



PRIMENA ALGORITMA OBRADJE ZVUKA ZA OTKRIVANJE ANOMALIJA U RADU ELEKTROMOTORA U KONTEKSTU PREDIKTIVNOG ODRŽAVANJA

SOUND PROCESSING ALGORITHM IMPLEMENTATION FOR ELECTRIC MOTOR ANOMALY DETECTION IN THE SCOPE OF PREDICTIVE MAINTENANCE

Nikola Kovjanić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – MEHATRONIKA

Kratak sadržaj – *Ovaj rad opisuje analizu konceptualnog rešenja sistema za ranu detekciju kvara mašine, baziranog na metodi zvučne detekcije anomalija.*

Ključne reči: *Industrija 4.0, prediktivno održavanje, zvučna detekcija anomalija, koračni motor.*

Abstract – *This paper represents the analysis of conceptual solution of the system for early detection of machine failure, based on sound anomaly detection method.*

Keywords: *Industry 4.0, predictive maintenance, sound anomaly detection, stepper motor.*

1. UVOD

U ovom radu predstavljen je značaj Industrije 4.0 i njenih glavnih tehnoloških reizenata, sa fokusom na inteligentno održavanje i metodu zvučne detekcije anomalija (eng. *S.A.D. – Sound Anomaly Detection*). Industrija 4.0 se kao koncept pojavljuje 2011. godine i predstavlja široku upotrebu informacionih i komunikacionih sistema i tehnologija kao i njihovu međusobnu integraciju za potrebe industrijske proizvodnje [1]. Industrija 4.0 podrazumeva potpunu digitalizaciju svih procesa proizvodnje i primenu digitalnih tehnologija prilikom kreiranja ideje o nekom proizvodu, inženjeringu proizvoda, organizaciji proizvodnje, realizaciji proizvodnje, kontroli procesa i pružanja industrijskih usluga [2].

Pored identifikacije mogućnosti i šansi koje pruža Industrija 4.0 kao i uticaja digitalizacije poslovanja na menadžment u proizvodnoj industriji, glavna zamisao rada jeste upravo da se pokaže da je korišćenjem audio senzora opisanih u ovom radu, koji rade u domenu ljudskog audio spektra (20Hz – 20kHz), moguće detektovati anomalije u zvuku koji emituje posmatrani uređaj ili mašina.

Uređaj korišćen za testiranje jeste 28BYJ – 48 koračni, četvorofazni motor jednosmerne struje (eng. *DC – Direct Current*). Predlog rešenja za *S.A.D.* sistem, dobijen je na osnovu testova koji su sprovedeni pod različitim uslovima rada koji se ogledaju u korišćenju različitih audio uređaja, izolacionih materijala za supresiju okolnog zvuka radnog okruženja ili podešavanju sistemskih parametara opreme. Težeći automatizaciji procesa i integraciji podataka i njihovim prebacivanjem iz fizičkog u digitalni domen,

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Gordana Ostojić, red. prof.

digitalizacija postaje neminovnost usled kontinuiranog rasta tržišta.

2. GLAVNI IZAZOVI

Globalni lideri u industrijskoj proizvodnji usvajaju nove tehnologije i prelaze na savremene koncepte poslovanja radi smanjenja operativnih rizika i troškova, poboljšanja vremena neprekidnog rada, uvećanja profita kao i pružanja kvalitetnije usluge klijentima i potrošačima. Kako bi se izvršila tranzicija na novi model poslovanja, upravljanja procesima i održavanju mašina, potrebno je analizirati različite aspekte koji podrazumevaju tehničku, ekonomsku i organizacionu perspektivu usvajanja novih tehnologija i njenu izvodljivost. Iako je jedna od glavnih motivacija za uvođenje ovakvih sistema - smanjenje zastoja i dodatnih troškova sa povećanjem performansi sistema u cilju povećanja profita, potrebno je voditi računa o industrijama kod kojih kvarovi i nepredviđene situacije mogu nepovoljno uticati na životnu sredinu ili smrtno ugroziti živote ljudi. Takođe, gledano sa tehničke strane, jedna od velikih prepreka jeste adaptacija novog načina poslovanja na postojeću infrastrukturu.

Sa stanovišta ekonomije, rigorozni zahtevi klijenata i investitora, kratki vremenski rokovi, kastomizacija tj. individualna proizvodnja i modifikacija komponenti proizvoda i usluga u skladu sa potrebama i željama kupaca kao i kratak životni ciklus proizvoda, predstavljaju jedan od najvećih izazova za kompanije. Svi navedeni parametri, uslovljeni su ekspanzijom globalnog tržišta koje se menja iz dana u dan. Na liderima kompanija je da na proaktivan i strateški orijentisan način sagledaju sve mogućnosti koje se nude i vodeći se analizom isplativosti, blagovremeno donesu odluku.

Kada je reč o organizacionom odnosno kadrovskom aspektu, na liderima je velika odgovornost pri sprovođenju novog načina poslovanja, na način da vode računa da sve strukture u organizaciji dobiju adekvatno znanje i ne ostanu isključeni prilikom tranzicije. Takođe, mogućnost ranog prihvatanja ovakvog koncepta posledično utiče na kompanije u pogledu zauzimanja liderske pozicije na globalnom tržištu, u odnosu na njene konkurente.

3. PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE SISTEMA

U Industriji 4.0 dominiraju nove, nematerijalne softverske i menadžment tehnologije, u odnosu na materijalne. Glavni postulat pametnog održavanja predstavlja prelazak mašine sa korektivnog na prediktivni odziv. Pametno održavanje opisuje samoregulisano - zasnovano na učenju - inteligentno održavanje, sa ciljem povećanja efikasnosti

tehničkih i ekonomskih mera koje se sprovode u sklopu održavanja, uzimajući u obzir postojeći proizvodni sistem, korišćenjem digitalnih aplikacija [3]. Ovakav model održavanja mašina zasnovan na digitalnom pristupu, koristi prediktivne algoritme senzora, za razliku od prethodnih modela zasnovanih na analognim metodama koje se ogledaju u preventivnom servisiranju i reakciji tehničara u održavanju. Prediktivno održavanje se oslanja na kontinualnu obradu podataka dobijenih pri radu pojedinačnih mašina ili njihovom međusobnom komunikacijom u realnom vremenu, kao i na korišćenje mnoštva audio, vizualnih i drugih tipova senzora koji se koriste kao alati za predikciju potencijalnog kvara. Tokom kontinuiranog rada, industrijska postrojenja, mašine, oprema i uređaji trpe različite vrste opterećenja što se ogleda u trošenju materijala, habanju i slično. Kako bi se na vreme sprečilo dalje uništavanje i na kraju potpuni kvar mašine, potrebno je na vreme ustanoviti kvar tj. ukoliko postoji mogućnost, u potpunosti ga predupređiti i izvršiti blagovremeno servisiranje.

3.1. Zvučna detekcija anomalija

Podaci koji se dobijaju, kada je reč o metodi koja koristi zvuk kao način za prediktivno održavanje, često se nazivaju senzorskim podacima, jer su dobijeni korišćenjem različitih audio senzora, pri čemu se podaci prikupljaju i nakon toga dalje analiziraju. U širem smislu, S.A.D. metoda, predstavlja način da se, u realnom vremenu, ustanovi neispravan rad mašine ili uređaja tako što se analizira zvuk koji dolazi od trenutno posmatranog objekta i upoređuje sa referentnim, ispravnim zvukom rada. Ukoliko se upoređivanjem ustanovi da je zvuk posmatranog objekta drugačiji od referentnog (podrazumeva se da je van definisanog praga tolerancije), sistem obaveštava korisnika da je potrebno izvršiti servisiranje. U užem smislu, ova metoda se odnosi na problem pronalaženja uzoraka ili šablona koji se ponavljaju u okviru podataka, u ovom slučaju audio zapisa, koji se ne podudaraju sa očekivanim ponašanjem sistema. Cilj je da se blagovremeno identifikuju odstupanja u podacima od onog što se smatra normalnim, očekivanim ili verovatnim u smislu distribucije verovatnoće događaja ili obliku i amplitudi signala u zavisnosti od vremena. Zvuk rada mašine se koristi za sprečavanje nezgoda i/ili mehaničkih kvarova, otkrivanjem nepravilnosti u zvuku koje se obično ne javljaju. Ranije, provera stanja sistema i održavanje sistema su sprovedeni u dva slučaja:

- kada je već postojao prigovor na ispravnost rada sistema,
- tokom zakazane redovne provere ispravnosti rada sistema, svakih nekoliko nedelja, meseci.

U drugom slučaju, bilo je uobičajeno da iskusni tehničar u održavanju sluša zvuk rada mašina. Ovakav pristup dovodi do toga da mali problemi na kraju postanu veliki i skupi, budući da se greška utvrdi tek nakon što je već nastala. Takođe, bitno je uračunati utrošeno vreme na zamenu i uzeti u obzir problem nedostatka kvalifikovanog osoblja i radnika. Implementacija ovakvog rešenja, predviđanja kvara u realnom vremenu postaje izvodljiva, što maksimizira efikasnost radnog vremena mašina. Preventivne mere, potvrda anomalije i automatsko izdavanje radnog naloga za servisiranje, predstavljaju glavne prednosti ovakvog rešenja.

3.2. Implementacija S.A.D. metode u praksi

Kao i pri uvođenju drugih metoda, implementacija S.A.D. tehnike nije lak i kratkotrajan proces. Problemi koji se mogu javiti su različite prirode i zavise od industrije do industrije. Obzirom da se radi o industrijskim postrojenjima, normalno je da uslovi rada nisu idealni i da postoji veliki broj parametara koji negativno utiču na uspostavljanje i sprovođenje ove vrste detekcije anomalija. Velike buke koje su karakteristične za ovakve sredine, uzrokovane radom drugih mašina i procesa ili velikim brojem ljudi na jednom mestu, mogu da ometaju prilikom dobijanja akustičnog profila rada određene mašine, pri čemu može doći do mešanja zvuka okruženja i posmatranog zvuka. U kontekstu hardvera, pored korišćenja sofisticirane opreme za snimanje zvuka koja koristi tehnologiju aktivne supresije šuma (eng. ANC – *Active Noise Cancellation*), potrebno je, ukoliko postoji mogućnost, izolovati proces ili mašinu na osnovu čijeg zvuka rada se sprovodi inspekcija. Mehanički zastori, haube, pregrade ili kućišta izrađeni od odgovarajućeg materijala i dodatno izolovani adekvatnim izolacionim sunderom odnosno akustičnom penom, značajno povećavaju mogućnost realizacije ovakvog pristupa održavanju.

U domenu softverske realizacije, potrebno je sakupiti veliku količinu podataka o radu sistema ili mašine na osnovu kojih se vrši treniranje i priprema modela za primenu određenih algoritama mašinskog učenja (eng. *ML – Machine Learning*). Dobro pripremljeni podaci o ispravnom i neispravnom radu mašine ili sistema, predstavljaju ključan deo pri konstruisanju tačnog i pouzdanog sistema za prediktivno održavanje. Ovakvi sistemi se dizajniraju da se poboljšavaju sa vremenom, jer se nakon agregacije sve većeg broja podataka te analiziranjem i identifikovanjem anomalija, sistem unapređuje. Preporuka za ovakav pristup jeste da se model trenira na što većem broju mašina, identičnih ili približnih karakteristika, kao i u različitim fabrikama i industrijskim postrojenjima.

4. REALIZACIJA SISTEMA ZA ZVUČNU DETEKCIJU ANOMALIJA

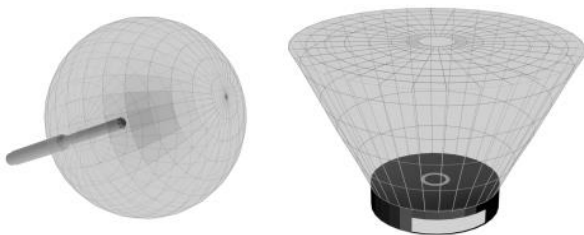
U daljem tekstu, u tabeli 1, prikazan je spisak najvažnijih komponenti koje su korišćene za potrebe testiranja sistema, nakon čega je opisana razlika u načinu rada dva navedena audio senzora odnosno mikrofona.

Tabela 1. Komponente korišćene za testiranje

ID	OPIS
28BYJ-48	Koračni motor
ULN2003	Rukovalac motora
Arduino Uno	Mikrokontroler
SonarWorks XREF20	Merni mikroskop
NTT FR – 1000	Merni mikroskop
Steinberg UR 44	Audio interfejs
PFT-TF-N50-1:3	Akustični sunder
Ikea Eket	Mehanička hauba

4.1. Odabir mikrofona

Mikrofoni koji su korišćeni, snimaju zvuk u domenu ljudskog audio spektra ali se razlikuju po dimenziji, ceni, kvalitetu izrade i načinu rada. Prema načinu rada odnosno načinu prijema zvuka, *SonarWorks XREF 20* mikrofona pripada grupi omnidirekcionih mikrofona, čija je osetljivost primanja zvuka jednaka sa svih strana, dok usmereni mikrofoni (npr. *NTT FR – 1000*) imaju veoma uzak i usmeren opseg osetljivosti. Ilustracija prijema zvuka za ova dva tipa mikrofona, prikazana je na slici 1. u nastavku teksta.



Slika 1 – Prijem zvuka za omnidirekcionu (levo) i usmerenu (desno) tip mikrofona

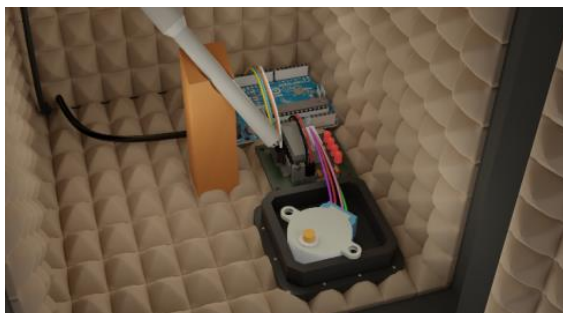
Karakteristika omnidirekcionog tipa mikrofona omogućava njegovo postavljanje u blizini izvora zvuka, pri čemu nije neophodno striktno voditi računa da je mikrofona usmeren direktno u izvor zvuka. *SonarWorks XREF 20* mikrofona zahteva korišćenje dodatnog audio interfejsa *Steinberg UR44* sa kojim je povezan putem *XLR* (eng. *External Line Return*) audio kabela.

Sa druge strane, korišćenje *NTT FR – 1000* ne zahteva dodatno pojačalo, već se direktno povezuje sa računarnom putem *USB* kabela (eng. *Universal Serial Bus*). Ovaj mikrofona ima mogućnost konfiguracije za više tipova mikrofona, ali je za potrebe ovog rada, podešen da radi kao usmereni tip mikrofona. Ovakva karakteristika omogućava postavljanje mikrofona u blizini izvora zvuka, pri čemu je neophodno voditi računa o orijentaciji uređaja tako da je usmeren direktno u izvor zvuka, u cilju postizanja maksimalne efikasnosti.

Promena funkcionalnosti ovog mikrofona, moguća je konfigurisanjem *DIP* prekidača (eng. *Dual In – Line Package Switch*) u određeni položaj.

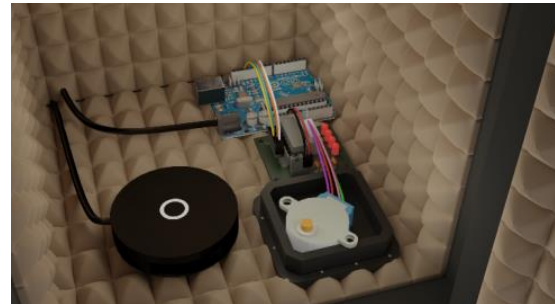
4.2. Test okruženje

Postavka za testiranje koračnog motora, ilustrovana je u vidu 3D modela radnog okruženja i realizovana fizički a prikazana na slikama 2 i 3. Na slici 2 prikazano je okruženje unutar zaštitnog kućišta, kada je korišćen *XREF 20* mikrofona a na slici 3 kada je korišćen *FR – 1000* mikrofona.



Slika 2 - Detalj test okruženja za *XREF 20*

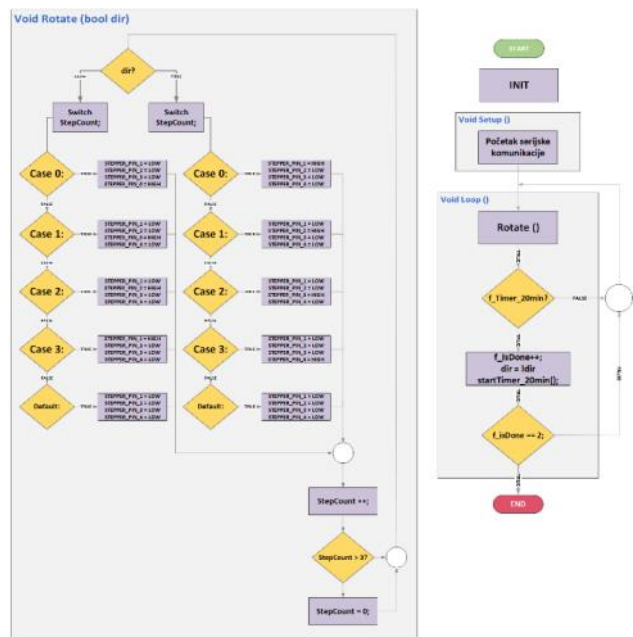
Na slici se vidi da je koračni motor postavljen na gumirano postolje kako bi se sprečila moguća vibracija i pojava dodatnog šuma. U ovom slučaju, da bi položaj mikrofona ostao nepromenjen, improvizovano je postolje na koje je mikrofona oslonjen. Mikrofona je direktno usmeren u izvor zvuka odnosno ka motoru. Kada je u pitanju korišćenje usmerenog mikrofona, postavka je identična, sa razlikom da je mikrofona postavljen pored izvora zvuka i nije direktno usmeren u njega, što je ilustrovano na slici 3.



Slika 3 - Detalj test okruženja za *FR – 1000*

4.3. Testna aplikacija

U priloženom blok dijagramu koji je dat u vidu slike 4 u nastavku teksta, prikazana je upravljačka logika test aplikacije sistema za zvučnu detekciju anomalija



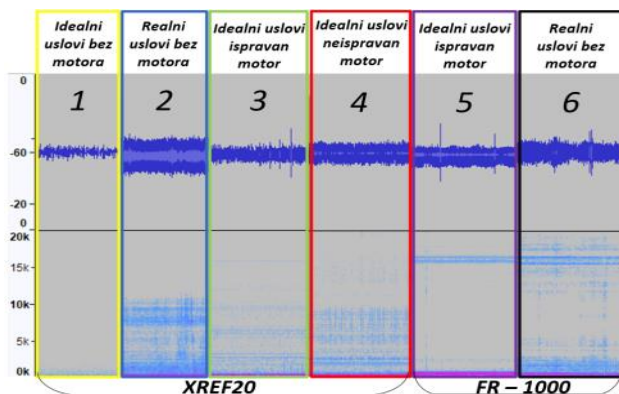
Slika 4 – Upravljačka logika test aplikacije

5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA I REZULTATI

Pri eksperimentalnoj verifikaciji, od velike je važnosti sprovesti što više različitih testova pri što više različitih parametara testiranja, bilo da je reč o sistemskim podešavanjima ili različitim uslovima radnog okruženja. Na ovaj način se sprečava pojava nepredviđene situacije kada se krajnje rešenje pusti u rad. Snimanje zvuka rada motora, vršilo se korišćenjem pomenutih mikrofona i softvera za snimanje i uređivanje zvuka – *Audacity*. Dobijeni zvučni zapisi, predstavljeni su u vidu signala u vremenskom i frekventnom domenu. U vremenskom domenu, rezultati su dati kao zavisnost amplitude i vremena, predstavljeni na logaritamskoj skali i izraženi u decibe-

lima. U frekventnom domenu, rezultati su predstavljeni u vidu spektrograma gde su na jednom dijagramu prikazane tri veličine: vreme (horizontalna osa), frekvencija (vertikalna osa), i amplituda (stepen zatamnjenja ili boja).

U sklopu testiranja, parametri kao što su učestanost odabiranja (eng. *Sample Rate*) i format odabiranja (eng. *Sample Format*), ispitani su sa različitim vrednostima kako bi se ustanovilo koje vrednosti daju najbolje rezultate za posmatrani slučaj. Nakon toga, kako bi se utvrdio uticaj spoljašnjeg zvuka na dobijanje zvučnog profila pri snimanju zvuka rada motora, vršeno je testiranje u idealnim uslovima kada u prostoriji nije bilo zvuka, kao i kada su simulirani zvuci industrijskog postrojenja. Razlike u ovim postavkama, vide se na slici 5 u nastavku teksta.



Slika 5 – Upporedne karakteristike rezultata snimanja

Na slici 5 je predstavljeno 6 rezultata testiranja, od kojih su prva 4 rezultata dobijeni snimanjem pomoću XREF20 omnidirekcionog mikrofona, a rezultati označeni sa brojevima 5 i 6, dobijeni su korišćenjem FR – 1000 mikrofona, koji je podešen da radi kao usmereni mikrofona. Svaki od prikazanih rezultata predstavlja segment od 15 sekundi dobijen iz originalnog zvučnog zapisa, što je urađeno radi lakšeg pregleda i poređenja rezultata. Poređenjem rezultata 1 i 2, jasno se može ustanoviti razlika, kada se snimanje vrši u idealnim uslovima i kada se sistem postavi u realno, industrijsko okruženje. Takođe, poređenjem rezultata 2 i 6, vidi se razlika u zvučnom zapisu kada se koristi XREF 20 odnosno FR – 1000 mikrofona. Rezultat 3 predstavlja zvučni zapis rada izabranog motora, kada je motor ispravan a rezultat 4, kada je motor fizički oštećen. Konkretno, na ovom motoru su oštećeni zupčanici izlaznog vratila, kako bi se prikazao neispravan režim rada motora. Posmatrajući spektrogram za slučaj 3 i 5, može se uočiti jasna razlika kada se snimanje vrši sa omnidirekcionim mikrofonom, gde je raspoređenost plavih linija gušća i izraženija u poređenju sa korišćenjem usmerenog mikrofona, gde je zvuk skoncentrisan pri nižim frekvencijama i frekvenciji između 15 kHz i 20 kHz.

6. ZAKLJUČAK

Iz priloženog, može se videti jasna razlika u audio zapisu kada je motor ispravan i kada postoji određeno oštećenje. Najbolji prikaz razlike, može se primetiti pri poređenju u frekventnom domenu. Kada je reč o izboru mikrofona, oba mikrofona su pokazala dobre karakteristike pri testovima kojima su podvrgnuti. Korišćenjem XREF 20 mikrofona, dobija se veća amplituda zvuka pri snimanju u poređenju sa korišćenjem NTT FR – 1000 mikrofona.

Nasuprot tome, iz priloženih rezultata se vidi da su korišćenjem FR – 1000 mikrofona, šumovi viših frekvencija manje prisutni u zvučnom zapisu, ali da bi za efikasniju analizu bilo potrebno dodatno postolje koje će omogućiti njegovo postavljanje direktno iznad izvora zvuka.

Naravno, u zavisnosti od industrije i tipa audio inspekcije koju je potrebno izvršiti, mogu se koristiti i drugi tipovi mikrofona u smislu prijema zvuka koji se emituje. Kada je reč o efektima koji bi se mogli dodati radi dodatne obrade zvučnog zapisa, moguće je koristiti niskopropusne filtre (eng. *low – pass*) ili visokopropusne filtre (eng. *high – pass*).

Dalja unapređenja ovog inspeksijskog sistema, moguća su u vidu implementacije vibro – dijagnostike, kao još jedne od mogućih metoda za detekciju anomalija u radu ili vizuelne inspekcije korišćenjem kamera i metoda termografije. Ono što treba imati u vidu prilikom projektovanja ovakvih sistema jeste “fleksibilna arhitektura” tj. treba omogućiti potencijalna proširenja funkcionalnosti, zavisno od iskustva u radu i eventualnih zahteva korisnika. Posmatrajući ovako konfigurisan sistem, uz korišćenje opisane opreme pod datim parametrima testiranja i uslovima radnog okruženja, potvrđena je hipoteza da je zvukom, zaista moguće detektovati anomalije u radu posmatranog objekta, u ovom slučaju, koračnog 28BYJ – 48 motora, u domenu ljudskog audio spektra. Značaj projekta opisanog u ovom radu, ogleda se u stečenom iskustvu i dobijanju znanja o planiranju, konstruisanju, izradi i testiranju sistema, kao jednog od rešenja iz oblasti pametnog održavanja, korišćenjem metode zvučne inspekcije anomalija. Pored navedenog, ukazano je na efekte implementacije glavnih tehnoloških reprezentata Industrije 4.0. Takođe identifikovane su mogućnosti i šanse koje pruža Industrija 4.0 kao i uticaj digitalizacije poslovanja na menadžment u proizvodnoj industriji.

7. LITERATURA

- [1] <https://blog.isa.org/what-is-industry-40> (pristupljeno u aprilu 2022.)
- [2] <https://pcpress.rs/industrija-4-0-i-buducnost/> (pristupljeno u martu 2022.)
- [3] M.Henke, T.Heller, V. Stich, “Smart Maintenance – Der Weg vom Status quo zur Zielvision“, München: utzverlag GmbH 2019.
- [4] <https://manual.audacityteam.org/> (pristupljeno u aprilu 2022.)
- [5] <https://www.sonarworks.com/legal/soundid-reference/measure-microphone-user-instructions> (pristupljeno u novembru 2022.)
- [6] <https://www.ntt-at.com/product/imic/> (pristupljeno u aprilu 2022.)

Kratka biografija:



Nikola Kovjanić rođen je u Novom Sadu 1996. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mehatronike (Mehatronika, robotika i automatizacija), odbranio je 2023. godine.
kontakt: knkovja@gmail.com