

# Komparativna analiza akustičkih signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem mapiranih u slike bazirane na spektrogramu

Marko Milivojčević, Emilija Kisić, Dejan Ćirić

**Apstrakt**—Motori sa unutrašnjim sagorevanjem kao i druge vrste motora i mašina pri svom radu generišu zvuk. On se karakteriše specifičnim svojstvima zavisno od vrste motora, moda rada, kao i stanja samog motora. Na osnovu zvuka moguće je izvući značajne informacije o motoru, uključujući i detekciju pogonskog goriva (benzina ili dizela). U tom kontekstu, u ovom radu je izvršena analiza akustičkih signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem posle njihovog prebacivanja (mapiranja) u odgovarajuće slike i to spektrogram, hromagram, gamatonegram i tempogram. Kako sve ove slike imaju formu klasičnog spektrograma, one se u literaturi nazivaju slike bazirane na spektrogramu ili slične spektrogramu. Cilj analize je da se izvrši međusobno poređenje navedenih slika i da se ustanovi koja od njih najbolje prikazuje razliku između signala motora koje pokreće benzin i dizel gorivo. Analiza je izvršena nad bazom od 350 snimljenih signala kako bi se u nastavku istraživanja koristeći izabranu metodu mapiranja signala u slike izvršila klasifikacija pogonskog goriva sa što većom tačnošću pomoću tehnika dubokog učenja.

**Ključne reči**—Akustičke karakteristike, audio zapis, vremenski domen, motori sa unutrašnjim sagorevanjem, spektrogram, hromagram, gamatonegram, tempogram.

## I. UVOD

Sa razvojem modernih tehnologija i naprednih tehnika dubokog učenja, problemi automatizovane klasifikacije ili detekcije, kao što je prepoznavanje govora ili akustičkih signala, mogu se veoma uspešno rešiti ukoliko se izabere adekvatan algoritam mašinskog učenja i ukoliko se formira kvalitetna baza podataka na osnovu koje će se sistem obući.

Kada je reč o akustičkim signalima, njihovo prepoznavanje predstavlja veoma kompleksan zadatak i za čoveka, pre svega zbog nemogućnosti svih slušaoca da identično čuju odgovarajući signal što je uslovljeno različitim auditivnim karakteristikama svakog od slušaoca. Problem postaje još složeniji uzimajući u obzir da je na osnovu primljenog signala potrebno izvršiti klasifikaciju ili detekciju događaja upotrebom prethodno stečenog iskustva. "Treniranjem sluha", posebno u istom (radnom) okruženju, je moguće postići

Marko Milivojčević – Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, odsek: Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: [markom@viser.edu.rs](mailto:markom@viser.edu.rs)).

Emilija Kisić – Univerzitet Metropolitan, Beograd Fakultet informacionih tehnologija, Tadeuša Koščuška 63, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: [emilija.kisic@metropolitan.ac.rs](mailto:emilija.kisic@metropolitan.ac.rs)).

Dejan Ćirić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: [dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs](mailto:dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs)).

tačniju procenu događaja. Primena automatske klasifikacije/detekcije akustičkih signala za određenu vrstu događaja bi eliminisala nesavršenost čovekovog slušnog aparata, kao i elemente individualne subjektivnosti i manuelnog izvršavanja postupka klasifikacije/detekcije.

Činjenica da motori sa unutrašnjim sagorevanjem generišu zvuk prilikom svog rada, kao i da se taj zvuk perceptivno razlikuje u zavisnosti od pogonskog goriva, a sa dodatnom potrebom da se pogonska goriva klasifikuju iz ekoloških razloga [1], poslužila je kao motiv za razvoj sistema automatske klasifikacije baziran na audio snimcima rada motora.

U cilju realizacije jednog ovakvog sistema bilo je potrebno razviti akvizicioni sistem za prikupljanje audio signala. Ovi signali će formirati bazu uzoraka na osnovu koje će se sistem obući nekim od algoritama mašinskog, odnosno dubokog učenja. Pomenuti akvizicioni sistem za snimanje uzoraka koristi mikrofonski pozicioniran u oblasti ispod motornog prostora putničkog vozila [2, 3] pošto se detektuje prisustvo vozila iznad mikrofona. Nakon toga, dodatnom obradom u vremenskom domenu vrši se izdvajanje režima praznog hoda motora. Kako je u režimu praznog hoda motora slušanjem utvrđena najveća razlika između pogonskih goriva, dodatna obrada je poslužila da se u banci uzoraka nađu samo audio zapisi takvog režima rada motora, pri čemu je detaljan prikaz postupka izdvajanja željenog režima rada motora prikazan u prethodnim fazama ovog istraživanja [4].

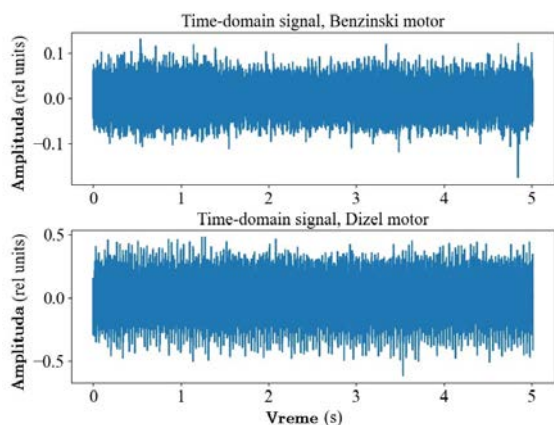
U ovom radu je izvršena komparativna analiza signala iz baze uzoraka mapiranjem signala u slike na bazi spektrograma. Osnovni motiv za analizu akustičkih signala mapiranih u slike bazirane na spektrogramu je visoka uspešnost klasifikacije na osnovu signala predstavljenih na ovaj način, videti na primer [5]. Krajnji cilj ovog istraživanja je izdvajanje onog prikaza koji daje dovoljno malu razliku unutar istog pogonskog goriva motora (benzin ili dizel), a ujedno najveću razliku između pogonskih goriva kako bi se u budućoj klasifikaciji pravilno formirala hijerarhija obeležja na osnovu kojih će se vršiti klasifikacija.

Rad je podeljen u više poglavlja. Karakteristični slučajevi prikupljenih audio signala i metode njihove obrade su prikazani u poglavlju gde je opisana metodologija. U poglavlju gde su opisani rezultati prikazani su karakteristični signali mapirani u slike u obliku spektrograma, hromograma, gamatonegrama i tempograma. Zaključci komparativne analize dobijenih prikaza su sumirani u poglavlju koje sledi,

iza kojeg je dat spisak korišćene literature.

## II. METODOLOGIJA

Prikupljanjem audio signala generisanih radom motora sa unutrašnjim sagorevanjem u realnim uslovima formirana je baza od 350 uzoraka. Preslušavanjem baze i analizom vremenskog oblika signala izdvojen je po jedan karakterističan signal rada benzinskog i jedan signal rada dizel motora u režimu praznog hoda radi lakše ilustracije i predstavljanja rezultata. Kao predstavnici svojih klasa ova dva signala su uporedno analizirana i mapirana u slike bazirane na spektrogramu. Vremenski oblici analiziranih uzoraka su prikazani na Sl. 1.



Sl.1. Vremenski oblik audio signala benzinskog i dizel motora

### A. Spektrogram

Jedna od tehnika za mapiranje akustičkih signala u sliku koja je korišćena u ovom radu je ona koja kao rezultat daje spektrogram. Ovakva vrsta slike je veoma pogodna reprezentacija signala, zato što se pomoću nje signal predstavlja u tri dimenzije: na horizontalnoj osi prikazuje se vreme, na vertikalnoj osi prikazuje se frekvencija, dok se amplituda predstavlja skalom boja. Spektrogram se može zamisliti kao grupa spektara signala poređanih jedan do drugog, gde je jačina spektralnih komponenti predstavljena intenzitetom boje. Spektrogram zapravo predstavlja kratkovremensku brzu Furijeovu transformaciju (eng. *short time fast Fourier transform*- STFT) [6], i računa se kao brza Furijeova transformacija (eng. *fast Fourier transform*-FFT) na pomerajućem prozoru podataka.

Osnovna ideja kod spektrograma jeste da se ceo signal podeli na segmente (okvire, odnosno frejmove, eng. *frame*) sa preklapajućim kratkovremenskim prozorima i da se zatim primeni FFT na svaki segment. Korišćenje spektrograma je veoma važno kod signala koji su kvazi-stacionarni, odnosno kod signala kod kojih postoji stacionarnost, ali samo na dovoljno kratkim odsečcima signala. Zbog toga, umesto standardne Furijeove transformacije koja transformiše signal iz vremenskog domena u frekvencijski domen (spektar), kod obrade akustičkih signala se uglavnom koristi vremenski kratkotrajna Furijeova transformacija. Njena glavna prednost jeste da se spektralna analiza sprovodi nad kratkim odsečcima

signala kod kojih je zadovoljen uslov stacionarnosti.

Izdvajanje takvih odsečaka se sprovodi primenom vremenskih prozora, koji su različiti od nule samo za konačan skup indeksa. Množenjem ulaznog signala sa takvim vremenskim prozorom postavljenim na željeno mesto u signalu, dobija se novi signal takođe beskonačnog trajanja, ali čiji su uzorci jednaki nuli za sve indekse signala koji se nalaze izvan primenjenog vremenskog prozora.

Neka je akustički signal dužine  $N$  odmeraka označen kao  $s[n]$ . Spektrogram akustičkog signala predstavlja funkciju i vremena i frekvencije što se može zapisati kao:

$$STFT[f, t] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot w[n] e^{-j2\pi f n} \quad (1)$$

gde  $f$  predstavlja frekvenciju,  $n$  vremenski argument spektrograma, a  $w[n]$  je prozorska funkcija.

U ovom radu za računanje spektrograma signala korišćena je *stft* funkcija u okviru biblioteke *librosa* u programskom jeziku *Python*. Podela signala na segmente (okvire) je već implementirana unutar funkcije. Potrebno je definisati širinu prozora  $W$ , zatim korak analize  $K$  (odnosno veličinu preklapanja prozora), kao i broj tačaka  $M$  u kojima se računa Furijeova transformacija. Drugim rečima, funkcija *stft* deli akustički signal na preklapajuće okvire (gde se definiše širina prozora i veličina preklapanja), zatim za svaki od okvira računa FFT u onom broju tačaka koji se zada, a na spektrogramu se mogu pročitati informacije o vremenu, frekvenciji i amplitudi željenog signala. U ovom radu za širinu prozora je izabrano  $W=2048$ , preklapanje prozora je  $K=512$ , a broj tačaka za računanje Furijeove transformacije je  $M=2048$ . Izabrana prozorska funkcija je *Hann*-ova prozorska funkcija.

### B. Hromagram

Hromagram (hroma spektar) predstavlja veoma moćnu reprezentaciju audio signala u kojoj se ceo spektar projektuje na 12 binova koji predstavljaju 12 različitih polutonova (ili hroma) muzičke oktave [1].

Pošto se u muzici note koje su udaljene za tačno jednu oktavu doživljavaju kao posebno slične, poznavanje raspodele hroma čak i bez apsolutne frekvencije (tj. originalne oktave) može dati korisne muzičke informacije o zvuku, odnosno može otkriti uočenu muzičku sličnost koja nije vidljiva u originalnim spektrima.

Hromagram se dobija preslikavanjem diskretnih vrednosti dobijenih kratkotrajnom brzom Furijeovom transformacijom (STFT) audio signala u 12 hroma, odnosno prelaskom iz domena diskretnih frekvencija u domen diskretnih veličina hroma.

### C. Gamatonegram

Spektrogram je tradicionalna vremensko-frekvencijska vizualizacija, ali zapravo ima nekih važnih razlika u odnosu na to kako se zvuk analizira od strane ljudskog uva. Najznačajnija razlika je to što frekvencijski podopsezi uva postaju širi na većim frekvencijama, dok spektrogram ima

konstantan propusni opseg na svim frekvencijama, odnosno u svim frekvencijskom opsezima (kanalima). Kako bi se ovo ograničenje prevazišlo može se koristiti *Gama-spektrogram*, zasnovan na primeni gamatone filtera, odnosno *gamatonegram* [8].

*Gamatone* filteri su dizajnirani tako da modeluju frekvencijski selektivne kohlea aktivacione odzive ljudskog unutrašnjeg uva [9], pri čemu izlaz filtra simulira frekvencijski odziv bazilarne membrane. *Gamatone* filter je linearni filter opisan impulsnim odzivom koji je proizvod gama raspodele i sinusoidalnog tona. Impulsni odziv filtra dat je sledećom jednačinom:

$$g[k] = k^{P-1} T^{P-1} e^{-2bkT\pi} \cos(2fkT\pi + \theta) \quad (2)$$

gde je  $k$  vreme,  $P$  je red filtra,  $T$  je perioda odabiranja,  $b$  je propusni opseg filtra,  $f$  je centralna frekvencija, a je  $\theta$  faza nosioca. *Gamatone* filteri se koriste za modelovanje ljudskog slušnog sistema i sastoje se od niza filtera propusnika učestanosti. Banka *gamatone* filtera je formulisana kao ERB (eng. *equivalent rectangular bandwidth*) skala [10] na sledeći način:

$$ERB = 24.7 \left( 4.37 \cdot 10^{-3} f + 1 \right) \quad (3)$$

Kako bi se generisao gamatonegram u ovom radu korišćen je toolbox razvijen od strane Ellis at al. [8], primenjen u programskom jeziku Python. Prvo je akustički signal transformisan u STFT spektrogram, kao što je gore opisano. Zatim je primenjeno *gamatone* ponderisanje  $COE[F_{gam}, F]$  na STFT kako bi se dobio gamatonegram:

$$GAM[F_{gam}, T] = COE[F_{gam}, F] \times STFT[F, T] \quad (4)$$

gde je  $F_{gam}$  rezolucija gamatonegrama (GAM spektrograma) i predstavlja broj gamatone filtera [11]. U ovom radu je broj gamatone filtera 64.

#### D. Tempogram

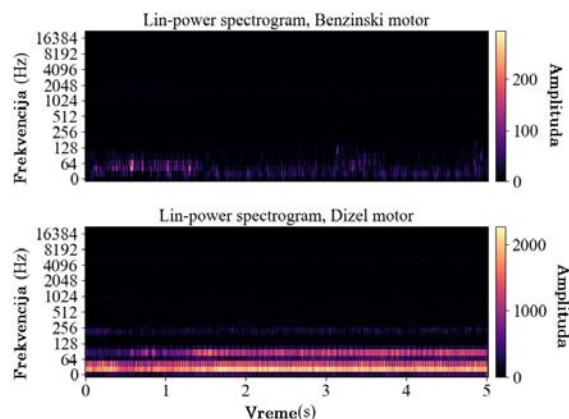
Slično spektrogramu, tempogram se definiše kao vremenska-tempo reprezentacija, odnosno tempo datog signala koji zavisi od vremena [12]. Tempogram signala je reprezentacija koja sadrži informaciju o lokalnom tempu za svaki frejm audio sigala. Postoje dva tipa tempograma: Furijeov tempogram i autokorelacioni tempogram. Furijeov tempogram konvertuje frekvenciju u tempo (eng. *beat per minute* - BPM) naglašavajući harmonike, dok autokorelacioni tempogram konvertuje vremensko kašnjenje (sekunde) u tempo, ističući subharmonike. U ovom radu korišćen je ciklični tempogram pomoću *libros*-a biblioteke u Python programskom jeziku. Ciklični tempogram se dobija iz Furijeovog i autokorelacionog tempograma [12].

### III. REZULTATI ANALIZE

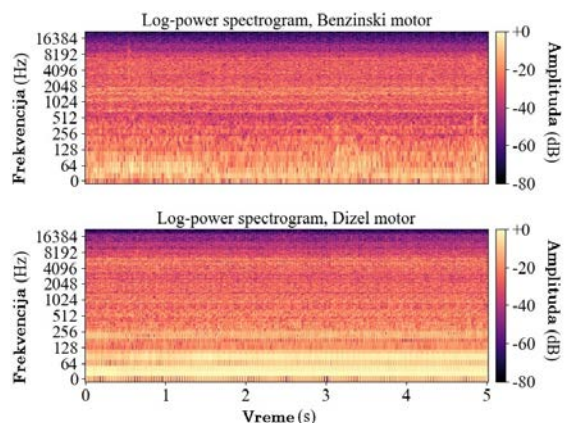
Kako je akvizicioni sistem razvijen tako da kao krajnji

rezultat prikupljanja audio zapisa izdvaja i čuva samo režim praznog hoda motora, predmet analize nisu bili signali sa promenljivim režimom rada. Primenom predstavljenih metoda za analizu iz prethodnog poglavlja, mapiranje signala je realizovano na karakterističnim signalima dobijenim radom benzinskog i dizel motora isključivo u režimu praznog hoda čiji su vremenski oblici prikazani na Sl. 1.

Na Sl. 2. je prikazan spektrogram gde je nivo signala predstavljen u linearnoj razmeri, dok je na Sl. 3. takođe prikazan spektrogram istih signala pri čemu je snaga signala predstavljena u logaritamskoj razmeri.



Sl. 2. Spektrogrami signala u linearnoj razmeri (*lin-power* spektrogrami)



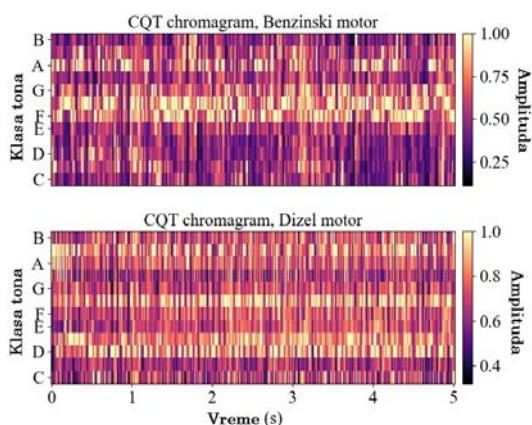
Sl. 3. Spektrogrami signala u logaritamskoj razmeri (*log-power* spektrogrami)

Analizom signala prikazanih u vidu spektrograma sa linearnom razmerom na Sl. 2. može se uočiti višestruka razlika signala između motora na benzin i dizel. Spektrogram benzinskog motora ima gotovo desetostruko niži nivo signala, dok spektrogram dizel motora pored višeg niva signala poseduje i izražene komponente na višim frekvencijama u odnosu na benzinski motor. Kod dizel motora se može uočiti neprekidnost spektrograma, posebno na osnovnoj učestanosti rada motora.

Prikazom ova dva signala u vidu spektrograma sa logaritamskom razmerom dobija se detaljniji prikaz spektralne raspodele signala, sl. 3. Na ovoj slici se takođe može uočiti viši nivo signala i veća gustina spektra dizel motora na nižim učestanostima. Pored ove osobine signala dobijenog radom dizel motora, koji odgovara percepciji slušaoca, da ovaj tip

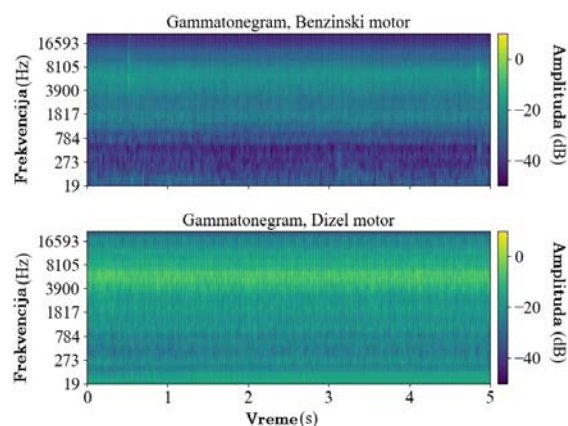
motora radi „dublje“, može se uočiti ravnomernija „popunjenost“ spektra sve do visokih frekvencija, dok se kod benzinskog motora posebno na približno 500 Hz može uočiti niži nivo signala. Kod signala generisanog radom benzinskog motora je i u oblasti visokih učestanosti, preko 10 kHz nivo signala niži, što odgovara percepciji slušaoca da prilikom dugog izlaganja buci dizel motora dolazi ranije do zamaranja slušaoca. Ova karakteristika generisanog zvuka se može potvrditi i analizom zvučne izolacije koja se ugrađuje na identičan tip putničkog vozila pokretanog različitim motorima, gde je zvučna izolacija dizel motora u najvećem broju slučajeva zbog komfora bolje izvedena.

Rezultat primene funkcija za određivanje hromograma za izabrane karakteristične signale rada benzinskog i dizel motora u praznom hodu je prikazan na Sl. 4. Na dobijenom prikazu može se uočiti da je kod dizel motora zastupljenost različitih visina tj. klasa tonova kroz čitav opseg od svih dvanaest klasa, gotovo uniforman, pri čemu su najistaknutije klase D, D#, F# i A#, dok su kod benzinskog motora izražene klase F, F#, G i A. Na osnovu ovakvog prikaza signala moguće je uočiti da su kod benzinskog motora zastupljenije osnovne klase tonova dok su kod dizel motora zastupljenije povišene/snižene klase tonova.



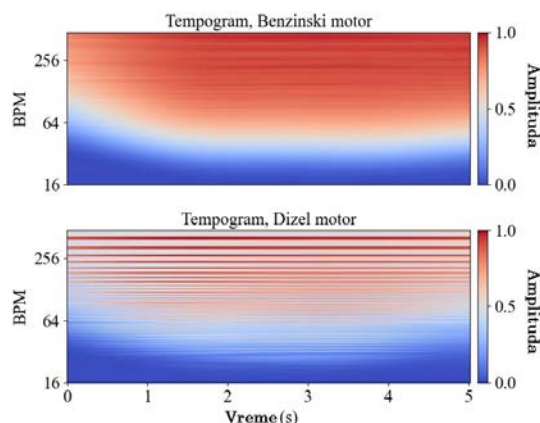
Sl. 4. Hromagram benzinskog i dizel motora

Primenom gamatone filtera prilikom proračuna spektrograma za posmatrane signale dobijen je gamatonegram koji je prikazan na Sl. 5. Na prikazanom gamatonegramu jasno je moguće uočiti razliku između dva pogonska goriva. Kod dizel motora nivoi signala su viši na svim frekvencijama, a posebno je istaknut opseg 4-8 kHz, kao i opseg niskih frekvencija gde se nalazi osnovna učestanost rada motora. Kod benzinskog motora je moguće uočiti veoma nizak nivo signala u opsegu ispod 1 kHz i iznad 10 kHz. Kako je gamatonegram posebno prilagođen ljudskom uvu, dobijeni prikazi odgovaraju percepciji „glasnijeg“ dizel motora bez obzira na mereni nivo signala instrumentom.



Sl. 5. Gamatonegram benzinskog i dizel motora

U okviru analize izabranih audio signala posebna pažnja je posevećena percepciji slušaoca koja se odnosi na utisak veće ili manje ujednačenosti rada motora odnosno doživljaja tempa rada motora. Rezultat proračuna tempograma u vremenu prikazan je na Sl. 6. Na prikazanom tempogramu su razlike između benzinskog i dizel motora veoma jasno vidljive. Kod dizel motora tempogram je jasno definisan kao posledica koncentracije energije signala u okolini odgovarajućih učestanosti, dok kod benzinskog motora postoji uniformna raspodela amplituda kroz čitav opseg frekvencija.



Sl. 6. Tempogram benzinskog i dizel motora

#### IV. ZAKLJUČAK

Primenom akvizicionog sistema prilagođenog prikupljanju audio zapisa generisanih radom motora sa unutrašnjim sagorevanjem, prikupljeno je 350 uzoraka. Izvršeno je izdvajanje isključivo režima praznog hoda, kao režima u kome je slušaocu najjednostavnije da samo na osnovu zvuka utvrdi razliku između pogonskih goriva. Prikupljeni uzorci su analizirani u cilju pronalazjenja i reprezentacije razlika koje bi omogućile primenu automatske klasifikacije upotrebom mašinskog i/ili dubokog učenja.

Prikupljanje uzoraka i klasifikacija se realizuju u realnim uslovima, što je stvorilo potrebu da se pronađu parametri na osnovu kojih će biti moguće razlikovati pogonska goriva bez obzira na okolnu buku. U ovom radu je korišćen metod mapiranja audio signala u slike bazirane na spektrogramu.

Odgovarajućim odabirom tipa prikaza kao i parametara izračunavanja dobijene su slike na kojima je moguće jasno uočiti razlike između pogonskih goriva.

U poglavlju rezultati su dati uporedni prikazi za benzinski i dizel motor na primeru dva karakteristična audio signala. Prikazani spektrogrami signala daju uočljivu razliku kako za prikaz u linearnoj tako i za prikaz u logaritamskoj razmeri, pri čemu prikaz u logaritamskoj razmeri daje mogućnost detaljnije analize nivoa signala po frekvencijama (Sl. 2 i 3). Za oba prikaza dizel motor ima veću energiju skoncentrisanu na nižim učestanostima. Mapiranjem signala u hrogram također su dobijene jasno uočljive razlike u pogledu pogonskih goriva (Sl. 4). Na osnovu hrograma uočljivo je da dizel motor generiše zvuk gotovo podjednako zastupljen na svim klasama tonova, pri čemu su više istaknute klase povišenih/sniženi tonova u odnosu na benzinski motor gde su istaknutije kase osnovnih tonova. Generisanjem gamatonegrama moguće je uočiti razliku koja se pre svega odnosi na nivo signala u čitavom opsegu, koji je kod dizel motora evidentno viši (Sl. 5). Izračunavanjem tempograma (Sl. 6) moguće je kod dizel motora uočiti jasnu koncentraciju energije za odgovarajuće nivoe tempa, dok je kod benzinskog motora tempogram gotovo uniforman.

Dobijene razlike za izdvojene parametre pružaju mogućnost binarne klasifikacije pogonskih goriva što predstavlja nastavak ovog istraživanja i budući rad za koji je bilo neophodno izvršiti ovakvu analizu.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan zahvaljujući gospodinu Neđi Petijeviću ispred firme Novi Dom doo u Beogradu koji je omogućio pristup ulaznoj rampi podzemne garaže uz poštovanje svih bezbednosnih procedura. Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, evidencioni broj 451-03-68/2022-14/200102.

#### LITERATURA

- [1] G.P. Chossière, R.Malina, F. Allroggen, S. D. Eastham, R.L. Speth, S.R.H. Barrett, "Country- and manufacturer-level attribution of air quality impacts due to excess NOx emissions from diesel passenger vehicles in Europe", *Atmospheric Environment*, Volume 189, Pages 89-97, September 2018.
- [2] M. Milivojčević, F. Pantelić, D. Ćirić, "Comparison of frequency characteristic of sound generated by internal combustion engines depending on fuel," *Proc. 26th Noise and Vibration*, Niš, Serbia, pp. 115-120, 6-7 December 2018.
- [3] M. Milivojčević, F. Pantelić, D. Ćirić, "Pozicioniranje mikrofona prilikom snimanja audio karakteristika motora putničkih vozila" *Proc. 63rd National Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering ETRAN*, Srebrno Jezero, Serbia, pp. 58-62, 3-6 June 2019.

- [4] M. Milivojčević, D. Ćirić, „Izdvajanje značajnih akustičkih karakteristika motora sa unutrašnjim sagorevanjem“ *Proc. 64rd National Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering ETRAN*, Belgrade, Serbia, 2020.
- [5] D. Ćirić, Z. Perić, J. Nikolić, N. Vučić, "Audio Signal Mapping into Spectrogram-Based Images for Deep Learning Applications," *2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 2021, pp. 1-6.
- [6] F. A. Andrade, I. Esat, and M.N.M. Badi, "Gearbox fault detection using statistical methods, time-frequency methods (STFT and Wigner-Ville distribution) and harmonic wavelet-A comparative study," in *Proceedings of the COMADEM '99*, Chipping Norton, pp. 77-85, 1999.
- [7] Mark A. Bartsch, Gregory H. Wakefield, "Audio thumbnailing of popular music using chroma-based representations," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 7, no. 1, pp. 96-104, 2005.
- [8] Daniel PW Ellis, "Gammatone-like spectrograms," web resource: <http://www.ee.columbia.edu/dpwe/resources/matlab/gammatonegram>, 2009.
- [9] Roy D Patterson, "Auditory filters and excitation patterns as representations of frequency resolution," *Frequency selectivity in hearing*, 1986.
- [10] Brian R Glasberg and Brian CJ Moore, "Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data," *Hearing research*, vol. 47, no. 1-2, pp. 103-138, 1990.
- [11] Nguyen, Anh & Phan, Ben & Tran, Khoa & Nguyễn, Trùng. (2020). *Deep Learning Framework Applied for Predicting Anomaly of Respiratory Sounds*.
- [12] Grosche, Peter, Meinard Müller, and Frank Kurth. "Cyclic tempogram - A mid-level tempo representation for music signals." *ICASSP*, 2010.

#### ABSTRACT

Internal combustion engines as well as other types of engines and machines generate sound during their operation. It is characterized by specific properties depending on the type of engine, operating mode, as well as the condition of the engine itself. Based on the sound, it is possible to extract important information about the engine, including the detection of fuel (gasoline or diesel). In that regard, in this paper, the analysis of acoustic signals of internal combustion engines is performed after their mapping into the appropriate images, namely spectrogram, chromagram, gammatonegram and tempogram. As all these images have the form of a classical spectrogram, they are called in the literature images based on a spectrogram or similar to a spectrogram. The aim of the analysis is to compare the above images and to determine which of them best shows the difference between the signals of the engine that runs on gasoline and diesel fuel. The analysis is performed on a database of 350 recorded signals, so that in the continuation of the research, using the selected method of mapping the signals into images, the fuel classification will be performed with the highest possible accuracy using deep learning techniques.

#### **Comparative analysis of acoustic signals generated by internal combustion engines mapped into spectrogram-based images**

Marko Milivojčević, Emilija Kisić, Dejan Ćirić