iz oblasti biomedicine imaju citate u prvih 5 godina, a od tog broja 5-25% su autocitati i/ili kocitati [4]. Posebno neetički aspekt prevara odnosi se na časopise iz ove oblasti, gde dolazi do obmanjivanja naučno-stručne javnosti, a posredno i pacijenata, o mogućem brzom i

Vladimir Arsoski – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: vladimir.arsoski@etf.bg.ac.rs).

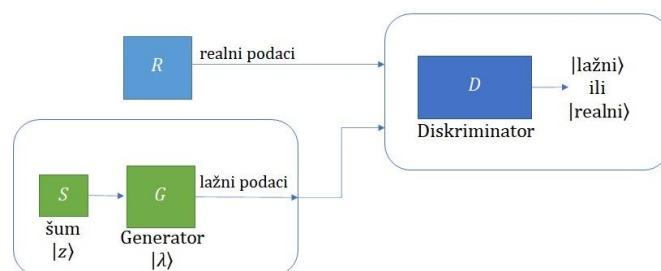
efikasnom izlečenju. Falsifikovanje naučnih rezultata obično je vezano za mikroskopski prikaz slika biomaterijala, ćelija i tkiva [5] ili za grafički prikaz “rezultata merenja” [6]. Neki od ovih radova su dostupni u bazi matičnog časopisa [5], dok na drugima stoji oznaka da su povučeni [6]. Ovi [5,6] i slični slučajevi “dorade” naučnih rezultata, otkriveni su primenom savremenih metoda i programa za analizu slike zasnovanih na veštačkoj inteligenciji. Neka softverska rešenja su besplatno dostupna na internetu, poput *Forensically* [7]. Postoje organizacije koje prate i javno objavljuju podatke o povučenim radovima [8] jer se često dešava da časopisi, zbog čuvanja reputacije, netransparentno uklone rad iz svoje baze podataka. Prema podacima sa sajta [8], do trenutka pisanja ovog rada, povučeno je čak 219 naučnih radova vezanih za COVID-19 pandemiju.

Dosada otkrivene prevare, vezane za objavljivanje lažiranih naučnih rezultata, uglavnom su se zasnivale na korišćenju softvera za obradu slike, gde su nedoslednosti u vidu kloniranja delova slika, nepravilnog gradijenta boje, osvetljenja, šuma i defekata na slici, mogli da budu detektovani pomoću metoda zasnovanih na mašinskom učenju [7]. U skorije vreme su se pojavili generativni modeli mašinskog učenja, poput varijacionog autoenkodera (VAE) koji predstavlja veštačku neuralnu mrežu koja pripada familiji probablističkih grafičkih modela [9]. Ovaj model formuliše problem statističkog zaključivanja (na osnovu slučajne veličine zaključak je druga slučajna veličina), kao statistički problem optimizacije. VAE je usmeren model, trening (obučavanje) se može obaviti primenom modela zasnovanih na gradijentu i lako se može generalizovati za rešavanje raznih problema [10]. VAE model, vezan za generisanje slika, uspešno je implementiran u programskom paketu *Keras* pod programskim jezikom *Python*. Nedostatak VAE ogleda se u inherentnoj osobini, koja leži u samoj postavci modela, da produkuje relativno “zamućen” izlaz (engl. blur), kada je reč o treniranju za generaciju slika [10], što softver za forenziku može označiti kao mogući problem.

Potencijalno superioran model generativne mreže je generativna suparnička mreža (engl. Generative Adversarial Network - GAN), koja se zasniva na teorijskom scenariju takmičenja između mreže koja generiše uzorke (*generatora*) i mreže *diskriminatora*, koja pokušava da napravi razliku između realnih podataka iz skupa za trening i generisanih podataka [11]. Najbolje performanse modela se postižu za scenario u kojem generator pokušava da poveća vrednost logaritma verovatnoće da diskriminator pogreši, umesto da smanjuje vrednost logaritma verovatnoće da diskriminator da tačan odgovor [10,11]. Kada se trening završi, diskriminator sa podjednakom verovatnoćom klasifikuje generisane slike kao prave ili pogrešne i može da se apstrahuje. Na ovaj način, generator je naučen da prevari sistem veštačke inteligencije. Demonstrirano je da duboke konvolucione GAN mogu da generišu izuzetno verodostojne slike [12], što ih čini potencijalno opasnim za generisanje slika u naučnim publikacijama koje može da prođe nezapaženo.

Razvoj kvantnih računara obećava veliki napredak u oblasti hemije, biomedicine, rešavanja kompleksnih matematičkih i

fizičkih problema, kao i implementacije naprednih sistema veštačke inteligencije. Efekti inherentni za kvantnu mehaniku, poput superpozicije, interferencije i kvantne zapletenosti (engl. entanglement), mogu dovesti do veće efikasnosti kvantnih algoritama u odnosu na klasične [13]. Za razliku od kvantnog sistema, koji je po prirodi probablistički, klasični sistemi ne mogu efikasno generisati slučajne veličine (već se govori o pseudo-slučajnim veličinama). Zbog toga su kvantni sistemi, koji su vezani za stohastičke algoritme, značajno jednostavniji i ujedno efikasniji od klasičnih probablističkih. Takođe je poznato da je za predstavljanje vektora u N -dimenzionom prostoru potrebno $\log_2 N$ kubita, kao i da je vreme manipulacije kvantnog sistema nad retkim matricama složenosti u vremenu reda $O(\text{poly}(\log_2 N))$ [13]. Sve ovo dovodi do potencijalne prednosti kvantnih u odnosu na klasične algoritme, pogotovu kada je reč o visokodimenzionim prostorima i stohastičkim procesima. Uprkos činjenici da je kvantni hardver u svom ranom pivoju i da su trenutne implementacije podložne dekoherenciji, spoljašnjem šumu i imaju ograničene mogućnosti povezivanja kubita, postoje indikacije da će kvantno mašinsko učenje biti jedna od prvih značajnih primena na kvantnom hardveru. Veliki broj algoritama mašinskog učenja je već adaptiran za rad na kvantnom računaru [14], a od skora i GAN pod nazivima QGAN i QuGAN [15,16]. QGAN je, između ostalog, našao primene vezane za generisanje realističnih raspodela [17,18] i slika [19], gde je demonstrirao jednostavniju implementaciju i eksponencijalno ubrzanje u odnosu na klasičnu GAN.



Sl. 1. Šematski prikaz kvantne generativne suparničke mreže. Ulazni podaci za diskriminator D su kvantna stanja iz generatora G (čiji ulaz pobuđuje stohastički vektor $|z\rangle$) ili iz realnog izvora podataka R . Izlaz diskriminatora je kvantno stanje $|lažni\rangle$ ili $|realni\rangle$ i odnosi se na procenu porekla ulaznog podatka. Slika je adaptirana na osnovu rada [15].

II. MODEL KVANTNE GENERATIVNE SUPARNIČKE MREŽE

Šematski prikaz kvantne generativne suparničke mreže je dat na Sl. 1. R predstavlja izvor realnih podataka koji za zadatu kvantnu labelu $|\lambda\rangle$ generiše realne podatke. Svrha QGAN-a je da definiše generator G koji imitira izvor realnih podataka R . G predstavlja varijaciono kvantno kolo, čiji su gejtovi parametrizovani vektorom θ_G . Na osnovu stanja $|\lambda\rangle$ i dodatnog stohastičkog stanja $|z\rangle$ generator produkuje stanje na svom izlazu koje treba da bude slično stanju koje daje R . U

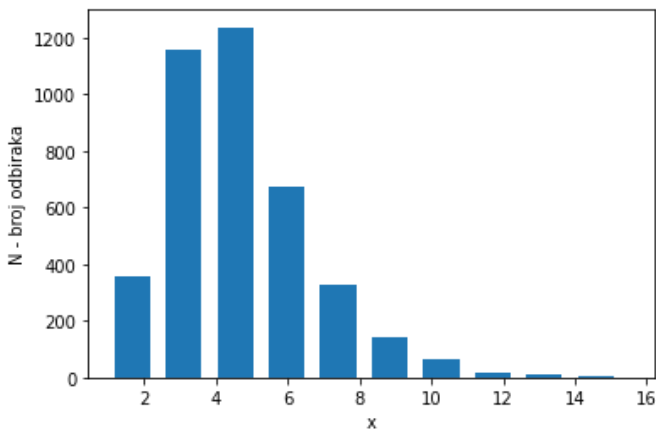
opštem slučaju, dodatno stanje $|z\rangle$ je stohastičko i ponaša se kao nestruktuirani šum koji dovodi do porasta entropije raspodele generisanih podataka, te se za jednu istu labelu $|\lambda\rangle$, može generisati više izlaznih stanja. Podaci za obučavanje generatora se dobijaju od diskriminatora koji predstavlja kvantno kolo parametrizovano vektorom θ_D . Uloga diskriminatora je da proceni da li ulazno stanje potiče od realnog izvora ili generatora, dok je uloga generatora da “prevari” diskriminator, tako da podatke koji su generisani označi kao realne. Cilj optimizacije QGAN obučavanja je da se definišu parametri diskriminatora koji će da maksimizuju verovatnoću da je diskriminator pravilno označio ulazni vektor, a ujedno i parametri generatora koji minimizuju ovu verovatnoću. Za nominalno prebrojivu vrednost Λ , labela $|\lambda\rangle$, ovaj problem se formalno definiše izrazom [15]:

$$\min_{\theta_G} \max_{\theta_D} \frac{1}{\Lambda} \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} P\{[(D(\theta_D, |\lambda\rangle), R(|\lambda\rangle)) = |\text{realni}\rangle] \cap [(D(\theta_D, |\lambda\rangle), G(\theta_G, |\lambda, z\rangle)) = |\text{lažni}\rangle]\}. \quad (1)$$

U iterativnom postupku se određuju parametri kvantnih kola, tako da generator može što uspešnije da prevari diskriminator [15].

III. REZULTATI I DISKUSIJA

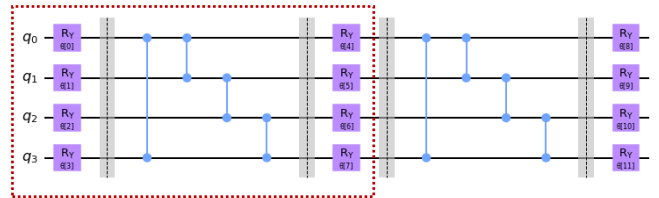
Za implementaciju modela je korišćena biblioteka *Qiskit* [20], koja radi pod programskim jezikom *Python* u virtuelnom okruženju *Anaconda*. Realizovana je QGAN za generisanje log-normalne raspodele, koja se može sresti u biomedicinskim primenama. Primer jedne realne raspodele je dat na Sl. 2. Realizacija QGAN-a na samo 2 kubita pomoću jednostavne kvantne mreže korišćene za realizaciju kvantnog generatora postoji kao primer u tutorialima *Qiskit*-a [21].



Sl. 2. Prikaz histograma za jedan vektor realnih podataka. Za korišćeni sintetički skup od 4000 ulaznih podataka je fitovanjem dobijeno da podleže log-normalnoj raspodeli sa srednjom vrednošću $\mu=1.5$ i standardnim odstupanjem $\sigma=0.4$.

A. Pretpostavka kvantnog kola

Za realizaciju osnovnog sloja kvantnog kola generatora je usvojena *pretpostavka* (engl/nem. *ansatz*) definisana na 4 kubita. Ponavljanjem ovog bloka se postiže veća efikasnost obavljanja zadatka od strane kvantnog kola, ali se produžava vreme obučavanja usled povećanja dubine kvantne mreže. Svaki blok se sastoji od parametrizovanih jednokubitnih R_y operacija primenjenih na svaki kubit i dvokubitnih C_z operacija, kojima se ostvaruje međusobno *kvantno sprezanje* (engl. *quantum entanglement*) svih susednih stanja kubita. Poslednji kubit je dodatno spregnut sa prvim kubitom. Ovakvo povezivanje je vezano za pojam kružnog umrežavanja. Za implementaciju kvantne mreže je korišćena ugrađena biblioteka *TwoLocal*, gde je atribut željenog spreznja *entanglement* = "circular", dok je parameter ponavljanja *rep* uzimao vrednosti 1 ili 2. U ovakvoj konfiguraciji, kvantna mreža ima samo 8 i 12 varijabilnih parametara, za mrežu formiranu od jednog i dva osnovna bloka, redom. Varijabilni parametri se podešavaju pri obučavanju mreže. Šema pretpostavke kola generatora je data na Sl. 3.



Sl. 3. Šema pretpostavke (engl/nem. *ansatz*) kvantnog kola generatora. Osnovni blok/sloj je uokviren crvenom isprekidanom linijom.

Diskriminator je implementiran pozivanjem funkcije *NumpyDiscriminator* i predstavlja klasičnu neuralnu mrežu sa 3 *sloja* (engl. *layer*), koja koristi *Leaky ReLU* aktivaciju u *skrivenom sloju* (engl. *hidden layer*) i aktivaciju sigmoid funkcijom u izlaznom sloju. Na ovaj način ćemo ustanoviti uslove, pri kojima bi kvantni generator “prevario” klasični diskriminator, koji je zadužen za testiranje prezentovanih rezultata. Za optimizaciju varijabilnih parametara generatora i diskriminatora je korišćen predefinisani *Adam* algoritam [22], koji predstavlja metodu za stohastičku optimizaciju.

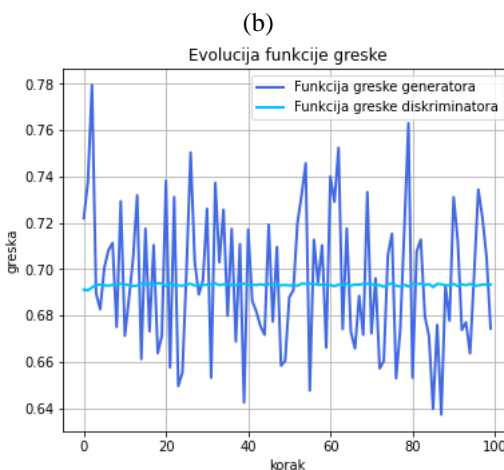
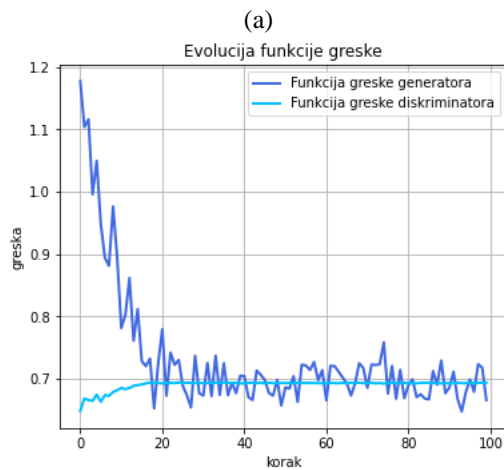
B. Obučavanje mreže

Obučavanje je najpre testirano na simulatoru raspoloživom u programskom paketu *Qiskit*. Trening mreže je obavljen korišćenjem 100 *uzoraka* u *svakoj iteraciji* (engl. *batch size*). Najpre je korišćeno kvantno kolo sa samo jednim blokom (oblast uokvirena isprekidanom linijom na Sl. 3) koji ima samo 8 varijabilnih parametara i računata je lokalna *funkcija greške* (engl. *cost/loss function*). Parametri mreže su inicirani na pseudo-slučajan način. Broj *prolaza kroz trening skup* (engl. *epoch*) je bio 100 puta. Zatim je dodat još jedan blok, tako da je dobijeno finalno kvantno kolo prikazano na Sl. 3. Dobijene vrednosti varijabilnih parametara (zaokružene na 2 značajne cifre) za deo kvantnog kola koji je prethodno treniran su uzeti kao inicijalni, dok su parametri za blok koji

je dodat izabrani nasumično. Postepeno građenje finalne pretpostavke kvantnog kola je urađeno kako bi se pri obučavanju izbegla pojava *ravnih platoa* (engl. *barren plateaus*) funkcije greške [23-25]. Pri rešavanju problem vezanog za prepoznavanje rukom pisanih brojeva (MNIST dataset) [26], ovaj pristup je pokazao i značajno manju grešku generalizacije u odnosu na standardne šeme obučavanja, koje se primenjuju na celu mrežu [25]. Trening je urađen u 100 prolaza sa 100 uzoraka u svakom trening skupu. Dobijeni su vektori varijabilnih parametara za mreže generatora sastavljene od jednog i dva osnovna gradivna bloka, redom:

(a) $\theta_G = [5.3857293, 4.28779218, 4.24118702, 0.51582692, 2.21546187, 1.08074945, 4.08073098, 4.46537089]$.

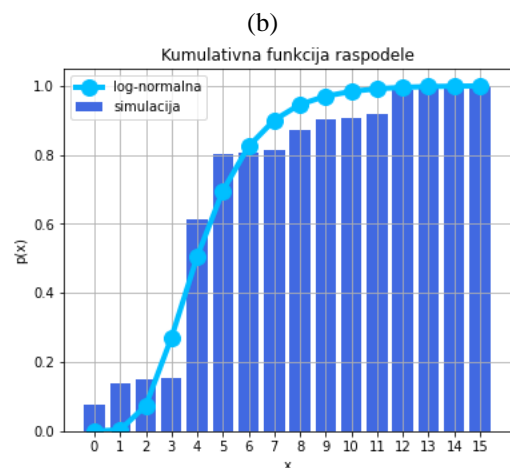
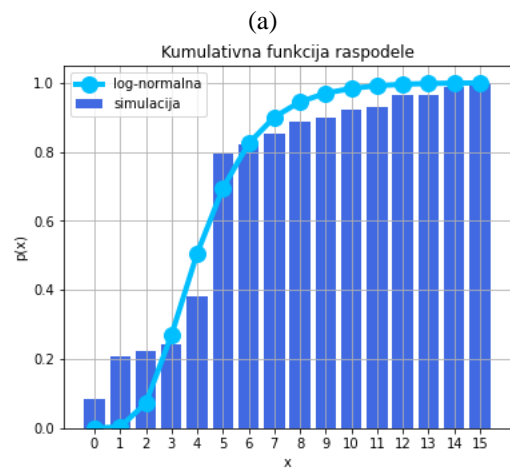
(b) $\theta_G = [4.13100272, 0.63322951, 5.16027858, 2.0964577, 4.03147984, 4.69264686, 5.54824841, 5.96373602, 1.69386018, 4.81546402, 1.1501217, 3.24610254]$.



Sl. 4. Evolucija funkcije greške (engl. cost/loss function) diskriminatora (svetlo plava linija) i kvantne mreže generatora (tamno plava linija), sastavljene od (a) jednog i (b) dva osnovna gradivna bloka.

Da bi analizirali tok obučavanja mreže, treba razmotriti

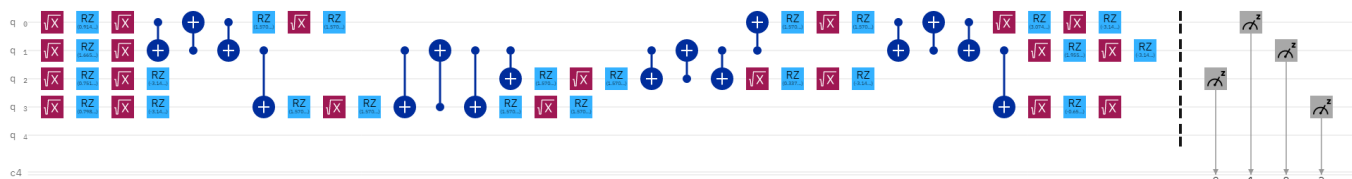
promenu funkcije greške u toku treninga. Evolucija funkcije greške u funkciji rednog broja koraka za mrežu sastavljenu od jednog i dva osnovna bloka je prikazana na Sl. 4 (a) i (b), redom. Za mrežu sastavljenu od jednog osnovnog bloka, vrednosti greške generatora i diskriminatora postaju uporedive posle dvadesetak koraka obučavanja. Pritom, razlika je najveća na početku treninga, što je očekivano, jer su parametri mreže inicirani na pseudo-slučajan način i mreža, inicirana na ovaj način, ne daje odgovarajuću raspodelu. U slučaju mreže koja je sastavljena od dva bloka, greška nije velika ni na samom početku treninga. Ovo je posledica postepenog građenja kvantnog kola generatora, gde smo za deo mreže inicirali skup parametara, tako da se na zadovoljavajući način reprezentuje tražena raspodela. Uočava se da u toku obučavanja greška diskriminatora približno ulazi u zasićenje, dok greška generatora "osciluje" oko neke srednje vrednosti. Razlog za ovakvo ponašanje je izbor metoda za optimizaciju Adam, koji je računski efikasan i brzo nalazi optimalno rešenje, ali ne adaptira korak na adekvatan način, tako da se postigne bolja konvergencija.



Sl. 5. Kumulativna funkcija log-normalne raspodele (svetlo-plava linija) i histogram kumulativne raspodele dobijen usrednjavanjem 10000 raspodela koje je generisao realizovani kvantni generator sastavljen od (a) jednog i (b) dva osnovna sloja kvantne mreže.

Za dobijene parametre kvantnih generatora, postavljena su kvantna kola i generisano je po 10000 raspodela. Za svaku generisanu raspodelu je nađena kumulativna funkcija raspodele i rezultati su usrednjeni. Dobijeni rezultati su upoređeni sa kumulativnom funkcijom idealizovane log-normalne raspodele, koja je ustanovljena za polazni skup i rezultati su prikazani na Sl.5. Poređenjem raspodela na Sl. 5 (a) i (b) se može ustanoviti da jednostavnija mreža daje nešto lošije rezultate u oblasti gde postoji veliki gradijent log-normalne raspodele. Mreža generatora koja se sastojala iz više slojeva je bolje reprodukovala “strmiju” raspodelu. Pretpostavlja se da bi razlike između dubljih mreža (sa više od

dva osnovna kvantna sloja) i mreže sa jednim slojem bila još veća u slučaju generisanja raspodele, koja ima više lokalnih maksimuma (multimodalna raspodela). Ipak, povećanje broja slojeva bi značajno produžilo trening mreže. Treba naći ravnotežu između kompleksnosti implementacije mreže (u cilju povećanja realističnosti raspodele) generatora i vremena potrebnog za obučavanje mreže. Takođe, pretpostavlja se da bi još realniji opis proizvoljne raspodele mogao da se dobije ukoliko bi se koristila kola sa više kubita, što bi dodatno usložnilo svaki sloj kvantne mreže i značajno produžilo trening i jednoslojne i višeslojne (duboke) mreže.



Sl. 6. Šematski prikaz kvantnih operacija korišćenih za implementaciju koda na kvantnom računaru `ibmq_lima`. Sistem ima 5 kubita raspoređenih u T geometriji, tako da je kubit `q1` povezan sa tri kubita (`q0`, `q2` i `q3`), kubit `q3` sa dva kubita (`q2` i `q4`), dok su ostali “ivični” kubiti (`q0`, `q2` i `q4`) povezani samo sa jednim najbližim susedom.

Na kraju je metoda testirana na realnom kvantnom računaru. Kôd je izvršen na najmanje opterećenom sistemu `ibmq_lima` [27]. Ovaj sistem je zasnovan na Falcon r4T arhitekturi kvantnog procesora sa svega 5 kubita i *kvantnom zapreminom* (engl. quantum volume) koja iznosi 8. Iako predstavlja jedan od najskromnijih IBM-ovih sistema po pitanju performansi, dovoljan je za izvršavanje postavljenog problema. Osnovna kvantna kola (engl. gate) u ovoj arhitekturi su jednokubitne *ID* (jedinična; engl. Identity gate), *X*, *RZ* (rotacija oko *z*-ose na Bloch-ovoj sferi), *SX* (koren iz *X*; $Sqrt(X) = \sqrt{X}$) i dvokubitna *CX* (kontrolisana *X* operacija). Realizacija jednog koraka programa odgovara implementaciji datoj na Sl. 6. Korišćena su prva 4 kubita (označeni `q0-q3`), pošto zadovoljavaju uslov najbolje međusobne povezanosti. Zbog ograničenog broja iteracija, koje jedan korisnik može odraditi u jednom procesu, broj epoha pri obučavanju je ograničen na 20. Ovaj broj je pet puta manji od onoga što je korišćeno u kvantnom simulatoru, pa se ne očekuje da će rezultati dobijeni na realnom kvantnom računaru biti bolji od onih na simulatoru. Kao rezultat optimizacije generatora dobijen je vektor varijabilnih parametara:

$$\theta_G = [2.34593012, 2.40548665, 6.16308627, 0.64978231, 3.46996776, 6.22740227, 5.06966893, 2.22040949].$$

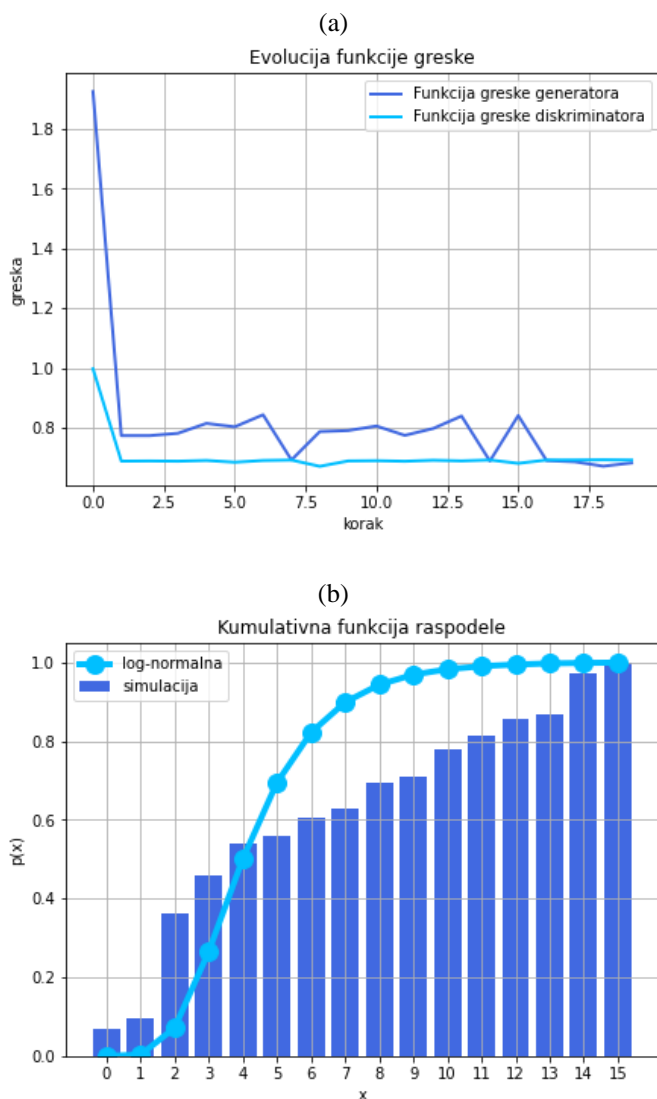
U cilju poređenja sa rezultatima, koji su dobijeni pomoću klasičnog programskog simulatora kvantnog kola, na Sl. 7 su redom prikazani evolucija funkcije greške u funkciji rednog broja iteracije (epoha) i histogram kumulativne funkcije raspodele, dobijeni na osnovu rezultata koje je generisao realni kvantni sistem. Čak i za ovako mali broj epoha pri obučavanju kvantne mreže na kvantnom računaru, kvantni generator je u stanju da “prevari” klasični diskriminator. Ovo

je očigledno na osnovu Sl. 7 (a), gde je funkcija greške generatora manja od diskriminatora posle obučavanja. Sa druge strane, poređenje kumulativne funkcije greške za log-normalnu i raspodelu dobijenu usrednjavanjem 10000 generisanih raspodela (videti Sl. 7 (b)) mogu se uočiti značajna odstupanja. Takođe, rezultati su lošiji od onih koji su dobijeni pomoću softverskog simulatora (videti Sl. 5), što je i očekivani rezultat obzirom da je obučavanje realnog hardvera bilo značajno kraće. Ono što je očigledno je da je u realnom hardveru funkcija greške pala na malu vrednost već posle par iteracija, za razliku od klasične simulacije kvantnog računanja, gde je značajan pad ostvaren tek posle 20 epoha. Ovo bi moglo da navede na pogrešan zaključak, da obučavanje kvantnog generatora realizovanog na kvantnom računaru traje kraće od vremena (broja iteracija) koje predviđa simulacija, gde nisu uračunati efekti šuma i dekoherencije. U skorašnjim publikacijama [25] se kao razlog za ovakvo ponašanje navodi prisustvo dekoherencije i šuma u kvantnom hardveru, koji su uzrok brže konvergencije ka optimalnoj vrednosti parametara.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je razmotreno kvantno kolo generatora raspodele koji bi se mogao iskoristiti za generisanje rezultata koji odgovaraju realnim eksperimentalnim rezultatima u mnogim naučnim oblastima. Kolo je dobijeno algoritmom kvantne generativne suparničke mreže, gde se u konkurentnom postupku takmiče kvantni generator, koji generiše raspodelu, i klasična neuralna mreža, koja treba da klasifikuje generisanu raspodelu kao realnu ili lažnu. Za razliku od originalne postavke algoritma, diskriminator je klasičan i treba da

reprodukuje slučaj, gde kvantni sistem treba da nadmaši klasični sistem mašinskog učenja koji se upotrebljava za otkrivanje računarski generisanih rezultata. Ustanovljeno je da je moguće realizovati kvantnu mrežu koja bi sa velikom verovatnoćom mogla da generiše raspodelu, koju bi klasični diskriminator ocenio kao realističnu. Kao primer je uzeta log-normalna raspodela, mada bi princip bio identičan i u slučaju proizvoljne raspodele.



Sl. 7. Za realni kvantni generator koji se sastoji iz jednog sloja i klasičan diskriminator prikaz: (a) evolucije funkcije greške diskriminatora (svetlo plava linija) i kvantne mreže generatora (tamno plava linija); (b) kumulativna funkcija log-normalne raspodele (svetlo-plava linija) i histogram kumulativne raspodele dobijen usrednjavanjem 10000 generisanih raspodela dobijenih pomoću kvantne mreže generatora (tamno plava linija).

Najpre je izvršena simulacija kvantnog algoritma na klasičnom računaru. Za konstrukciju generatora su korišćene kvantne mreže sa jednim i dva sloja. U svakom sloju je ostvareno kružno kvantno sprezanje kubita. Analizom evolucije greške tokom treninga i kumulativne funkcije raspodele realizovane jednoslojne i dvoslojne mreže je ustanovljeno da mreže sa više slojeva verodostojnije generišu traženu raspodelu. Ipak, sa povećanjem broja slojeva se

povećavao broj varijabilnih parametara, a samim tim i vreme potrebno za obučavanje mreže. Ustanovljeno je da obe mreže, sa velikom verovatnoćom, mogu prevariti klasičan diskriminator, koji bi vršio klasifikaciju rezultata. Zatim je algoritam izvršen na realnom kvantnom hardveru. Analiziran je kvantni generator koji se sastoji iz jednog kvantnog sloja. Obučavanje je izvršeno u malom broju koraka. Dobijeni su rezultati koji su ukazali na dobre performance razmatranog algoritma i u slučaju simulacije na realnom kvantnom računaru. Za realizaciju analiziranog algoritma nije potreban veliki broj slojeva u kvantnoj mreži, pa se obučavanje može izvesti u relativno malom broju iteracija, čak i na trenutno dostupnom kvantnom hardveru koji je podložan dekoherenciji i šumu. Analizirani algoritam bi se mogao usložniti na slučaj raspodele u više dimenzija, tako da daje rezultate koji su veoma slični onima koji bi se dobili u eksperimentalnim biomedicinskim merenjima poput citometrije, DNK analize, radioloških, ultrazvučnih i drugih biomedicinskih mernih metoda. U daljem radu bi bilo interesantno razmotriti kako bi se model pokazao na slučajevima složenijih jednodimenzionih i višedimenzionih raspodela, kako bi povećanje broja kubita uticao na poboljšanje performansi generatora, kao i slučaj različitog sprezanja kubita u osnovnom kolu na kvalitet rezultata i vreme konvergencije parametara mreže.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije 451-03-68/2022-14/200103.

LITERATURA

- [1] Y. S. Rao, "Scientific publication process and its impact on growth of science," *Ann. Lib. Inf. Stu.*, Vol. 67, pp. 13-20, Mar. 2021.
- [2] <https://dblp.org/statistics/publicationsperyear.html>
- [3] M. Mabe, "The growth and number of journals," *Serials*, vol. 16, no.2, pp. 191-197, July 2003.
- [4] S. Rawat, S. Meena, "Publish or Perish: Where are we heading?" *J. Res. Med. Sci.*, vol. 19, pp. 87-89, Feb.2014.
- [5] U. A. Hasan, G. Trinchieri, J. Vlach, "Toll-like Receptor Signaling Stimulates Cell Cycle Entry and Progression in Fibroblasts," *J. Biol. Chem.*, vol. 280, no. 21, pp. 20620-20627, May 2005.
- [6] S. Magar, D. Nayak, U. B. Mahajan, K. R. Patil, S. D. Shinde, S. N. Goyal, S. Swaminarayan, C. R. Patil, S. Ojha, C. N. Kundu, "Ultra-diluted Toxicodendron pubescens attenuates proinflammatory cytokines and ROS-mediated neuropathic pain in rats," *Sci. Rep.*, vol. 8, pp. 13562 1-11, Sep. 2018.
- [7] <https://29a.ch/photo-forensics/>
- [8] <https://retractionwatch.com/>
- [9] D. P. Kingma, M. Welling, "Auto-Encoding Variational Bayes," Technical report, <https://arxiv.org/abs/1312.6114>
- [10] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, *Deep Learning*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, London, England, 2016.
- [11] I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, Y. Bengio, "Generative adversarial networks," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 27, pp. 1-9, 2014.
- [12] A. Radford, L. Metz, S. Chintala, "Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks," <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.06434>

- [13] M. A. Nielsen, I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2010.
- [14] M. Schuld, F. Petruccione, *Machine Learning with Quantum Computers*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021.
- [15] P.-Luk D.-Demers, N. Killoran, "Quantum generative adversarial networks," *Phys. Rev. A*, vol. 98, no. 1, pp. 012324 1-8, Jul. 2018.
- [16] S. Lloyd, C. Weedbrook, "Quantum Generative Adversarial Learning," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, no. 4, pp. 040502 1-5, Jul. 2018.
- [17] H. Situ, Z. He, Y. Wang, L. Li, S. Zheng, "Quantum generative adversarial network for generating discrete distribution," *Information Sciences*, vol. 538, pp. 193-208, June 2020.
- [18] G. Agliardi, E. Prati, "Optimal Tuning of Quantum Generative Adversarial Networks for Multivariate Distribution Loading," *Quantum Rep.*, vol. 4, pp. 75-105, Feb. 2022.
- [19] H.-L. Huang, Y. Du, M. Gong, Y. Zhao, Y. Wu, C. Wang, S. Li, F. Liang, J. Lin, Y. Xu, R. Yang, T. Liu, M.-H. Hsieh, H. Deng, H. Rong, C.-Z. Peng, C.-Y. Lu, Y.-A. Chen, D. Tao, X. Zhu, J.-W. Pan, "Experimental Quantum Generative Adversarial Networks for Image Generation," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 024051 1-20, Aug. 2021.
- [20] <https://qiskit.org/>
- [21] https://qiskit.org/documentation/machine-learning/tutorials/04_qgans_for_loading_random_distributions.html
- [22] Diederik P. Kingma, Jimmy Ba, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
- [23] J. R. McClean, S. Boixo, V. N. Smelyanskiy, R. Babbush, H. Neven, "Barren plateaus in quantum neural network training landscapes," *Nat. Comm.*, vol. 8, pp. 4812 1-6, Nov. 2018.
- [24] M. Cerezo, A. Sone, T. Volkoff, L. Cincio, P. J. Coles, "Cost function dependent barren plateaus in shallow parametrized quantum circuits," *Nat. Comm.*, vol. 12, pp. 1791 1-12, Mar. 2021.
- [25] A. Skolik, J. R. McClean, M. Mohseni, P. Smagt, M. Leib, "Layerwise learning for quantum neural networks," *Quantum Mach. Intell.*, vol. 3, pp. 5 1-5, Jan. 2021.
- [26] <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>
- [27] https://quantum-computing.ibm.com/services?services=systems&system=ibmq_lima

ABSTRACT

For many years, we have witnessed that many publications are an effective means of recognizing exceptional competence and talent in science, which can provide an individual with great moral and financial satisfaction. The famous phrase in academic circles "publish or perish" is becoming a harsh reality. In their desire to publish sessional discoveries, individuals try to falsify scientific results to create the illusion of exceptionality. Modern image analysis programs based on artificial intelligence have proven to be an effective means of exposing false representations of scientific results and have led to the withdrawal of many suspicious publications from journals in recent years. New artificial intelligence algorithms based on generative adversarial networks provide the ability to generate images that can be classified as credible. The implementation of these algorithms on quantum computers has proven to be a potentially superior method of image generation and poses a real danger that cases of falsification of scientific results will go unnoticed. This imposes the need to soon develop a discipline that could be described as forensics of scientific results, and which would deal with unraveling the application of classical and quantum algorithms for generating results.

Quantum Generative Adversarial Networks for Generating Scientific Results

Vladimir Arsoski

Forenzički aspekt prostorne i vremenske komponente

Snežana Stojičić, Radovan Radovanović, Mileša Srećković, Nikola Radovanović

Apstrakt—Dinamičnost realnih sistema uključuje neizostavno vremenski okvir i prostorno referenciranje, što je u direktnoj vezi sa davanjem nalaza i mišljenja sa forenzičkog aspekta. U određenim događajima i slučajevima primene forenzičkih metoda, posebno se mora dati značaj redosledu, sledu dešavanja u okviru određenog događaja, jer on može značajno uticati na zaključivanje. Prostorno referenciranje se, može razmatrati od osnovnog navođenja mesta događaja do dovođenja u kontekst uticaja elemenata prostora na uzrok i posledicu događaja, koji se obrađuje. Ukoliko je moguće obezbediti referentne vremenske podatke, podatke u jednakim vremenskim intervalima oni mogu biti posmatrani i analizirani kao vremenske serije. U radu su dati primeri uključivanja vremenskog okvira i prostornog referenciranja, imajući u vidu da značajno mogu doprineti ciljevima forenzičkog inženjerstva.

Ključne reči—Forenzički aspekti; prostorno referenciranje, vremenski okvir;

I. UVOD

Zaključci o uzrocima nastanka incidentnih događaja se zasnivaju na činjenicama i analizi u kojoj mogu biti primenjene i metode forenzičkog inženjerstva. Nalaz i mišljenje do kojih se dođe u toku analize može, prema prethodno navedenim aspektima primene stručnih znanja, veština i specifičnih znanja, mogu biti usmereni ka poboljšavanju bezbednosti proizvodnog procesa, poboljšanju performansi i efikasnosti rada mašina i uređaja, kao i ka primeni nalaza i mišljenja kao stručne pomoći u sudskim i drugim postupcima pri utvrđivanju činjenica, koje se odnose na nesreće ili krivične stvari. Generalno se sa forenzičkog aspekta procenjuje stanje pre događaja, posle događaja, postavljaju hipoteze o mogućim načinima i uslovima koji se mogu dovesti u vezu sa nastankom stanja posle događaja, pronalaze dokazi koji negiraju ili potvrđuju postavljene hipoteze i primenjuju znanja i veštine za povezivanje različitih činjenica i dokaza u koherentni scenario, vezan za nastanak događaja i sačinjava nalaz i mišljenje u formi koja odgovara daljoj primeni i/ili procesuiranju slučaja [1].

Snežana Stojičić, Ministarstvo unutrašnjih poslova, Kneza Miloša 101, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: snezana.stojici@mup.gov.rs),

Radovan Radovanović – Kriminalističko policijski univerzitet, Cara Dušana 196, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: radovan.radovanovic@kpu.edu.rs),

Mileša Srećković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: esreckov@etf.bg.ac.rs).

Nikola Radovanović – Kriminalističko policijski univerzitet, Cara Dušana 196, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: nikola.radovanovic@gmail.com).

Primena metoda forenzičkog inženjerstva se vrši od strane pojedinaca ili stručnih timova koji obavljaju forenzičke istrage u sprovođenju aktivnosti na otkrivanju uzroka koji je doveo do incidenta. Prostorni kontekst je jedna od osnova za referenciranje događaja, pojave ili procesa koji se analizira, kao i vremenski okvir koji je potrebno dati sa najvećim mogućim stepenom preciznosti [2,3]. Međutim, nije uvek jednostavno ustanoviti veze vremenskog okvira i prostornog referenciranja [2, 4-7].

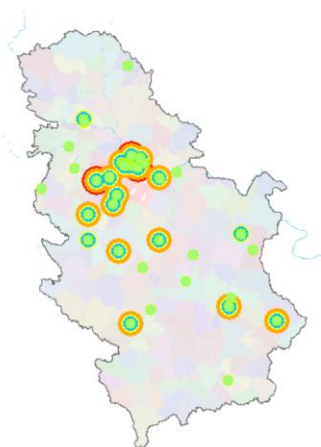
II. PROSTORNO REFERENCIRANJE

Jedan od primera koji će biti obrađivan odnosi se na prostorni kontekst događaja koji su uzrokovani požarnim ili eksplozivnim procesima [8], odnosno jednim aspektom koji se odnosi na dejstvo štetnih materija na okruženje, što pak uključuje potrebu za omogućavanjem utvrđivanja koncentracija zagađujućih materija u vazduhu [9]. Određivanje koncentracije zagađujućih materija se može vršiti na osnovu postojećih mernih stanica. Za to se mogu koristiti merne stanice automatskog monitoring kvaliteta vazduha u Republici Srbiji¹Za određivanje lokacija mernih mesta za uzimanje uzoraka za merenje koncentracija zagađujućih materija, a u svrhu ocenjivanja kvaliteta vazduha u zonama i aglomeracijama, primenjuju se kriterijumi dati u Uredbi o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha („Sl. glasnik RS“, br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013). Posebno, makrolokacije za fiksna merenja, određuju se u cilju zaštite zdravlja ljudi, vegetacije i prirodnih ekosistema, a u neposrednoj blizini tačkastih izvora, s obzirom na gustinu emisija, očekivanu raspodelu zagađujućih materija u vazduhu i potencijalnu izloženost stanovništva.

Određivanje lokacija mernih mesta, vrši se tako da se može pratiti primena standarda i najboljih dostupnih tehnika u skladu sa propisima u oblasti sprečavanja i kontrole zagađivanja vazduha (Sl.1). Sam postupak određivanja lokacija zahteva prethodnu analizu na osnovu dostupnih podataka u odnosu na prostor, uz primenu svih propisanih kriterijuma i analizom dobijenih procena. Posebno, imajući u vidu da izbor mernog mesta i lokacije za uzimanje uzoraka, je potrebno proveravati periodično ili protokom određenog vremenskog perioda, u cilju potvrđivanja validnosti kriterijuma koji su prethodno korišćeni i u zavisnosti od

¹ [АЗЗЖС - ОБЈЕДИЊЕНИ ПРИКАЗ АУТОМАТСКОГ МОНИТОРИНГА КВАЛИТЕТА ВАЗДУХА У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ \(sepa.gov.rs\)](http://www.sepa.gov.rs)

promena nastalih okruženju nalaženja novih predloga i rešenja [2].



Sl. 1. Prikaz lokacija mernih stanica iz Sistema automatskog monitoringa kvaliteta vazduha sa podataka o koncentracijama PM2.5 izmerenih u periodu 18-25.04.2022. godine – satni podaci.

Različite vrste fizičkih dokaza mogu pružiti opšte informacije o prostornim odnosima između objekata, ljudi i događaja. Pored toga, primena forenzičkih metoda ispitivanja i analize može doprineti tumačenju i potencijalnom rasvetljavanju krivičnog dela.

Forenzičke metode koje se primenjuju za ispitivanje, komparacije i identifikacije uzroka i posledica, kod eksplozivnih i požarnih procesa, kao i drugih dokaza u istražnom postupku, olakšavaju rasvetljavanje krivičnih dela. Kod razrešavanja krivičnih dela u kojima se pojavljuju eksplozivni i požarni procesi uključivanjem prostorne komponente, može značajno doprineti davanju kvalitetnije prezentacije i vizualizaciji događaja sa ciljem davanja mišljenja i nalaza o dejstvu ovih procesa sa aspekta forenzičkog inženjerstva. Upotrebom softverskih alata za rad sa prostornim podacima omogućava se postavljanje upita u odnosu na podatke o lokaciji događaja kao i primena metoda za analizu podataka u odnosu na prostor. Ovi alati omogućavaju vršenje merenja, analize i izradu prikaza, koji pored sadržaja koji se odnosi na prostorne podatke, organizovane po tematskim slojevima, mogu sadržati elemente koji su određeni prema parametrima koji su definisani faktorima relevantnim za posmatrane događaje i procese. Mogu se ostvariti simulacije dejstva, analize koje se mogu vršiti i u odnosu na prostor, kao i testiranje hipoteza i rekonstrukciju događaja u cilju utvrđivanja relevantnih činjenica. U postupku utvrđivanja relevantnih činjenica koriste se instrumentalne i komparativne metode za modelovanje procesa, vizualizaciju i dokazivanje dejstva eksplozivnih i požarnih procesa. U radu je dat prikaz mogućnosti korišćenja podataka sa mernih stanica u sistemu automatskog monitoringa kvaliteta vazduha u Republici Srbiji i mogućnosti analize i detekcije i vizualizacije stanja za slučaj uzorak, u izabranom vremenskom periodu od 18-25.04.2022. godine. Sa mernih stanica preuzeti su satni podaci kako bi se izvršila njihova analiza. Dalja razmatranja mogu

biti usmerena ka analizi eksplozivnih i požarnih procesa u odnosu na lokaciju dešavanja procesa i distribuciju u odnosu na prostor, čime forenzički inženjering može dati neutralan i objektivni doprinos da istraži jedan od načina da se jedna kompleksna problematika dejstva eksplozivnih i požarnih procesa obradi uz uključivanje prostorne komponente, i da se pruži potpuniji izvor informacija o ovoj temi u prostornom kontekstu. Praktičan značaj je ukazivanje na mogućnost uključivanja komponente prostora uz komponentu vremena u forenzičkom inženjerstvu, u odnosu na forenzičke identifikacije eksplozivnih i požarnih procesa u cilju sprečavanja i suzbijanja kriminaliteta i opšte bezbednosti.

Razmatranja podataka iz sistema automatskog monitoringa kvaliteta vazduha data su u odnosu na granične vrednosti suspendovanih čestica PM10 i PM2.5, date u Tabeli I, kao zagađujućih materija, čija koncentracija može biti povećana i u slučaju pojave incidentnih situacija izazvanih požarnim i eksplozivnim procesima.

TABELA I
GRANIČNE VREDNOSTI ZA PM10 I PM2.5

Zag. Materija (1h)	Odličan	Dobar	Prihvatljiv	Zagađen	Jako zagađen
PM10 (ug.m-3)	0-25	25-50	50-90	90-180	> 180
PM2.5 (ug.m-3)	0-15	15-30	30-55	55-110	> 110

III. PRAKTIČNI PRIMER ANALIZE VREMENSKOG OKVIRA I PROSTORNOG REFERENCIRANJA

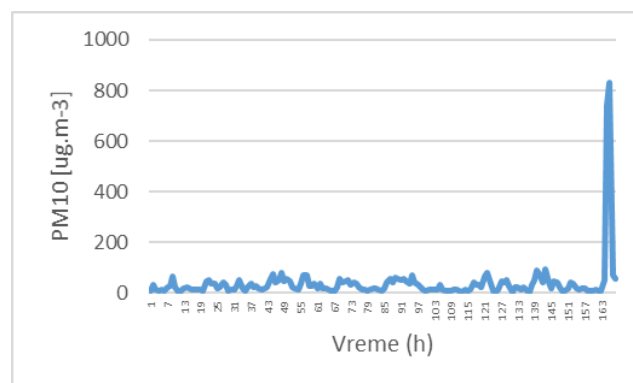
Za prikaz praktičnih aspekata, preuzeti su podaci sa mernih stanica Sistema za automatsko praćenje kvaliteta vazduha u Republici Srbiji, koji su dostupni na satnom, nedeljnom i mesečnom nivou, i koji su dostupni za analizu i korišćenje kao otvoreni podaci. Podaci su preuzeti u period od 18-25.04.2022. godine na satnom nivou, prema stepenu dostupnosti i stanju mernih uređaja na mernim stanicama. Preuzeti skup podataka je dalje obrađivan, kao slučajni uzorak. Prema lokacijama mernih stanica, podaci su pripremljeni za korišćenje u alatima za rad sa prostornim podacima i omogućavanje prikaza i dalje analize u odnosu na prostor.

TABELA II
DESKRIPTIVNI PODACI ZA PM10 PO MERNIM STANICAMA

Naziv merne stanice	N	Sr. vred	SD	Min	Med	Max
Beograd Obrenovac Ušće	167	29.69	20.35	3.76	23.56	126.49
Beograd Ovča	162	24.19	22.00	2.29	16.89	163.87
Beograd Topčiderska Zvezda	164	23.30	11.95	4.31	18.99	56.4
Bor Gradski park	167	19.20	15.15	2.47	14.37	75.72

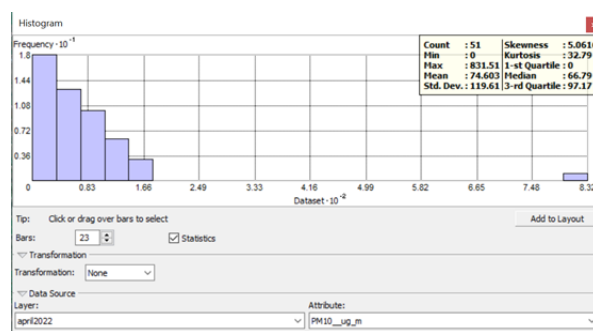
Naziv merne stanice	N	Sr. vred	SD	Min	Med	Max
Čačak	167	28.76	17.37	4.32	25.04	96.66
Novi Sad Rumenačka	167	20.56	8.83	5.95	19.83	56.52
Pirot	167	28.03	15.67	7.31	25.25	122.7
Beograd Ada petlja	167	26.33	11.91	8.22	23.85	63.03
Beograd Bežanijska kosa	167	26.61	13.93	3.32	21.6	74.66
Beograd Despota Stefana	167	26.24	11.78	4.87	23.12	55.43
Beograd Dragiša Mišović	167	23.93	13.201	3.13	20.73	67.11
Beograd Lazarevac	167	26.52	14.716	5.73	23.09	80.76
Beograd Mostar	167	26.06	14.99	5.11	21.54	74.24
Beograd Novi Beograd	167	23.72	13.29	4.47	19.27	65.88
Beograd Oml. brigada	167	28.06	14.97	4.17	22.65	70.09
Beograd Stari grad	167	25.2	12.53	3.68	21.73	59.16
Beograd Vinča	167	24.38	16.39	3.34	20.89	138.9
Beograd Vračar	167	30.21	16.44	6.5	25.03	100.86
Beograd Vračar Dom zdravlja	167	24.93	12.86	3.89	22.08	66.79
Beograd Zeleno brdo	167	23.53	11.770	4.09	20.81	63.44
Kosjerić	167	29.29	19.66	1.75	25.45	97.43
Kragujevac	167	33.09	18.15	9.52	30.41	132.66
Niš IZJZ Niš	167	20.25	12.82	2.79	16.83	72.2
Niš O.š. Sveti Sava	167	31.26	24.4	5	24.52	154.16
Novi Pazar	167	39.67	25.50	4.37	34.81	110.43
Pančevo Vojlovica	166	30.39	17.12	4.29	26.59	91.4
Smederevo Centar	167	25.24	14.55	3.43	21.87	92.81
Valjevo	165	38.45	24.64	5.97	29.88	150.23
Veliki Crljeni	167	35.50	19.71	6.29	30.42	130.85
Beograd Banovo brdo	167	24.22	12.252	3.35	21.09	67.58
Obrenovac Centar	167	34.13	19.49	3.9	28.08	93.92
Pančevo Starčevo	167	37.75	84.98	1.37	23.39	831.51
Pančevo Vatrogasni dom	167	21.06	12.49	2.78	18.03	68.89

Na osnovu deskriptivnih statističkih podataka, prikazanih u Tabeli II, u posmatranom uzorku identifikovane su lokacije sa pojavom ekstremnih vrednosti i vremenski period nastanka i trajanja prisustva povišenih vrednosti (Sl. 2). Identifikovane ekstremne vrednosti su dalje analizirane sa ciljem utvrđivanja dužine trajanja visokih koncentracija i prostorne distribucije.



Sl. 2. Prikaz podataka o koncentracijama PM10 za lokaciju sa identifikovanim ekstremnim vrednostima u posmatranom uzorku, kao vremenskoj seriji.

Analizom je dobijeno da je prisustvo ekstremnih vrednosti identifikovano u kraćem vremenskom interval i da u odnosu na posmatrani period nije ostvaren značajan uticaj na distribuciju posmatranih vrednosti (Sl. 3).



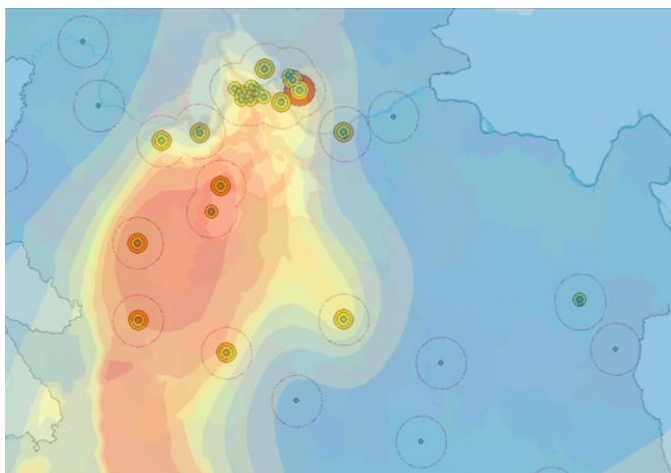
Sl. 3. Prikaz statističkih podataka o koncentracijama PM10 izmerenih u periodu 18-25.04.2022. godine na merim stanicama za monitoring kvaliteta vazduha.

U cilju procene prostorne distribucije na osnovu posmatranog uzorka, korišćene su geostatističke metode dostupne u okviru alata za rad sa prostornim podacima i to na lokacijama, u odnosu na vreme i u odnosu na sve posmatrane lokacije in a njima izmerenih vrednosti sa prediktivnom procenom. Korišćena je prostorna ocena za PM10, kao promenljive, na osnovu doprinosa tačaka u kojima je vrednost poznata (Kriging).

Rezultati analize pokazuju da značajnije dejstvo ostvaruju povišene vrednosti u dužem vremenskom periodu i ako su nižeg nivoa, od ekstremnih vrednosti, koje se pojavljuju u kraćem vremenskom periodu (Sl. 4). Potrebno je svakako imati u vidu da u analizu nisu uključeni ostali element iz okruženja i karakteristike terena za izvedeni zaključak, što svakako ukazuje na potrebu dajeg istraživanja i uključivanja drugih elemenata realnog okruženja, odnosno, ukoliko isti nisu dostupni u vreme sprovođenja analize identifikacije elemenata i generisanje modela sa mogućnošću variranja vrednosti i procene uticaja.

Svakako, sprovedenom analizom je potvrđeno da komponente prostora i vremena mogu biti značajno doprineti

pri analizi događaja koji dovode do emisije zagađujućih materija u vazduh i procene dejstva.



Sl. 4. Prikaz podataka o koncentracijama PM10 izmerenih u periodu 18-25.04.2022. godine na mernim stanicama za monitoring kvaliteta vazduha sa zomama i predikcionom mapom u odnosu na prostor.

IV. ZAKLJUČAK

Uključivanje prostorne i vremenske komponente, uz korišćenje alata za rad sa prostornim podacima, proširuje mogućnosti analize i primenu metoda sa forenzičkog aspekta. Izložena razmatranja i praktični prikazi na datom na slučajnom uzorku, ukazuju na mogućnosti koje mogu biti dalje razmatrane i istraživane u korelaciji sa određenim događajima koji su predmet primene drugih forenzičkih metoda, kao što su između ostalog i požari i eksplozije, koji za posledicu mogu imati povećanu koncentraciju suspendovanih čestica u vazduhu.

ZAHVALNICA

Aurori se zahvaljuju organizacionom odboru konferencije ETRAN 2022 na prepoznatom značaju oblasti forenzike, prostoru i vremenu datom za izlaganje i diskusiju.

LITERATURA

- [1] R. K. Noon, „*Forensic Engineering Investigation*“, CRC Press, USA, 2001.
- [2] Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha, „Sl. glasnik RS“, br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013. 2013. [Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha \(paragraf.rs\)](#)

- [3] Ambient (outdoor) air pollution, [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), Accessed 1st April 2022.
- [4] Vazduh građanima, Beogradski hakaton Descon 4.0, 2018. [Početna stranica - Vazduh građanima \(klimerko.org\)](#), Accessed 25th Mart 2022.
- [5] Svetsko zagađenje vazduha: Indeks kvaliteta vazduha u realnom vremenu, [Svetsko zagađenje vazduha: Indeks kvaliteta vazduha u realnom vremenu \(waqi.info\)](#), Accessed 25th March 2022.
- [6] [Build your DIY sensor and become part of the worldwide citizen science, open data, civic tech network. Supported by a lot of contributors](#) ❤️, Accessed 25th March 2022.
- [7] [xEco Vazduh - Kvalitet vazduha u Srbiji u realnom vremenu](#), Accessed 25th March 2022.
- [8] H. Ménard, O. Akinpelu, N.A. Fiakpui, R. (L.) He, S. Huxter, C. Jordan, L. Judge, A. King, B. Miller, S. E. Moggs, C.-T. Patrascu, T. Pearson, M. E. J. Seneviratne, L. E. Timmerman, P. R. Haddrill, J. K. Klu, C. Cole, & N. Nic Daéid, N. “Research trends in forensic science: A scientometric approach to analyze the content of the INTERPOL reviews”. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 2021. e1447. <https://doi.org/10.1002/wfs2.1447>
- [9] A. Kloosterman, A. Mapes, Z. Geradts, E. van Eijk, C. Koper, J. van den Berg, S. Verheij, M. van der Steen & A. van Asten, “The interface between forensic science and technology: how technology could cause a paradigm shift in the role of forensic institutes in the criminal justice system”. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 2015. 370(1674), 20140264. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0264>

ABSTRACT

The dynamic of real systems inevitably includes time frame and spatial referencing, which are directly related to giving findings and opinions from the forensic aspect. In certain events and cases where application of forensic methods might be appropriate, special importance must be given to the sequence of events within a certain event, because it can significantly affect the conclusion. Spatial referencing can also range from the basic indication of the place of the event to bringing into context the influence of the elements of space on the cause and effect of the event being processed. If it is possible to provide reference time data, the data in equal time intervals can be observed and analyzed as time series. The paper gives examples of including time frame and spatial referencing, bearing in mind that they can significantly contribute to the goals of forensic engineering.

A space and time from forensic aspects

Snežana Stojičić, Radovan Radovanović, Mileša Srećković, Nikola Radovanović

Različiti režimi rada kvantnih generatora kao instrument za modifikacije u stomatologiji

Aleksandar Bugarinović^{1,2}, Željka Tomić³, Sanja Jevtić⁴, Aleksander Kovačević⁵, Svetlana Pelemiš⁶, Zoran Nedić⁷, Dragan Družijanić¹

Apstrakt - Upotrebom kvantnih generatora u raznim oblastima, a i u stomatologiji, bavi se veliki broj istraživača sa perspektivom da taj broj bude i veći. Ciljevi su različiti: od dobijanja materijala za dalje formiranje do učesća u formiranju modifikovanih materijala, modifikacije osobina već tradicionalnih materijala do postizanja zadataka koji se pojavljuju u vezi sa zahtevima heritologije / forenzike ili za masmedija primenu. Specijalno, dijagnostičke tehnike na bazi jačih ili slabijih interakcija elionskih snopova sa materijalom, postaju sve više tražene merne tehnike zbog vremena same dijagnostike i mogućnosti ispitivanja karakteristika uzoraka i u malim lokalnim površinama, a skeniranjem po potrebi i u većim. Podrazumevaju se i kvantitativne i kvalitativne analize, a rad sa više od jednog snopa (manje i veće gustine snage), pored mogućnosti praćenja interakcije sa teoretske strane, pruža i praktičan deo aplikacije laserske ili uopšte elionske tehnike, koji je ušao u praksu ili je od potencijalnog interesa za protetičke i druge svrhe. Šta bi onda moglo biti generalno novo u ovoj oblasti? Novi dinamički režimi rada kvantnih generatora, oblici impulsa, njihovo trajanje i frekvencija, donose novi kvalitet, koji može proizvesti drugačije efekte pri interakciji laserskih snopova sa materijalom, uspostaviti nove standarde i/ili potisnuti stare. Rad se bavi interakcijom laserskih snopova, u različitim režimima rada, sa odabranom klasom materijala. Diskutovani su modeli za opis i rezultati interakcija, analizirana se oštećenja i dat je osvrt na trenutna i potencijalna polja primene i izabrane paralele sa drugim snopnim tehnikama.

Ključne reči - kvantni generatori, režimi rada, interakcije, modeli, polje primene.

I. UVOD

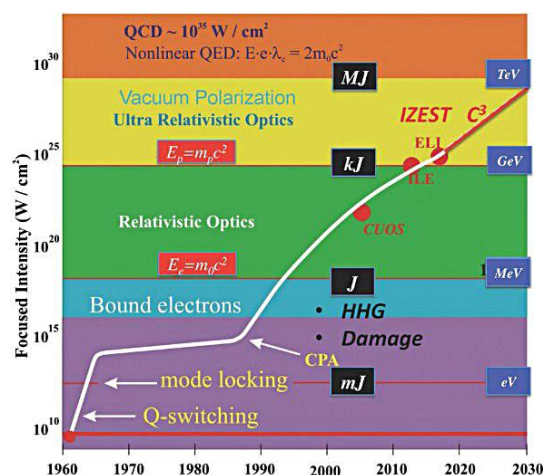
Primena laserske tehnike ili, u širem smislu, kvantnih generatora, treba da, na prvi pogled, menja značenje *modifikacije* sa kvantifikacijom od minornih uticaja na materijal mete do totalne ili lokalne destrukcije mete, zavisno od režima rada sistema kojim se vrši tretman.

Pošto je stvarnost omogućila da se interakcija koristi: a) u dijagnostičke svrhe, b) u strogo *modulacione* svrhe c) za spajanje materijala iste vrste ili različitih tipova d) za razdvajanje materijala, to postoji i grupisanje gustina energije, snage, primena *cw* ili impulsnog rada sa različitim parametrima, slike 1 i 2.

Vremenska baza impulsa (širine impulsa) je u rasponu od prvih milisekundnih impulsa sa stotinak spajkova [1] do *fs* režima.

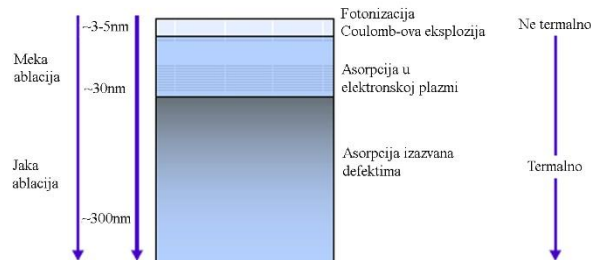
U pogledu materijala, koji su od interesa za stomatologiju, veoma je široka njihova paleta, zato što se danas koristi laserska tehnika u svakodnevnoj kliničkoj praksi: (a) za

saniranje *biološkog aparata*, uključujući i meka i tvrda tkiva, (b) u protetičke svrhe.



Slika 1. Istorija i predviđanje razvoja fokusiranog intenziteta od prvih demonstracija lasera (sa različitim režimima rada).

U svim tim procesima, postavljali su se i postavljaju se i dalje objektivizacije opisa procesa, pored toga što se veliki broj interakcija koristi u svakodnevnoj praksi, s obzirom na višedecenijsku primenu lasera u stomatologiji, zavisno od zemlje i njene regulative. To znači da su uključeni skoro svi glavni tipovi materijala: metali, dielektrici, specijalne klase keramike i dr. Posebno su važne i primene za paradentozne tretmane u kojima su korišćeni laseri malih snaga (reda mW) i gde se radilo samo o ozračavanju tkiva u vremenu predviđenom protokolom (kada je odobrena ta terapija u pojedinoj državi). Za simulaciju procesa interakcije prema očekivanom izlazu, koriste se modeli od termalnog do modela teorija sličnosti i zavisno da li se radi o proceni naponskog stanja protetske konstrukcije, do holografskih studija lokalnog opterećenja tačaka od interesa.

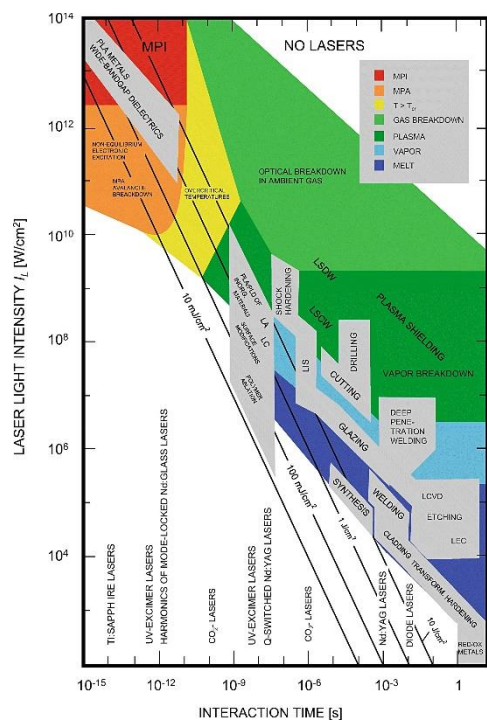


Slika 2. Procesi ablacije izazvanih laserima i neki procesi uz slojeve materijala od površine.

¹ Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, ² Provis doo, Bijeljina, ³ Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, ⁴ ATUSS, ⁵ Institut za

fiziku, ⁶ Tehnološki fakultet Zvornik, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, ⁷ Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu.

U ovom radu je odabrano nekoliko režima rada kvantnih generatora u režimu slobodne generacije ili *Q-switch* i dati su rezultati interakcije.



Slika 3. Karakteristična vremena interakcije, intenzitet lasera i mogući procesi sa često korištenim laserskim sistemima. (PLA/PLD – impulsna laserska ablacija / depozicija, LA – odgrevanje, LC – čišćenje, LIS – separacija izotopa, MTA – višefotonska apsorpcija / jonizacija, LSDW/LSCW – detonacija / sagorevanje podržana laserom, LCVD – indukovana hemijska CVD, LEC – elektrohemijско nanošenje prevlaka / nagrizanje, RED/OX – redukcija / oksidacija indukovana sa dugim impulsima ili *cw* CO₂) [11].

II. REZULTATI RADA I DISKUSIJA

Jedna od standardnih šema eksperimenata sa izlaganjem materijala od interesa, za određenu oblast stomatologije, podrazumeva rešavanje optike ulaznog snopa, položaja mete sa odgovarajućim *support*-om za promenu geometrije upada snopa lasera u materijal i prema mogućnosti laboratorije, podrške za promenu polarizacije snopa, uključivanje drugog tipa kvantnog generatora i kontrolu izlaznog snopa, uključujući mogućnost kvantitativnih opisa u vremenskom i prostornom domenu. Kako se pri impulsnom radu, najčešće rešava samo vreme ekspozicije, to je potrebno vršiti i kontrolu vremena. Ovaj deo aparature, sam po sebi, ne bi predstavljao specifične probleme, ali za stomatološke procese je od specijalnog interesa, jer je upravljanje snopom ručno.

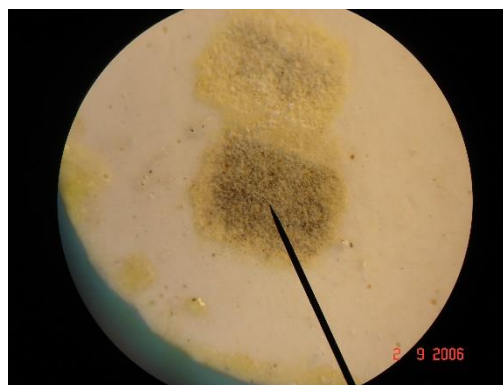
Idealni eksperiment bi podrazumevao mnogo drugih različitih kontrola samog procesa, sakupljanje izbačenog materijala, kontrolu sastava izbačenog materijala (nastanak novih jedinjenja) i geometrijske putanje izbačenog materijala, jer se simulira, odnosno predviđa situacija stvarne upotrebe. Za slučaj primene lasera kod žućnih i bubružnih kamenova, prvi eksperimenti su vršeni uz sakupljanje razvijenih gasova, da ne bi došlo do neželjenog trovanja organizma, a to podrazumeva i razne vrste operacija u stomatologiji (čišćenje kamenca i dr.).

Bez obzira na simulaciju iz raznih oblasti posmatranja dinamike procesa u izabranom režimu rada, dobro je posmatrati materijal mete sa više deskripcionih tehnika

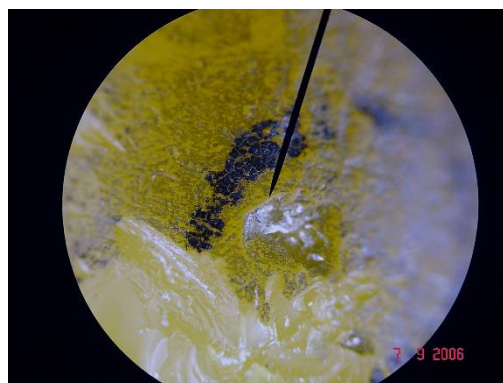
nedestruktivnog tipa za ulaz u eksperiment i ponoviti ih posle interakcije, kad dolaze u obzir i destruktivni postupci merenja, kakvi su zahtevi u SEM i drugim elektronskim tehnikama.

Za date rezultate interakcije dati su i IC spektri tretirane površine. Za tretiranje LAZ-a (Laser Affected Zone), u primeni u stomatologiji, traži se minimum zahvata tkiva ili bar strogo kontrolisan. Odnos LAZ-a i HAZ-a (Heat Affected Zone) je uvek pitanje, koje je podložno diskusiji.

Na slikama 4 i 5, dati su rezultati sprovedenih analiza stanja povreda na nekim materijalima od interesa za protetiku i za zubno tkivo. Na slici 6 je izabrani uzorak HAP-a, koji se već duže vremena primenjuje za ojačanja bioloških tkiva, privremenih ili stalnih.



Slika 4. Mikrograf analize optičkim mikroskopom belog gipsa izloženog laserskom snopu. (Nd³⁺:YAG, E = 35 mJ, površinski reljef, OM 40 x)



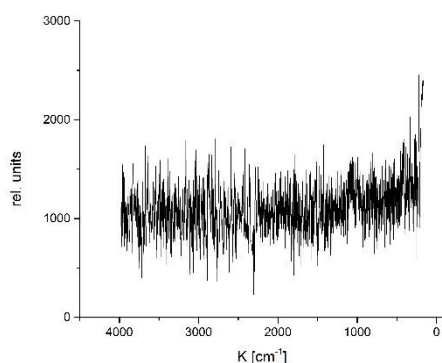
Slika 5. Analiza optičkim mikroskopom interakcije *Q-switch* tipa lasera na uzorku žutog voska. (Nd³⁺:YAG, $\tau = 15$ ns, E = 35 mJ, 3 impulsa, OM 40 x, površinski reljef)

Prema režimu rada, očekivalo se da bude proizveden krater koji ima više ili manje nagomilavanje materijala po obodu, pri čemu bi veće nagomilavanje materijala bilo vezano za režim slobodne generacije. Krater sa manje izbačenog materijala (po obodu) bi, sa druge strane, trebalo da služi i inverzno, za raspodelu gustine energije po preseku snopa ili prikaz nehomogenosti materijala mete. Zato je i bilo govora na početku eksperimentalnog dela, da bi u idealnom slučaju bilo dobro imati, paralelno, analizatore laserskog snopa direktno ili bar povremenu kontrolu gustine energije / snage, kojoj je meta bila izložena. Jednostavan prilaz bi bio i da se pri toj vrsti eksperimenata, pre serije impulsa na nekom materijalu izvrši isti režim na materijalu koji je predložen kao kontrolni materijal, a koji je pogodan za datu talasnu dužinu.

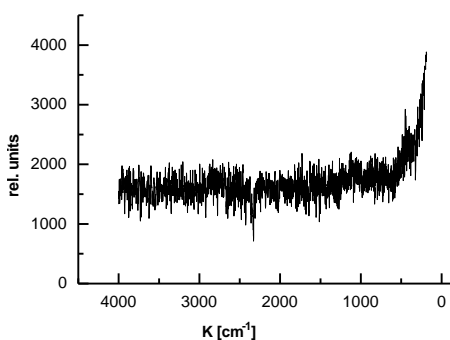


Slika 6. Mikrograf povrede na uzorku HAP-a. (Nd³⁺:YAG, Q-switch, E = 35 mJ, površinska modulacija, OM 40 x)

Na slikama 7 i 8 dati su IC spektri za uzorke gutaperke i HAP-a.



Slika 7. Infracrveni spektar (IC) uzorka gutaperke u dijapazonu 4000 - 180 cm⁻¹.



Slika 8. Infracrveni spektar (IC) uzorka HAP-a u dijapazonu 4000 - 180 cm⁻¹.

Idealno bi bilo da se spektri uvek rade pre i posle interakcije, zato što bi zavisno od površine povrede mogao da se sprovede formalizam za dobijanje optičkih konstanti materijala, kao što su koeficijenti refleksije, koeficijenti dielektričnih osobina, vezano za optičke osobine i kompleksan zapis. Ovde bi od koristi bio i *Raman*-ov spektar, koji bi i samim poređenjem sa IC spektrima dao neki kvalitativan odgovor bez sprovođenja primene algoritama za analizu strukture materijala.

Pretpostavka o novim materijalima, čiji broj raste u stomatologiji, je uvek potrebna, a za poznate materijale potrebna je iz razloga kontrole postojećih podataka i

izbegavanje razlika u tehnologiji izrade protetskog materijala. Čini se da je dobro ponoviti uvek provere i za poznate materijale.

Od interesa bi bila i tehnika termovizije, koja je skoro dve decenije bila prisutna sa prvim primenama lasera u stomatologiji, u vreme kada je ekonomska strana nabavke te kontrole predstavljala veći problem. To su eksperimenti koji mogu pratiti proces za određene dinamičke dijapazone kvantnih generatora, kad se radi o dugim impulsima ili srednjim vrednostima, pri većim repetitivijama, kao kontrolna relativna tehnika.

Važna oblast bi bilo i određivanje boje kod zuba ili protetičkih materijala, gde bi moglo biti od interesa vezivanje sa trenutnim stanjem deskripcije boje, u kojima glavne boje pripadaju kategoriji lasera (za televizijske svrhe HDTV, odavno je razvijen tip RGB lasera).

III. SIMULACIJA

Kako je u uvodu konstatovano, posle izabranog modela, za određene režime rada kvantnih generatora [9] se konstatuje da i više modela mogu da se koriste za određene režime, koji odgovaraju tipu grejanja materijala do tačke ključanja. To su slučajevi izlaganja patogenog tkiva (paradentozna) koje se već više od deceniju koristi za saniranje stanja. Slučajevi bušenja (otklanjanja materijala), zavisno da li se problemu prišlo sa redosledom grejanje-topljenje ili grejanje-sublancija i sl., bi morali da koriste odgovarajuće algoritme kod programa kod kojih su oni razvijeni [5].

Pošto je za bušenje najbitnije pitanje dimenzija (dubina, širina), onda se za preliminarnu ocenu koriste formule koje zavise od parametara izlaganja, termodinamičkih i optičkih osobina materijala.

U širokoj paleti materijala, čini se da je situacija *Status quo* i da se može naći mnogo praktičnih korekcija za izabrane režime rada, gde će se za promenu koeficijenata u formulama za standardne uslove rada približiti simulacija eksperimentu. Pri interakciji je jedna od važnih činjenica pitanje maksimalne gustine snage / energije, koja neće dovesti do praga za „lom”. Sve to pripada složenoj problematici „laser damage”, gde se uključuje statistika malih brojeva i statistika velikih brojeva, koje se različito modeluju.

IV. ZAKLJUČAK

U današnjem stepenu laserske tehnike postoji nekoliko definisanih režima rada kvantnih generatora, koji potencijalno mogu da se primene u biomedicinske svrhe. U praksi, iako postoji dosta dobro razvijena industrija laserskih sistema okrenutih medicini, pokazalo se da, generalno, postoji niz pozitivnih novih pravaca za primenu lasera. Ipak, od stanja same države i stepena njenog instrumentarijuma, vezano za klasičnije metode (mehanička bušilica, rentgenografija, poznate klase protetskih materijala sa komercijalnom podrškom), zavisi koliko će u njoj biti brzo uklapanje novih „optičkih” metoda u sve četiri uslovno podeljene oblasti: dijagnostika, modulacija u užem smislu (tkiva ili materijala), invazivna interakcija (hirurgija) i saniranje i formiranje ispuna i pravljenje mostova i dr. U ovom radu je pokazana interakcija sa tipovima odabranih materijala (keramičkog tipa i dr.), izvršene su analize sa strane optičke i elektronske mikroskopije, definisanje materijala mete putem IC spektroskopije. Ukazano je na

potrebu daljeg eksperimentalnog rada, vezano za stanje uzoraka i za, potencijalno, organizaciju daljih ispitivanja ili primena holografskih i tomografskih tehnika za definisanje dinamike opterećenja, uključujući tehnike brzog starenja materijala, koje bi služile za ocenu, vek trajanja protetskog nastavka i pravac traženja, kroz krojenja novih vrsta materijala od interesa za protetiku i prihvatanje „stranog tela”. Po pitanju samog HAP-a, bile su razvijene dve teorije koje su primenjivane na mehanizam stapanja sa organizmom.

LITERATURA

- [1] A. Bugarinović, *Modulacije osobina odabranih klasa materijala delovanjem snopnih tehnika*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2016.
- [2] M. Srećković, S. Pelemiš, *Laser Physics and Modeling in Relation to Ceramic Matrix Composites*, in *Encyclopedia of Materials: Composites*, Vol.2, Ed. D. Bravazon, Elsevier, Oxford, pp.218-235, 2021.
- [3] S. Ostojić, Ž. Tomić, N. Bundaleski, J. Ilić, M. Davidović, A. Bugarinović, V. Mlinar, *Rasejanje svetlosti i tehnike u biološkim i biomedicinskim problemima*, Zbornik radova XLVI Konferencije za ETRAN, Banja Vrućica, Teslić, Vol.III, pp.178-181, 4-7 jun, 2002.
- [4] V. Mirjanić, M. Srećković, Đ. Mirjanić, A. Bugarinović, D. Družijanić, V. Mitić, *Chosen Applications and Approaches to Modeling Lasers in Dentistry*, *Modern Physics Letters B*, Vol. 35, No. 25, 2150329, pp.1-23, 2021.
- [5] Đ. Mirjanić, M. Srećković, V. Mirjanić, S. Pelemiš, A. Bugarinović, D. Družijanić, *Izabrani rezultati i modelovanje primene laserskih snopova u stomatologiji na bio i protetičkim materijalima*, Zbornik radova konferencije Savremeni materijali 2021, pp.239-261, Banja Luka, 2022.
- [6] M. Srećković, A. Janićijević, M. Janićijević, S. Jevtić, Z. Latinović, K. Zarubica, A. Bugarinović, *Primene i modelovanje laserskih invazivnih, modulacionih i dijagnostičkih tehnika u medicini*, Zbornik radova konferencije Savremeni materijali 2019, Banjaluka, 01-03. septembar, pp. 61-90, 2020.
- [7] M. Ž. Srećković, A. A. Ionin, A. J. Janićijević, A. R. Bugarinović, S. M. Ostojić, M. M. Janićijević, N. V. Ratković Kovačević, *Formalisms, Analysis, Results and Accomplishments with Population Inversion of Materials*, *Journal of the Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska Contemporary Materials*, Vol.VIII, Iss.1, pp.91-108, 2017.
- [8] G. Padmanabham, Ravi Bathe, *Laser Materials Processing for Industrial Applications*, *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, Vol. 88, pp.359-374, 2018.
- [9] N. Rykalin, A. Uglov, I. Zuev, A. Kokora, *Laser and Electron Beam Material Processing*, Mir, Moscow, 1988.
- [10] S. Pelemiš, V. Mirjanić, Đ. Mirjanić, *Laseri u medicini i stomatologiji*, knjiga u štampi.
- [11] V. Chvykov, *New Generation of Ultra-High Peak and Average Power Laser Systems*, *High Power Laser Systems*, Ed. M. Harooni, December 2017.

ABSTRACT

The use of quantum generators in various fields, as well as in dentistry, is dealt with by a large number of researchers with the perspective that the number will be even higher. The goals are different: from obtaining materials for further formation to participating in the formation of modified materials, modifying the properties of already traditional materials to achieving tasks that appear in connection with the requirements of heritology / forensics or for mass media application. In particular, diagnostic techniques based on stronger or weaker interactions of elion beams with material are becoming more and more sought-after measurement techniques due to the time of diagnostics and the possibility of testing sample characteristics in small local areas, and scanning if necessary in larger ones. Quantitative and qualitative analyzes are included, and work with more than one beam (lower and higher power densities), in addition to the possibility of monitoring the interaction from a theoretical point of view, provides a practical part of the application of laser or elion techniques in general, which has entered into practice or is of potential interest for prosthetic and other purposes. What, then, could be generally new in this area? New dynamic modes of operation of quantum generators, pulse shapes, their duration and frequency, bring new quality, which can produce different effects when

laser beams interact with material, establish new standards and / or suppress old ones. The paper deals with the interaction of laser beams, in different operating modes, with the selected class of materials. Models for the description and results of interactions are discussed, damages are analyzed and an overview of current and potential fields of application and selected parallels with other beam techniques are given.

Key words - quantum generators, modes of operation, interactions, models, field of application.

Different modes of operation of quantum generators as an instrument for modifications in dentistry

Aleksandar Bugarinović ^{1,2}, Željka Tomić ³, Sanja Jevtić ⁴, Aleksander Kovačević ⁵, Svetlana Pelemiš ⁶, Zoran Nedić ⁷, Dragan Družijanić ¹

Оптичка влакна у периметарским системима ТЕХНИЧКЕ ЗАШТИТЕ

Слађана Пантелић¹, Бранка Радојчић²

Апстракт— Тема рада је реализација система техничке заштите у оптичком домену, тј. упознавање са основним концептима примене оптичких влакана у разумевању сензорских система за периметарску заштиту објеката и оптичких мрежа у другим системима техничке заштите (видео надзора, контроле приступа, алармног система,...), који се могу и интегрисати. Периметар је појам који означава затворену линију унутар које се налазештићени простор иштићени објекти. Дат је пример пројектанског решења имплементације периметарског система техничке заштите, применом оптичких компонената. На тај начин, упознајемо карактеристике оптичких елемената система, а са циљем максималног искоришћавања њиховог потенцијала у савременим комуникационим системима. Сврха овог рада је била у опису најчешће коришћених оптичких сензора у системима периметарске заштите објеката, са нагласком на сензоре вибрација, који изазване промене у оптичком сигналу претварају у електрични сигнал погодан за даљу обраду и препознавање алармног стања. Детекција и тачна локализација места притиска, оштећења или прекида оптичког влакна, могућа је применом оптичких мерних метода, што омогућава техничку контролу имплементiranог система техничке заштите.

Кључне речи — оптичко влакно, оптички сензор вибрација, периметарска заштита, алармно стање

I. УВОД

Сталне претње од напада свих врста доводе до важности јачања мера заштите људи, имовине и пословања, као и критичне инфраструктуре објеката од државног интереса. Упркос веома јакој пубер сигурности, објекти морају бити заштићени јаким физичким баријерама, како би се спречили физички напади. Системи за детекцију упада у периметар често су први бедем одбране, па се периметарска заштита пројектује као заштитни обруч, који штити улазне тачке објекта. Наведени системи су напредовали усвојивши новије технолошке трендове, као и интеграцију с другим сигурносним системима (нпр., сензори за ограде и паметна сигурносна расвета). Паметна сигурносна

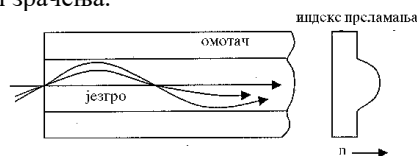
расвета је важан додатни алат у пројектовању целокупне заштите периметра [1].

II. ОПТИЧКА ВЛАКНА И ОПТИЧКИ СЕНЗОРИ

Развој оптичких влакана је ишао у правцу проналажења нових технологија за обезбеђивање све мањих оптичких губитака и могућности производње све дужих и флексибилнијих влакана, као и у правцу повећања брзина комуникација и смањења цене. То је све пратио брз развој извора светлости – ласера и пријемника светла – фотодиода. По цени, оптичко влакно је данас најјефтинији медијум за пренос информација [1-3].

Простирање светлосног снопа кроз оптичко влакно засновано је на принципу преламања светлости. Када светлосни сноп из средине већег индекса преламања (језгро) прелази у средину мањег индекса преламања (омотач), долази до његове рефлексije назад у средину са већим индексом преламања. Деле се на мономодна и мултимодна оптичка влакна.

Мономодна оптичка влакна се користе за реализацију далеких веза, а све више и у локалним мрежама. Пречник језгра им је од 3,5 μm до 10 μm (у зависности од таласне дужине која се користи) а пречник примарног омотача је 125 μm [4]. Због малог пречника језгра код мономодног оптичког влакана не долази до појаве модалне дисперзије, тако да има велики пропусни опсег, који је ограничен само хроматском дисперзијом, Сл. 1. Недостатак му је мали пречник језгра, па захтева извор са компатибилном емитујућом површином и одговарајућим угаоним дијаграмом зрачења.



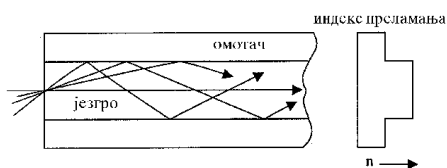
Сл. 1. Простирање светлости кроз мономодно оптичко влакно: изглед пресека влакна, путање и профила индекса преламања.

Код мултимодних влакана примарни омотач је направљен од материјала чији је индекс преламања мањи од индекса преламања језгра. Могу бити са степенастим и градијентним индексом преламања, Сл. 2. и Сл. 3. Влакна са степенастим индексом преламања имају пречник језгра од 50 μm до 1000 μm . То су јефтина оптичка влакна, једноставна су за употребу, али су ограниченог пропусног опсега. Не користе се за потребе преноса података. Градијентно мултимодно оптичко влакно има

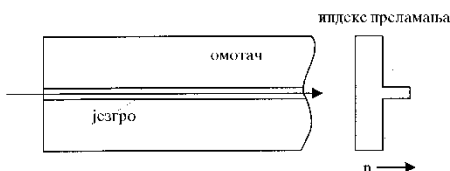
¹ Слађана Пантелић – Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Булевар краља Александра 73, 11120 Београд (e-mail: sladjanapantelic@yahoo.com)

² Бранка Радојчић – Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Булевар краља Александра 73, 11120 Београд (e-mail: br.radojicic@yahoo.com)

параболичан профил промене индекса преламања у материјалу језгра.



Сл. 2. Простирање светлости кроз мултимодно оптичко влакно са степенастим индексом преламања: изглед пресека влакна, путање и профила индекса преламања



Сл. 3. Простирање светлости кроз мултимодно оптичко влакно са градијентним индексом преламања: изглед пресека влакна, путање и профила индекса преламања

Предност мултимодних оптичких влакана је велики пречник језгра, тако да је знатно олакшано убацивање светлости у њих, као и њихово међусобно спајање. Недостатак мултимодних оптичких влакана је појава модалне дисперзије. Она настаје када се оптичка снага убаченог светлосног импулса распореди на све модове у влакно, који се крећу благо различитим брзинама, што доводи до кашњења неких модова на излазу из оптичког влакна, па долази до развлачења импулса. Модална дисперзија се смањује употребом градијентних влакана.

Оптичка влакна се примењују у оптичким сензорима још од 1977. год., и представљају главне елементе у специјалним сензорима за мерење: акустичких величина, магнетских величина, температуре, притиска, брзине, убрзања, итд. Сензори на бази оптичког влакна се деле на интерферометријске (мерена величина изазива интерферентне ефекте) и амплитудске (мерена величина модулише интензитет светлости).

Оптички сензори се састоје од извора светлости и пријемника. Као извори светлости најчешће се користе полупроводничке светлеће диоде - ЛЕД и ласерске диоде - ЛД. Оне дају довољно велику и просторно усмерену оптичку снагу а димензије су им прилагођене димензијама оптичких влакана. Пријемник светлости претвара оптичку енергију у електрични сигнал, а најчешће се користе фотодиоде, фототранзистори и фотоотпорници. Оптички сигнал може бити у подручју видљиве светлости или инфрацрвене и ултраљубичасте светлости, у невидљивом делу спектра [5].

Мерена физичка величина је у вези са одређеним параметром оптичког сигнала, који је у ствари електромагнетски талас фреквенције 1013–1015 Hz. Промена параметара оптичког сигнала сразмерно амплитуди мерене физичке величине, представља модулацију тог сигнала. Основни параметри оптичког сигнала су: амплитуда, фреквенција, фаза, поларизација и расејање светлосног сигнала. Оптички сензори се могу употребити у условима деловања јаког магнетног поља, високе температуре, електричних шума и корозије, па

су много флексибилнији и поузданији од класичних сензора. Лоше особине су им: сложеност израде, обраде сигнала, захтевају оптичку видљивост између пријемника и предајника.

III. ПРИМЕНА И ИНСТАЛАЦИЈА ОПТИЧКОГ ВЛАКНА У ПЕРИМЕТАРСКОМ АЛАРМНОМ СИСТЕМУ

Алармне системе чине уређаји, који упозоравају на нека задата нежељена стања. Постоје различите врсте аларма, светлосни, звучни, вибрирајући, или у облику електронске информације и упозорења од ниске или високе температуре, упозорење на присутност разних плинава, дима, SOS дојаве, затим противпровални и противпрепадни аларми. Алармни системи се углавном имплементирају у комбинацији са савременим системом видео надзора. Најчешћи облик аларма је противпровални, где алармни уређаји светлосно и звучно, разним телефонским, радио, IP или GSM, GPRS, 5G дојавама узбуњују раднике обезбеђења или власнике неке имовине. Један од тих система је и сензорски систем периметарске заштите са оптичким влакнима.

Систем периметарске заштите, који се у основи састоји од једног или више оптичких влакана у улози сензора, већ је добро познат на тржишту техничке заштите. Њихова примена заснована је на провереној поузданости и квалитету перформанси,

Чињеница да оптичка влакна као сензори система, за пренос информација и детекцију аларма не користе електричне сигнале, већ светлост на посебним таласним дужинама, омогућава њихово коришћење на већим удаљеностима при чему су отпорни на муње, високу температуру, корозију, електромагнетне сметње или друге електричне сигнале.

Постоје два главна типа система ране детекције провале на бази оптичких влакана: зонски систем, са традиционалним хардвером и новији, осетљивији, интерферометријски систем који, на основу технике коју примењују, може прецизније и поузданије одредити провалу на огради. Иако су оба наведена система заснована на оптичким влакнима, фундаментални принципи, који стоје иза њих су сасвим другачији, а самим тим и њихове перформансе и примена у пракси.

Како се кроз оптичко влакно преноси светлосни сигнал, било какво савијање или покретање истог, доводи до промена његових преносних особина. Принцип рада је да се, током редовне ситуације у систему периметарске заштите, ласерски емитује једносмерни монохроматски светлосни талас, који се шаље кроз каблирано оптичко влакно, уграђено дуж ограде (на врху ограде или у њеном средњем делу). Након рефлексије, рефлектовани светлосни талас се враћа до пријемника ради утврђивања мирног стања, односно стања без аларма. Када дође до илегалног напада тј. када неко покуша да се попне уз ограду, оптички кабл почиње да се физички помера, при чему се особине светлости, која путује оптичким влакном мењају. Тада се у систему, тј. пријемнику, детектује промена интензитета пренесене светлости, па ако иста пређе неки, унапред постављени, праг или се поклопи са одређеним дефинисаним критеријумима, подиже се стање

аларма. При томе се у обзир узимају и прате најважније карактеристике рефлектоване светлости, чије промене подразумевају снагу, фазу, таласну дужину, поларизацију и дисперзију [6].

На основу наведеног може се рећи да су ови сензорски системи подложни утицају најразличитијих сметњи (ветар, микросеизмичко подрхтавање тла, град, пролазак возила, итд.). Да би се у великој мери онемогућиле појаве лажних аларма, за повећање отпорности на буку користе се сложени алгоритми за препознавање, имплементирани помоћу уграђених микропроцесора.

Могућа алармна стања периметарских сензора са оптичким влакнима, сврставамо у четири категорије:

- аларм за упад: покушај илегалног уласка који изазива вибрације оптичког влакна;

- аларм за прекид жице: прекид оптичког кабла сензора;

- аларм за растављање: незаконито растављање или уништавање на местима спојева оптичких влакана;

- квар у комуникацији: комуникацијски оптички кабл је искључен.

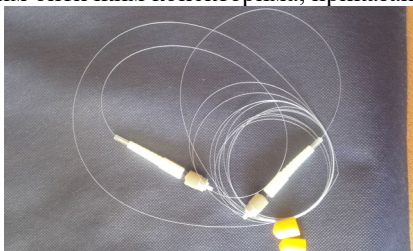
На Сл. 4., је као пример приказан изглед периметарске оgrade, изграђене крајем 2018. год., између Крима и Украјине. Ограда је дужине 60 километара и састоји се од неколико типова барикада, различитих типова сензора, видљивих и скривених система видео надзора, укључујући и инфрацрвену опрему. Уграђен је и систем сензора осетљивих на вибрације [7].



Сл. 4. Ограда опремљена сензорима између Крима и Украјине

IV. УТИЦАЈ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА НА МОНОМОДНО ОПТИЧКО ВЛАКНО КОЈЕ СЕ КОРИСТИ У ПЕРИМЕТАРСКОЈ ЗАШТИТИ

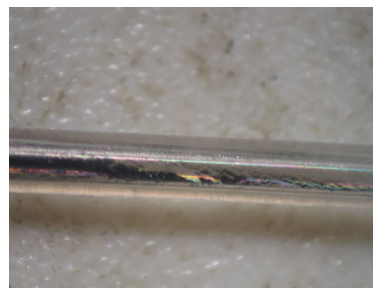
У експерименталном делу, извршено је испитивање утицаја ласерског зрачења на комерцијално мономодно оптичко влакно ($9/125 \mu\text{m}$), које се користи у периметарској заштити. Израђени оптички спојни кабл, са постављеним оптичким конекторима, приказан је на Сл.5.



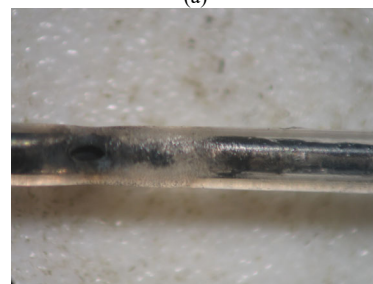
Сл. 5. Оптички спојни кабл од мономодног оптичког влакна са FC/PC конекторима на крајевима.

Комерцијална оптичка влакна могу бити сачињена од различитих материјала. Један од типова оптичких влакана су вишеккомпонентна стаклена оптичка влакна, чије језгро и омотач чине стакла различитог хемијског састава. Добијају се стапањем ултрачистих прахова. Стакла, која чине омотач и језгро одвојено се стапају, а затим спајају у компактно влакно у специјално конструисаном двоструком тиглу. Најчешће коришћена оптичка влакна су такозвана PCS (polymer coated silica), коју чини влакно од допираног кварцног стакла са заштитном полимерном превлаком [8-10].

Приказани оптичко влакно је изложено $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ импулсном ласерском снопу. Ласер је комерцијалног типа са могућношћу промене и енергије импулса и густине снаге (од неколико J, понављањем од 1 до 10 Herz). Генерално, средња снага је била у опсегу kW. Интеракција снопа и узорка изведена је у ваздушној атмосфери (обични услови) са упадним углом од 90° . Интеракција је вршена са једним (Сл. 6. (a)) или више импулса у једној тачки (Сл. 6. (б)).



(a)



(б)

Сл. 6. (a) Микроскопски снимак интеракције оптичког влакна са једним импулсним снопом $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ласера; (б) Микроскопски снимак интеракције оптичког влакна са више импулсних снопова $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ласера.

На основу приказаног на Сл. 6. и видних оштећења на оптичком влакну, може се закључити да оптичка влакна нису отпорна на утицај ласерског зрачења. Околност, која ову чињеницу олакшава је да су мономодна оптичка влакна изузетно малих пречника језгра, па је вероватноћа да се влакно погоди на периметарској огради, и на тај начин оштети, је мала.

V. ЗАКЉУЧАК

На основу наведеног, може се очекивати да ће напредак технологије оптичких сензора у будућности довести до

раста сектора заштите периметра. Међутим, оптички сензори су већ међу најпопуларнијим технологијама на тржишту система за заштиту периметра, било да се ради о онима који се постављају на ограде или технологији за детекцију вибрација. Интеграција оптичких сензора за ограде с другим системима техничке заштите, као што је на пример паметно осветљење, омогућава и нове функције и апликације. Интелигентно осветљење може реаговати на периметарске упаде прилагођавањем интензитета светлости или стробирањем у угроженим зонама, чиме се повећавају могућности одвраћања и процене претње. Једна од најважнијих предности оптичких сензора за заштиту периметра је да су идеални за уградњу у већ постојеће-изграђене периметарске ограде, тј. за надоградњу већ имплементираних система, што значајно утиче на смањење финансијских трошкова инвеститора.

Експерименталним радом је утврђено да оптичка влакна нису отпорна на утицај ласерског зрачења али су изузетно малих пречника језгра, па је вероватноћа да се влакно погоди на периметарској огради, и на тај начин оштети, је мала.

the optical elements of the system, with the aim of maximizing their potential in modern communications systems. The purpose of presented paper was to describe the commonly most used optical sensors in perimeter security systems, with emphasis on sensors (for vibration), which convert induced changes in the optical signal into an electrical signal suitable for further processing and alarm detection. Detection and accurate localization of the place of pressure and damage or interruption of the optical fiber are possible by applying optical measurement methods, which enables technical control of the implemented technical protection system

Fiber optics in perimeter technical protection systems

Слађана Пантелић, Бранка Радојчић

ЛИТЕРАТУРА

- [1] T. Nakahara, M. Hoshikawa, T. Sugawa, M. Watanabe, "Fiber Optics" from *Ulmann's Encyclopedia of industrial chemistry*, Fifth, Completely Revised Edition, Vol. A10 (1990), pp. 433-450.
- [2] Ramaswami R., Sivarajan N. K., Sasaki H. G., "Optical Networks", Third Edition, Morgan Kaufmann, Elsevier, USA, 2010.
- [3] С. Пантелић, „Анализа оптичких ефеката на растављивим и нерастављивим спојевима оптичких влакана”, COBISS.SR-ID 228185868, ISBN 978-86-7466-652-4, Београд: Академска мисао, 2016.год., 179 стр., тираж 200.
- [4] А. Маринчић, "Оптичке телекомуникације", Универзитетски уџбеници 39, пп.290-6. и 205-8. Београд, 1997.
- [5] С. Пантелић, „Оптичке појаве на оптичким влакнима и спојевима оптичких влакана”, COBISS.SR-ID 228184332, ISBN 978-86-7466-653-1, Београд: Академска мисао, 2016.год., 120 стр., тираж 200.
- [6] Carlson C., "Fiber's Role in the Video Security&Surveillance Network", http://www.bicsi.org/pdf/winter_2010/Curt_Carlson.pdf, 03.05.2015.
- [7] Извор дневна штампа „ПОЛИТИКА”, рубрика Свет, петак, 28.12.2018. у 13:49.
- [8] А. V. Ivanov, *Pročnost optičeskih materialov*, Mašinstroenie, Leningrad, 1989. (In Russian)
- [9] R. M. Wood, *Laser Damage in Optical Materials*, Adam Hilger, Bristol, 1986.
- [10] A.A.Mak, L.N.Sopms, V.A.Fromntel, V.E.Yašin, *Lazeri na neodimovom stekle*, Nauka, Moskva, 1990.

ABSTRACT

The topic of the paper is the realization of technical protection systems in the optical domain, i.e introductions to the basic concepts of optical fiber application in the understanding of sensor systems for perimeter protection of buildings and optical networks in other technical protection systems (video surveillance, access control, alarm system,). These systems can also be integrated. Perimeter is a term that denotes a closed line within which there are protected areas and protected objects. An example of a design implementation solution is given. In this way, we get to know the characteristics of

FIZIČKA I NEDESTRUKTIVNA ISPITIVANJA KERAMIČKIH MATERIJALA ZA OBLAGANJE SA ASPEKTA TRAJNOSTI

Zoran Stević¹, Aleksandar Savić², Milica Vlahović³, Sanja Martinović³, Tatjana Volkov-Husović⁴

Apstrakt— U radu su prikazane osnovne metode ispitivanja materijala, koje mogu poslužiti prilikom prve faze procene kvaliteta materijala, nakon degradacije usled vremena ili drugih faktora koji mogu izmeniti fizičko-mehanička svojstva materijala. Nedestruktivna metoda ispitivanja pomoću praćenja brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa upotrebljena je radi ilustracije mogućeg pristupa pri proceni kvaliteta različitih tipova keramičkih materijala za oblaganje.

Ključne reči— keramičke pločice, metoda ultrazvučnog impulsa, zapreminska masa, korelacija

1. UVOD

Pod pojmom keramika se podrazumeva veliki broj raznovrsnih proizvoda koji se dobijaju pečenjem gline, kao osnovne sirovine [1]. U pogledu kompaktnosti mase, keramički proizvodi se mogupodeliti na: proizvode sa poroznom masom i proizvode sa polustopljenom masom. U slučaju da je upijanje vode kod keramičkog proizvoda veće od 5% u pitanju su proizvodi sa poroznom masom, a u slučaju da je upijanje vode manje od 5% proizvodi se karakterišu kao proizvodi sa polustopljenom masom. Za proizvode sa polustopljenom masom je karakterističnija temperatura pečenja, a koja se kreće u intervalu 1200-1400°C.

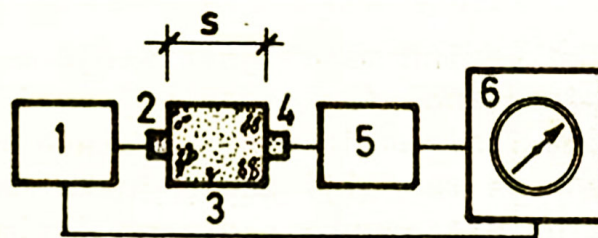
Tehničke karakteristike keramičkih materijala za oblaganje prvenstveno zavise od njihove primene. Zahtevana svojstva i njihove vrednosti mogu varirati u funkciji od toga da li se radi o unutrašnjim ili spoljašnjim oblaganjima, odnosno u zavisnosti od toga da li se oblažu zidovi ili podovi [2]. Ova svojstva uključuju zapreminsku masu, stalnost geometrije, boju, teksturu, otpornost na pojavu vlasavosti, otpornost na delovanje razblaženih kiselina i baza, čvrstoću pri savijanju, tvrdoću i sl. Ispitivanja ovih materijala zahtevaju specifičan pristup i poznavanje šireg spektra standardne i nestandardne metodologije, između ostalog i nedestruktivnih i destruktivnih postupaka ispitivanja [3]. Posebno su od interesa ispitivanja

kada se radi o materijalima koji su u svom eksploatacionom veku izloženi visokim temperaturama [4].

Zapreminska masa, čvrstoće i mehaničke otpornosti nekog materijala, kao i njegova trajnost i promena svojstava sa vremenom mogu se pratiti i povezati sa odgovarajućim nedestruktivnim metodama ispitivanja, u koje spada i metoda ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa kroz materijal. Treba naglasiti, međutim, da se kod ispitivanja svojstava materijala putem metoda bez razaranja traženo svojstvo unajvećem broju slučajeva ne meri direktno, već se postupak svodi na merenje neke druge fizičke veličine kojaje u funkcionalnoj vezi sa datim - traženim svojstvom.

Kao što je poznato, pod ultrazvukom se podrazumevaju vibracije iste prirode kao i zvuk, ali vrlo visokih frekvencija - koje ljudsko uho nije u stanju da registruje. Ove vibracije, koje u suštini imaju mehanički karakter, odlikuju frekvencije > od 20000 Hz (20kHz). Za dobijanje ultrazvuka najčešće se primenjuje piezoelektričnimetod, koji se zasniva na sposobnosti pojedinih kristalnih tela da pod dejstvom električne struje menjaju svoje dimenzije i na tajnačin proizvode visokofrekventne impulse. Ovi kristali imaju i sposobnost ispoljavanja suprotnog efekta: da pod uticajem visokofrekventnih impulsa dolazi do njihovog naelektrisanja (piezoeffekat).

U praksi (slika 1), ultrazvučni impulsi se dobijaju primenom specijalnih generatora impulsa (1); za unošenje impulsa u element koji se ispituje služe posebni predajnici (2); primenom ovih predajnika provode se UZ impulsi kroz ispitivani materijal (3) do prijemnika (4), pri čemu dolazi do prenosa podužnih, poprečnih ili površinskih ultrazvučnih talasa; primljeni impulsi pojačavaju se putem pojačavača (5) i šalju na indikator vremena (6).



Slika 1: Osnovni princip funkcionisanja ultrazvučne aparature

Promena svojstava materijala usled uticaja spoljašnje sredine najčešće je degradacionog tipa, što znači da se svojstva najčešće pogoršavaju sa vremenom. Osim što je moguće pratiti i porediti svojstva jedne vrste materijala i njihovu promenu primenom nedestruktivnih metoda ispitivanja, moguće je pratiti i promenu tj. pad svojstava materijala sa vremenom, ili utvrditi odstupanja izmerenih vrednosti u datom trenutku u odnosu na pojedinačne poznate i očekivane vrednosti za taj materijal u datom trenutku, primenom matematičkih, u prvom redu statističkih metoda [5]. Pravovremeno ispitivanje i praćenje svojstava već ugrađenih

¹Zoran Stević – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor (<https://orcid.org/0000-0002-1867-9360>);

²Aleksandar Savić – Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd; (<https://orcid.org/0000-0002-1777-6775>);

³Milica Vlahović – Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Karnedžijeva 4, Centar za materijale i metalurgiju, Karnegijeva 4/I, 11120 Beograd, (<https://orcid.org/0000-0002-7893-9101>).

⁴Sanja Martinović – Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Karnegijeva 4/I, Centar za materijale i metalurgiju, Karnegijeva 4/I, 11120 Beograd, (<https://orcid.org/0000-0001-8040-407X>);

⁵Tatjana Volkov-Husović – Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4/I, 11120 Beograd, (<https://orcid.org/0000-0002-2667-5802>).

keramičkih materijala je posebno važno ukoliko se radi o objektima od velike važnosti za zajednicu [6]. Nakon eksploatacije u konstrukciji, keramički materijali se mogu ponovo upotrebljavati, što je veoma važno sa aspekta ekološkog i održivog pristupa u građevinarstvu [7]. U tom slučaju njihovo praćenje i karakterizacija u eksploataciji postaju prvi korak za prvu upotrebu ovih materijala u drugom, recikliranom, obliku.

U radu je prikazana metoda merenja brzine propagacije ultrazvučnih impulsa kroz pet različitih keramičkih materijala za oblaganje, u okviru modela materijala koji je upotrebljavan ranije. Prikazani rezultati predstavljaju početnu fazu obimnijeg istraživanja.

2. MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA

Ispitivani materijal predstavljaju keramičke ploče za oblaganje, starosti preko 20 godina, izrađene sa različitim pigmentima (slika 2). Pomenute ploče nisu izlagane eksploatacionim uslovima. Pre ispitivanja je svaki od uzoraka pregledan u cilju utvrđivanja vizuelnih tragova destrukcije ili drugih nedostataka. Konstatovano je da su uzorci kompaktni, pravilnih ivica i očuvani.



Slika 2: Ispitivani uzorci keramičkih materijala za oblaganje

Za ispitivanje zapremine mase korišćeni su digitalno pomično merilo marke MESSZEUGE nemačke proizvodnje, opsega 150 mm kao i vaga KERN kapaciteta 35 kg i podatka 0,1 g. Rezultati ispitivanja dimenzija i mase prikazani su u tabeli 1. Prikazani rezultati merenja dimenzija predstavljaju prosečne vrednosti dobijene na osnovu najmanje tri merenja. Za ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa upotrebljena je ultrazvučna aparatura italijanske proizvodnje, proizvođača MATEST. Pre samog ispitivanja je na ispitivane uzorke naneta odgovarajuća količina kontaktnog agensa, kako bi se eliminisao sloj vazduha na kontaktu uzoraka sa sondama ultrazvučne aparature, nakon čega je izvršeno merenje. Prosečne vrednosti merenja dobijene na osnovu četiri merenja (po dva na dva upravna pravca) prikazane su u tabeli 1.

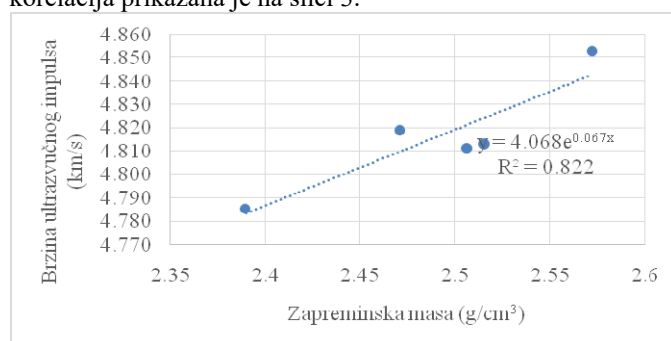
Tabela 1. Vrednosti dimenzija, mase, zapremine mase i brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih keramičkih materijala

Uzorak br.	1	2	3	4	5
Masa (g)	240,7	250,2	247,7	242,2	253,7
Dimenzije a×b×h (mm)	80,86×	81,53×	81,31×	81,83×	81,44×
	81,21×	81,10×	81,35×	82,13×	80,90×
Zapreminska masa (g/cm ³)	2,516	2,572	2,507	2,390	2,472
Brzina ultrazvučnog impulsa (km/s)	4,813	4,853	4,811	4,785	4,819

3. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISPITIVANJA

Na osnovu ispitivanja koja su sprovedena na ispitivanim uzorcima utvrđeno je da zapremine mase uzoraka variraju u relativno malim granicama od 2,390 g/cm³ do 2,572 g/cm³ sa prosečnom vrednošću od 2,491 g/cm³. Takođe, utvrđeno je da brzine ultrazvučnog impulsa dobijene na ispitivanim uzorcima variraju u relativno malim granicama od 4,785 km/s do 4,853 km/s sa prosečnom vrednošću od 4,816 km/s.

U cilju procene korelacije i trenda promene svojstava, izvršena je regresiona analiza korelacije zapremine mase i brzine ultrazvučnog impulsa kroz ispitivane uzorke. Pomenuta korelacija prikazana je na slici 3.



Slika 3. Korelacija između zapremine mase i brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih keramičkih materijala za oblaganje. Iz priložene slike se može zapaziti da korelacija relativno pouzdanog tipa može omogućiti praćenje trenda promene svojstava. U ovom slučaju, za ispitivano svojstvo može se usvojiti zapreminska masa, te se na osnovu konkretne metode nedestruktivnog ispitivanja može dati načelna procena gubitka (pada) zapremine mase usled degradacije materijala kroz vreme i dobiti prva procena ispitivanih uzoraka u funkciji od vremena.

ZAKLJUČCI

U radu su prikazani rezultati početne faze šireg istraživanja, koji se bave nedestruktivnim ispitivanjima keramičkih materijala veće starosti, sa aspekta praćenja svojstava u eksploataciji, sa vremenom ili usled dejstva agresivne sredine u kojoj se ti materijali mogu naći.

Napominje se da bi svakako pri ispitivanjima trebalo proceniti i očekivane vrednosti merne nesigurnosti, kako bi se sagledao karakter i stepen pouzdanosti samog merenja. Veliki stepen merne nesigurnosti u različitim slučajevima merenja može dovesti do značajnog pada pouzdanosti rezultata ispitivanja. Iz tog razloga je u svakom ispitivanju potrebno identifikovati i uzeti u obzir sve faktore merne nesigurnosti.

Konačno, treba napomenuti da nedestruktivna ispitivanja građevinskih materijala ne mogu dati jednoznačne odgovore na pitanja njihovog kvaliteta, odnosno da se ne mogu uzeti kao merodavna kod izvođenja zaključaka o trajnosti ili

stepenu degradacije koji je nastupio kod bilo kog tipa građevinskih materijala.

Međutim, iako je konstatovano da ispitivani uzorci imaju relativno ujednačen kvalitet i da se može dati generalna ocena da njihova svojstva nisu značajno degradirala sa vremenom, ukazuje se na mogućnost praćenja i približne inicijalne procene svojstava sličnim metodama u laboratorijskim ili *in situ* uslovima. Na ovaj način se u većem skupu ispitivanih uzoraka može utvrditi oblast od interesovanja ili odgovarajući podskup uzoraka za detaljniju i opsežniju analizu sa aspekta trajnosti, uključujući neke od destruktivnih metoda ispitivanja.

LITERATURA

- [1] M. Muravljev: Građevinski materijali, Građevinska Knjiga, Beograd, 2000.
- [2] M. Muravljev, D. Jevtić, Građevinski materijali 2, Akademska misao, Beograd, 2014
- [3] Vlahović M., Martinović S., Stević Z., Savić A., Volkov-Husović T., Examining erosion resistance of ceramics for electrical engineering applications, Union of Mechanical and Electrotechnical Engineers and Technicians of Serbia (SMEITS) Society for Renewable Electrical Power Sources Kneza Miloša str. 7a/II, 11000 Beograd, 2019 pp. 25-30
- [4] Simić M., Alil A., Martinović S., Vlahović M., Savić A., Volkov-Husović T., High temperature materials: properties, demands and applications, Hem. Ind. 74 (4) 273-284 (2020), UDK: 666.3: 697.1:621.315.61, <https://doi.org/10.2298/HEMIND200421019S>
- [5] J. Mališić, V. Jevremović, Statističke metode u meteorologiji i inženjerstvu, Univerzitet u Beogradu, Univerzitet u Novom Sadu, Beograd, 2014
- [6] Zakić D., Savić A., Aškrabić M., Lukičić M., Jevtić D.: Ispitivanje svojstava materijala i sistema za unutrašnje oblaganje kupole Spomen hrama svetog Save, Zbornik radova sa Međunarodnog simpozijuma o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, 2017, 307-316, ISBN 978-86-87615-08-3
- [7] Jevtić D., Markićević J., Savić A.: Spravljanje i primena keramičkog betona – ekološka potreba savremenog društva, GNP 2008., Drugi internacionalni naučno-stručni skup Građevinarstvo – nauka i praksa, Zbornik radova, knjiga 2, str 841-846, Žabljak, mart 2008., ISBN 978-86-82707-15-8;

Суб-микрометарске паралелне површинске структуре индуковане фемтосекундним ласерским снопом у форензици

Александер Ковачевић, Сузана Петровић, Марина Лекић, Борислав Васић, Бранислав Салатић, Јелена Поточник

Анстракт— Један од ефеката интеракције ултра-кратког ласерског снопа са материјалима је формирање паралелних структура на површини (laser-induced parallel surface structures - LIPSS), чији је период мањи од таласне дужине снопа. Уколико се ради о вишеслојним танким филмовима метала, квалитет формираних структура је бољи. Узорак од пет двослојних танких филмова Al и Ti на супстрату Si смо изложили фемтосекундном снопу и запазили формирање две врсте структура које се разликују по облику. Обе су врсте вероватно узроковане појавом површинског плазмона-поларитона на површини најгорњег слоја. Појава плазмона поларитона на површини танких металних филмова и наночестица може да ограничи простирање електромагнетног поља и да појача флуоресцентни сигнал из молекула хемикалије на површини. У зависности од структуре интерфејса за одређивање циљне хемикалије на металној површини флуоресценција побољшана плазмоном (plasmon-enhanced fluorescence, PEF) је привлачан метод за скраћење времена и појачање осетљивости разних аналитичких технологија које се користе у форензици.

Кључне речи— фемтосекундни ласер; вишеслојни танки филмови; периодичне површинске структуре; флуоресценција.

I. УВОД

Интеракција ласерског снопа са површином проузрокује многе ефекте, међу којима је у последње време пажњу закупило формирање паралелних структура (LIPSS – laser induced parallel surface structures) под дејством ултракратких снопова [1]. Због карактеристике да им је периодичност мања од таласне дужине снопа, поље примене је веома широко [2]. Интеракција са металима може побољшати триболошке карактеристике, а на ламеларним материјалима, као што

Александер Ковачевић – Институт за физику Универзитета у Београду, Прегревица 118, 11080 Београд, Србија (e-mail: aleksander.kovacevic@ipb.ac.rs).

Сузана Петровић – Институт за нуклеарне науке „Винча“ Универзитета у Београду, ПП 522, 11351 Београд-Винча, Србија (e-mail: spetro@vin.bg.ac.rs).

Марина Лекић – Институт за физику Универзитета у Београду, Прегревица 118, 11080 Београд, Србија (e-mail: marina.lekic@ipb.ac.rs).

Борислав Васић – Институт за физику Универзитета у Београду, Прегревица 118, 11080 Београд, Србија (e-mail: bvasic@ipb.ac.rs).

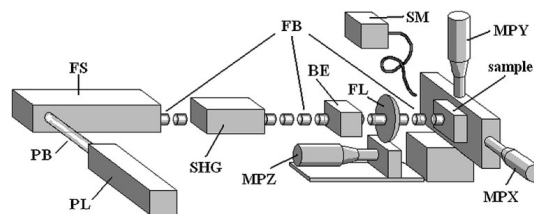
Бранислав Салатић – Институт за физику Универзитета у Београду, Прегревица 118, 11080 Београд, Србија (e-mail: banes@ipb.ac.rs).

Јелена Поточник – Институт за нуклеарне науке „Винча“ Универзитета у Београду, ПП 522, 11351 Београд-Винча, Србија (e-mail: jpotocnik@vin.bg.ac.rs).

су вишеслојни танки метални филмови, формирани LIPSS има добар квалитет и може да побољша особине површине [3-4]. Снопови различитих карактеристика (флуенца, таласна дужина, дужина импулса, поларизација, ...), разни материјали (диелектрици, полупроводници, метали, ...), али и стање амбијента током интеракције – све то утиче на карактеристике LIPSS [5]. Генерално, уочена је појава две врсте структура, са нижом просторном учестаношћу (LSFL – low spatial frequency LIPSS) и са вишом просторном учестаношћу (HSFL – high spatial frequency LIPSS) [6].

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА

Узорци који су коришћени су добијени депоновањем Al и Ti на подлогу од Si (1 0 0) помоћу Balzers Sputron II апарата који користи 1,3 keV аргонске јоне и са 99.9% чистоте Al и Ti мета. Две врсте узорака су подвргнуте интеракцији са фемтосекундним снопом. Први тип је био силицијумска подлога на којој је депоновано пет Al/Ti двослоја чиме је достигнута укупна дебелина од ~130 nm (сваки слој од ~13 nm). Други тип је такође био силицијумска подлога, али на којој је био депонован један слој Al дебелине ~130 nm.

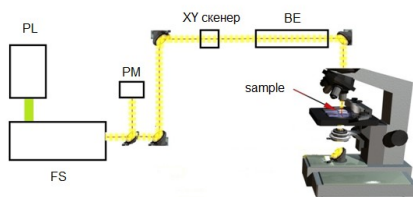


Сл. 1. Дијаграм експерименталне поставке за статичну интеракцију; PL – ласер за пумпање, PB – снап за пумпање, FS – извор фемтосекундног снопа, FB – фемтосекундни снап, SHG – удвајач учестаности, BE – проширивач снопа, FL – фокусирајуће сочиво, MPX/MPY/MPZ – микропозиционери, SM – спектрометар, sample - узорак.

Извор фемтосекундног снопа је био Coherent Mira 900F систем чија је фреквенција удвојена са Inrad 5-050 ултрабрзим генератором другог хармоника. Карактеристике снопа су биле: таласна дужина 390 nm (удвојено) и 800 nm (основни хармоник), дужина импулса ~150 fs, репетиција 76 MHz (период између импулса ~13 ns), снага на мети 160–260 mW, линеарна поларизација у

горизонталној равни, Гаусов елиптични профил. Експозиције су биле од 1 до 10 s. Таласна дужина снопа је контролисана фибер-оптичким спектрометром Ocean Optics HR2000CG-UV-NIR. Интеракције су обављане у ваздуху фокусирањем фемтосекундног снопа под нормалним углом на површину првог слоја узорка (Al), сл. 1. Резултати су анализирани скенирајућим електронским микроскопима (SEM) JEOL JSM 6560 LV који има Oxford Instruments EDS анализатор и FEI SCIOS2, као и помоћу микроскопа атомских сила (AFM) NT-MDT NTEGRA Prima.

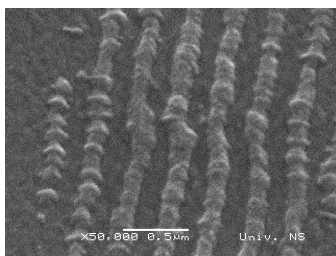
На сл. 2 је дијаграм поставке модификоване за потребе скенирања снопа преко узорка. Изостављен је удвајач учестаности, чиме је интеракција пренесена у блиску инфрацрвену област, ради скенирања се сноп уводи у огледални 2D скенер и у проширивач снопа, а фокусирање се обавља објективом модификованог микроскопа (40 \times , NA=0,65).



Сл. 2. Дијаграм експерименталне поставке за интеракцију уз скенирање снопом; PL – ласер за пумпање, FS – извор фемтосекундног снопа, PM – мереље снаге снопа, XY скенер – скенер снопа, BE – проширивач снопа, sample - узорак.

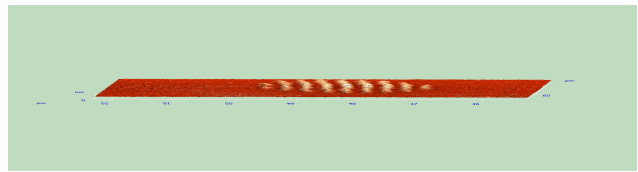
III. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На сл. 3 је приказ слике SEM дела области интеракције са 5 \times (Al/Ti). Фемтосекундни сноп таласне дужине 460 nm је имао флуенцу од 13,6 mJ/cm² а време експозиције 10 s. У области интеракције се виде паралелне структуре са периодом од око 300 nm. Структуре су формиране у виду издигнућа на површини.



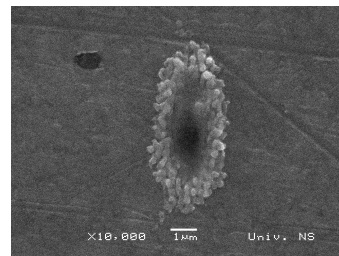
Сл. 3. Приказ слике SEM дела области интеракције са 5 \times (Al/Ti) на Si; флуенца 13,6 mJ/cm² и 10 s време експозиције.

На сл. 4 је приказана AFM слика области интеракције приказаној на сл. 2. Овде се боље види да су структуре формиране као издигнућа на површини.



Сл. 4. Приказ AFM слике дела области интеракције приказане на сл. 2: 5 \times (Al/Ti); флуенца 13,6 mJ/cm² и 10 s време експозиције.

Узорак другог типа – један слој танког филма (~130 nm) Al – је био изложен флуенци од 8,6 mJ/cm² исте таласне дужине и времену експозиције од 10 s. Резултати у виду слике SEM дела области интеракције су приказани на сл. 5. У централном делу је дошло до аблације топљењем, а аблирани материјал се распоредио у околини централне зоне интеракције. Дошло је до расподеле у виду LIPSS, али квалитет облика није тако добар као у случају првог узорка. Просторни период структура је око 300 nm.



Сл. 5. Приказ слике SEM области интеракције са Al на Si; флуенца 8,6 mJ/cm² и 10 s време експозиције [4].

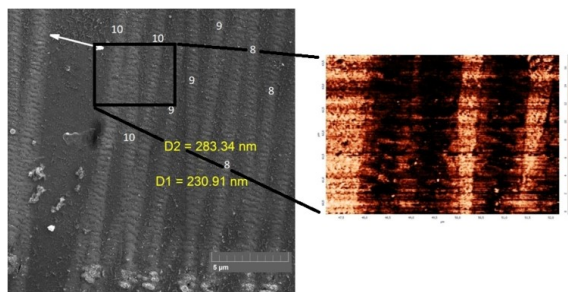
Упадни ултракратки сноп изазива на интерфејсу између металне и диелектричне површине појаву површинског плазмона (SP), а његовом интеракцијом са упадним снопом долази до формирања површинског плазмона поларитона (SPP) [2, 7], који узрокује статичну периодичну расподелу енергије на површини, периода мањег од таласне дужине упадног снопа. Дубина продирања ласерског снопа од 390 nm се израчунава [8] за Al на око 3 nm, а за Ti на око 9,3 nm.

Присуство подслоја Ti узрокује повећање прага оштећења првог (горњег) слоја, Al. Температура решетке се формира кроз два механизма: електронско-фононски (који узрокује локализацију загревања), и транспорт електронима везан за топлотну проводност електрона (који односи топлоту од зоне интеракције) [9]. Разлика у електронско-фононској спреси између два материјала води до стрме промене температуре решетке унутар подслоја (Ti). Као последицу, електрони из горњег слоја (Al) брзо преносе енергију следећем (подслоју) и тиме се термална енергија преноси кроз интерфејс Al/Ti, спреже са решетком и на тај начин односи из зоне интеракције. У првом следећем слоју (подслој, Ti) долази до гомилања термалне енергије периодично у латералном смеру, али због високе температуре топљења Ti не долази до топљења. Праг оштећења првог слоја је тиме повећан јер се енергија углавном гомила у првом подслоју, који већ

има висок праг оштећења. Одсуство подслоја Ti омогућава гомилање енергије у слоју Al и изражено топљење (сл. 5).

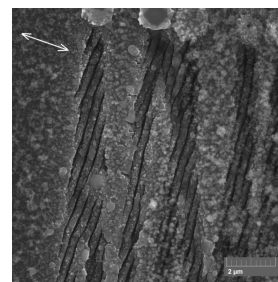
У поређењу са Al/Ti вишеслојним узорком, оптичка дубина продирања за Al је нижа, што резултује већим вредностима апсорбоване енергије и акумулације топлоте. Топљење и аблација су израженији него код вишеслојног.

Осим статичког озрачивања, вршена су и динамичка, када је снап скениран преко површине узорка. У овом случају је таласна дужина била 800 nm, а флуенца 153 mJ/cm². На одређеним правцима је скенирање извршено вишеструким прелетом снопа преко површине узорка; на сл. 6 је приказана област дела интеракције где је снап скениран 8, 9 и 10 пута. Просторни период структуре је око 283 nm (мање од половине таласне дужине упадног снопа). У инсету на сл. 6 је приказана AFM слика дела интеракције, формирана по интензитету тунелске струје између врха пробе и узорка. Примећује се да је струја кроз формиране структуре (формиране у виду уздигнућа на површини) мања (еквивалентно тамнијој боји) него струја у деловима који нису трансформисани (светлија боја). То наводи на закључак да је дошло до смањења проводности у тим деловима, за које се може претпоставити да је узрок јача оксидација која је услед већег гомилања енергије.



Сл. 6. Приказ слике SEM (лево) и AFM (инсет-десно) дела области интеракције 5x(Al/Ti) на Si; поновљено скенирање, 8—10 пролаза, флуенца 153 mJ/cm²; бројеви 8, 9 и 10 представљају број прелета снопа преко истог правца; правац поларизације је означен белом стрелицом.

Модел изложен у [10] предлаже формирање једне врсте LIPSS на металним површинама интеракцијом са ултракратким снопом у ваздуху. У првом кораку расејање на површинским нерегуларностима индукује појаву SPP и периодичне расподеле енергије на површини. У другом кораку, на местима где се енергија акумулира долази до загревања и реакције метала са кисеоником из ваздуха. Због ултракратког импулса је оксидација бржа од термалне дифузије, и дебљина оксида расте на местима акумулиране енергије. Тиме се одржава нанометарска локализација. Како структура расте у висину, расејање се појачава и тиме је остварена позитивна повратна спрега. У трећем кораку – како структура расте – због све већег присуства оксида се смањује продирање кисеоника у структуру и тиме се цели процес зауставља. Трећи корак има негативну повратну спрегу.



Сл. 7. Приказ слике SEM дела области интеракције 5x(Al/Ti) на Si; поновљено скенирање, 10 пролаза, флуенца 215 mJ/cm²; правац поларизације је означен белом стрелицом.

На сликама 3 и 6 је приказано формирање једне врсте LIPSS, „гребен“, настале оксидацијом и надоградњом материјала. Првац простирања гребенских LIPSS је паралелан правцу поларизације упадног снопа (HSFL). За нешто веће флуенце снопа, сл. 7, долази до аблације материјала, а у аблираној области се појављује друга врста LIPSS, „канални“. Таласна дужина је 800 nm, флуенца 215 mJ/cm², а као резултат је просторни период од 370 nm. Ширина канала је 80 nm. Аблација је наступила услед топљења/испаривања материјала. Правац каналских LIPSS управан на правац поларизације упадног снопа (LSFL).

Појава плазмона – колективне осилације наелектрисања и придруженог електромагнетног поља на површини металних филмова и наноструктура – омогућава ограничење простирања светлости у мале области и тиме је дало нова решења у оптичким спектроскопијама, као што су површински-побољшана Раманова спектроскопија (in surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS) површински-побољшана инфрацрвена спектроскопија (surface-enhanced infrared spectroscopy, SEIRA) и плазмонски-побољшана флуоресцентна спектроскопија (surface plasmon-enhanced fluorescence spectroscopy, PEF), које се користе у низу форензичких аналитичких технологија за детекцију хемијских и биолошких агенаса релевантних у важним областима медицинске дијагностике, контроле хране и безбедности [12]. У PEF се флуорофорни означивачи спрежу са ограниченим пољем површинских плазмона што се може конструисати да веома појача интензитет емитованог флуоресцентног светла ради детектовања врло малих количина анализата са побољшаном границом детекције и скраћењем времена анализе. Просторно преклапање и усклађивање фазе између поларитона води до успостављања спрегнутих симетричних и антисиметричних модова површинског плазмона поларитона. Симетрични тип мода се може побудити на металним површинама са густим решеткама испод нивоа дифракције. Дифракција на таквој периодичној модулатији дозвољава да плазмони поларитони који се простиру у супротном смеру интерагују, стварајући појачане интензитета поља локализоване или у удубљењима („канални“) решетке или на врховима („гребени“) периодичне модулатије.

IV. ЗАКЉУЧАК

Приказано је испитивање површинских модификација индукованих на танким филмовима – узорци од пет (Al/Ti) бислојева (укупне дебљине 130 nm) на Si као и узорци од једнослојног Al (дебљине 130 nm) на Si – помоћу фемтосекундног ласерског снопа таласне дужине од 390 nm и 800 nm и репетиције 76 MHz (~13 ns између импулса). За статичку интеракцију су формиране површинске периодичне структуре (LIPSS) на вишеслојном Al/Ti при флуенци једног импулса од 10,3–14 mJ/cm², а на једнослојном Al при флуенци једног импулса од 8,6 mJ/cm². Присуство подслоја повећава праг оштећења најгорњег слоја, што побољшава квалитет формираних LIPSS. За динамичку интеракцију (скенирање снопа преко површине узорка) за 153 mJ/cm² је дошло до формирања гребенских LIPSS, а за већу флуенцу једног импулса, 215 mJ/cm², до каналских LIPSS. На основу правца простирања LIPSS се закључује њихова врста, LSFL (ниске просторне учестаности) или HSFL (високе просторне учестаности). За формирање LIPSS се механизам се види у појави површинског плазмона поларитона који изазива периодичну расподелу енергије. Присуство подслоја одговарајућих термичких карактеристика омогућава лако преношење термалне енергије у дубље слојеве. Код гребенских LIPSS има три корака везаних за продирање кисеоника из ваздуха у материјал (оксидација), док код каналских LIPSS долази до аблације топљењем/испаривањем и уклањања материјала.

Појава плазмона поларитона је важна при неким флуоресцентним техникама, као што је PEF, који је унапредио осетљивост и скратио време анализе процедура за детекцију важних анализата укључујући биомаркере, патогене и токсине. Ова једињења су детектована на ниским фемтомоларним концентрацијама, а анализа је веома скраћена. Једна од плазмона који се појављује је тесно везан са појавом периодичних структура са периодом мањим од таласне дужине (LIPSS). Индуковање LIPSS може бити интересантно у великом броју примена – медицинским, декоративним, триболошким, и др. – због појаве плазмона поларитона којим се светлост конфинира и омогућава побољшање у плазмонски побољшаној флуоресцентној спектроскопији.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је спроведен у оквиру реализације научних пројеката, које је финансирало Министарство науке и технолошког развоја Републике Србије под редним бројевима III45016, OI171005, OI171038. Аутори су захвални М. Бокорову са Техничког факултета Универзитета у Новом Саду, др Д. Перушку из Института за нуклеарне науке “Винча”, као и др Б. Јеленковићу, др Д. Пантелићу, др Р. Гајићу, др А. Крмпоту, др М. Рабасовићу и В. Лазовићу из Института за физику Београд, за подршку.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] H. M. van Driel, J. E. Sipe and J. F. Young, “Laser-induced periodic surface structure on solids: A universal phenomenon”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 1955-1959, Dec. 1982.
- [2] A. Y. Vorobyev and C. Guo, “Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications”, *Laser Photonics Rev.*, vol. 7, pp. 385-407, May 2013.
- [3] S. M. Petrović, D. Peruško, B. Salatić, I. Bogdanović-Radović, P. Panjan, B. Gaković, D. Pantelić, M. Trtica, B. Jelenković, “Laser induced damage/ablation morphology on the 8(Al/Ti)/Si system in different ambient conditions”, *Opt. Laser Technol.*, vol. 54, pp. 22-29, Dec. 2013.
- [4] A. G. Kovačević, S. Petrović, B. Bokić, B. Gaković, M. T. Bokorov, B. Vasić, R. Gajić, M. Trtica, B. M. Jelenković, “Surface nanopatterning of Al/Ti multilayer thin films and Al single layer by a low-fluence UV femtosecond laser beam”, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 326, pp. 91-98, 2015.
- [5] A. G. Kovačević, S. Petrović, V. Lazović, D. Peruško, D. Pantelić, B. M. Jelenković, “Inducing subwavelength periodic nanostructures on multilayer NiPd thin film by low-fluence femtosecond laser beam”, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 417, pp. 155-159, Sep. 2017.
- [6] J. Bonse, S. Hoehm, S. V. Kirner, A. Rosenfeld, J. Krueger, “Laser-Induced Periodic Surface Structures—A Scientific Evergreen”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 23, no. 3, a. 9000615, 2017.
- [7] A. Y. Vorobyev, V. S. Makin, Chunlei Guo, “Periodic ordering of random surface nanostructures induced by femtosecond laser pulses on metals”, *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 3, a. 034903, 2007.
- [8] D. Bauerle, *Laser Processing and Chemistry*, Berlin, Germany: Springer, 2000.
- [9] G. D. Tsididis, “Thermal response of double-layered metal films after ultrashort pulsed laser irradiation: The role of nonthermal electron dynamics”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 5, a. 051603, 2014.
- [10] B. Öktem, I. Pavlov, S. Ilday, H. Kalaycıoğlu, A. Rybak, S. Yavaş, M. Erdoğan, F. Ö. Ilday, “Nonlinear laser lithography for indefinitely large area nanostructuring with femtosecond pulses”, *Nature Phot.*, vol. 7, pp. 897-901, 2013.
- [11] H. Malekzad, P. S. Zangabad, H. Mohammadi, M. Sadroddini, Z. Jafari, N. Mahlooji, S. Abbaspour, S. Gholami, M. G. Houshang, R. Pashazadeh, A. Beyzavi, M. Karimi, M. R. Hamblin, “Noble metal nanostructures in optical biosensors: Basics, and their introduction to anti-doping detection”, *Trends Anal. Chem.*, vol. 100, p. 116-135, 2018.
- [12] M. Bauch, K. Toma, M. Toma, Q. Zhang, J. Dostalek, “Plasmon-Enhanced Fluorescence Biosensors: a Review”, *Plasmonics*, vol. 9, pp. 781-799, 2014.

ABSTRACT

One of the effects of the interaction of ultrashort laser beam with materials is the forming of laser-induced parallel surface structures (LIPSS), with period less than beam wavelength. For multilayer thin metal films, the quality of formed structures is better. The sample of five bilayers of Al and Ti on Si substrate was exposed to femtosecond beam and noticed the forming of two types of structures different in shape. Both are most probably the product of surface Plasmon polariton on the surface of most top layer. The occurrence of Plasmon polariton on the surface of thin metal layers and nanoparticles can confine the propagation of electromagnetic field and to amplify the fluorescent signal from molecules of the chemical compound on the surface. Depending on the interface structure for determining the target chemical on metal surface, Plasmon enhanced fluorescence is an attractive method for shortening the time of detection and increasing the sensitivity of various analytical technologies used in forensics.

Sub-micrometer parallel surface structures induced by femtosecond laser beam in forensics

Aleksander Kovačević, Suzana Petrović, Marina Lekić, Borislav Vasić, Branislav Salatić, Jelena Potočnik