

Sličnost zvukova motora sa unutrašnjim sagorevanjem bazirana na mel-spektrogramu

Marko Milivojčević, član ETRAN, Dejan Ćirić, član ETRAN i Amela Zeković

Apstrakt—Motori sa unutrašnjim sagorevanjem pri svom radu generišu zvuk koji se odlikuje specifičnim karakteristikama preko kojih se ovi motori mogu međusobno razlikovati. Ova činjenica može služiti kao osnova za razvoj automatizovanog sistema za prepoznavanje motora sa unutrašnjim sagorevanjem na osnovu pogonskog goriva, odnosno za klasifikaciju motora na one koji koriste dizel i benzin. Pomenuti sistem se tipično zasniva na primeni odgovarajućeg algoritma veštačke inteligencije. U tom kontekstu je od velikog značaja kakav je ulaz u ovakav sistem, odnosno na koji način predstaviti zvuk motora. Jedna od opcija se odnosi na mapiranje zvuka motora u odgovarajuće slike, gde je često primenjen prikaz u vidu mel-spektrograma. U ovom radu se koristi interno generisana baza zvukova motora sa unutrašnjim sagorevanjem koja se sastoji od 475 zvukova motora na dizel i benzin. Iz ove baze su identifikovane karakteristične podgrupe motora (zvukova). Zvukovi iz ovih podgrupa su mapirani u mel-spektrograme čija je sličnost unutar podgrupa i između podgrupa analizirana primenom Euklidovog rastojanja. Posebna pažnja je posvećena međusobnoj sličnosti motora unutar podgrupa i između podgrupa.

Ključne reči—Akustičke karakteristike, audio signal, motori sa unutrašnjim sagorevanjem, mel-spektrogram, Euklidovo rastojanje, klasifikacija.

I. UVOD

VELIKI broj vozila prisutnih svakodnevno u saobraćaju na ulicama u urbanom okruženju uticao je na porast zagađenja vazduha u ovakvim sredinama [1]. Kako je broj vozila pokretanih motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, u odnosu na ukupan broj vozila, visok [2], pojedini gradovi su delimično ili potpuno ograničili upotrebu ovakvih vozila u posebno definisanim zonama na svojoj površini [3]. Delimično ograničenje se odnosi na pogonsko gorivo koje se koristi, a što je u direktnoj vezi sa nivoom i sastavom izduvnih gasova, pri čemu se tip pogonskog goriva određuje proverom u bazi podataka prema registarskom broju vozila [4]. Prilikom rada, motori sa unutrašnjim sagorevanjem generišu zvuk koji se odlikuje specifičnim karakteristikama preko kojih je moguće razlikovati pogonsko gorivo.

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), ORCID ID (<https://orcid.org/0009-0008-8866-2303>)

Dejan Ćirić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-4974-3131>)

Amela Zeković – Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, odsek: Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: amela.zekovic@viser.edu.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-4882-4351>)

Činjenice da je potrebno razlikovati pogonsko gorivo i da se zvuk generisan radom motora na različitim pogonskim gorivima razlikuje, bile su motiv za razvoj automatizovanog sistema za prepoznavanje pogonskog goriva na osnovu zvuka motora. Zadatak sistema je da primeni odgovarajući algoritam veštačke inteligencije koji bi uzorke klasifikovao u dve klase - motore koji rade na benzin i motore koji rade na dizel gorivo. Sa tim ciljem je razvijen akvizicioni sistem kojim je prikupljeno 475 uzoraka (audio signala) zvuka rada motora.

U prethodnim fazama ovog istraživanja posebna pažnja je posvećena obradi signala tj. ulazu u sistem kako bi rezultat klasifikacije bio što precizniji. Obrada je prvo realizovana u vremenskom domenu, normalizacijom i izdvajanjem odgovarajućeg režima rada motora [5], a zatim i konverzijom u slike bazirane na spektrogramu [6]. Rezultat klasifikacije su, pored velikog broja tačno klasifikovanih uzoraka, i dve manje podgrupe uzoraka koje su pogrešno klasifikovane. Na osnovu dobijenih rezultata formirane su četiri podgrupe: benzinski motori klasifikovani tačno ("benzin klasifikovan kao benzin" - BkB), dizel motori klasifikovani tačno (DkD), benzinski motori klasifikovani kao dizel motori (BkD) i dizel motori klasifikovani kao benzinski motori (DkB).

U ovom radu su detaljno analizirane podgrupe uzoraka koje su rezultat pogrešne klasifikacije (BkD i DkB) sa ciljem da se utvrdi heterogenost uzoraka unutar identifikovanih podgrupa, kao i međusobne razlike, odnosno sličnosti unutar podgrupa i između podgrupa. Dodatno su u cilju analize formirane dve podgrupe gde su smešteni uzorci koji perceptivno najjasnije pripadaju klasi motora na benzin ("benzin percipiran kao benzin" - BpB), odnosno motora na dizel (DpD). Na isti način su formirane još dve podgrupe - dizel motora koji slušaocu mogu zvučati kao benzinski (DpB) i benzinskih motora koji slušaocu mogu zvučati kao dizel motori (BpD). Oslanjajući se na ranije faze istraživanja [6], podgrupe uzoraka su konvertovane u mel-spektrogram. Nakon toga je primenjen proračun Euklidovog rastojanja. Dobijena rastojanja su prikazana grafički u vidu *heatmap*-e kako bi se najlakše uočila homogenost u okviru podgrupa.

Rad je podeljen u IV poglavlja. U poglavlju II je opisana metodologija, i dati su karakteristični mel-spektri reprezentivnih uzoraka. Poglavlje III sadrži opis rezultata i prikaz karakterističnih grafika proračunatih Euklidovih rastojanja za svaku od podgrupa, kao i analize njihovih karakteristika. Zaključci analize su dati u poglavlju IV.

II. METODOLOGIJA

Primena algoritma veštačke inteligencije na generisanu

bazu audio signala koja se sastoji od 475 zvukova motora sa unutrašnjim sagorevanjem sa ciljem klasifikacije motora po pogonskom gorivu, rezultirala je velikim brojem tačno klasifikovanih uzoraka, pri čemu je određeni broj uzoraka, ispod 10%, pogrešno klasifikovan. Broj benzinskih motora klasifikovanih kao dizel motor bio je za 25% veći nego broj dizel motora klasifikovanih kao benzin. Od pogrešno klasifikovanih uzoraka su, u cilju razumevanja uzroka pogrešne klasifikacije, formirane dve podrupe - podgrupa DkB i podgrupa BkD. Preslušavanjem je utvrđeno da u ovim podgrupama postoje određene sličnosti, pa su stoga formirane još četiri podgrupe. One sadrže i) benzinske motore koji najviše zvuče kao benzinski motori (BpB), ii) dizel motore koji najviše zvuče kao dizel motori (DpD), iii) benzinske motore koji se slušanjem mogu biti prepoznati kao dizel motori (BpD), i iv) dizel motore koji svojim zvukom liče na benzinske motore (DpB). Broj uzoraka u podgrupama je po 16 najrepresantivnijih zvukova, kako bi se omogućio prikaz rezultata u vidu simetričnih grafika.

A. Mapiranje audio signala u mel-spektrograme

U ranijim fazama istraživanja je uočeno da mapiranje audio signala u mel-spektrograme daje određene razlike između motora koji pripadaju različitim klasama [6]. Zbog toga je odlučeno da se ova reprezentacija koristi kao ulaz za algoritam klasifikacije i analizu koja je ovde prezentovana.

Spektrogram, $X[k, \tau]$, se dobija primenom Furijeove transformacije u kratkim vremenskim intervalima (*Short-Time Fourier Transform* - STFT) na audio signal, x , [7-10]

$$X[k, \tau] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n + h\tau] \cdot e^{-2\pi j(kn/N)} \quad (1)$$

gde k predstavlja frekvencijski, a τ vremenski korak u okviru spektrograma. Veličina N predstavlja veličinu prozora, n je indeks odbiraka za ulazni talasni oblik, a h veličina koraka u vremenu.

Mel spektrogrami koriste mel skalu koja ima frekvencijske opsege različite širine usaglašene sa ljudskom percepcijom zvuka. Mel skala je kreirana na takav način da uključuje osobinu čula sluha da nema jednaku osetljivost na komponente iz različitih frekvencijskih opsega.

Mapiranje audio signala u mel-spektrogram je realizovano upotrebom programskog jezika *Python* i biblioteke *librosa* [11]. Kreirane su odgovarajuće funkcije sa parametrima:

- veličina prozora 1024 i korak 256 odmeraka;
- broj generisanih mel frekvencijskih opsega 96;
- prag izlaznog signala u odnosu na maksimalnu amplitudu 80 dB za određivanje amplitude signala u dB.

Rezultat konverzije audio signala trajanja 5 sekundi, snimljenih sa frekvencijom odmeravanja 44100 Hz i 16 bita po odmerku, su mel-spektrogrami dimenzija 862×96 tačaka.

B. Proračun i prikaz Euklidovog rastojanja

Kako bi se kvantifikovala homogenost (sličnost) u okviru podgrupa, upotrebljena je često korišćena metoda u obradi slika, proračun Euklidovog rastojanja [12-13]. Ova metrika

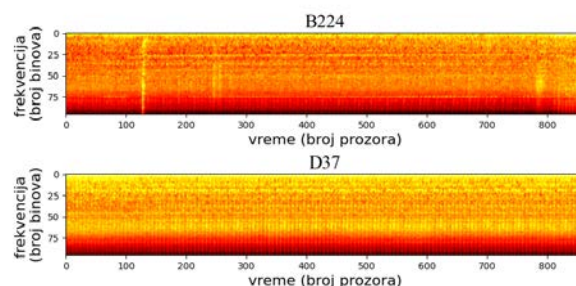
može da se koristi za rastojanje između tačaka, ali i za određivanje sličnosti između slika korišćenjem N -dimenzionalne verzije izraza za Euklidovo rastojanje. Metrika podrazumeva određivanje kvadratnog korena sume apsolutnih razlika pojedinačnih tačaka vektora:

$$DE(p_k, q_k) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (p_k - q_k)^2} \quad (2)$$

Euklidovo rastojanje je izračunato za sve podgrupe uzoraka na osnovu mel-spektrograma. Kako bi se formirao grafički prikaz u vidu kvadratne *heatmape*-e, Euklidovo rastojanje je izračunato za parove uzoraka po principu svaki uzorak sa svakim iz podgrupe. Prilikom formiranja grafičkog prikaza x i y -osa su definisane nazivima uzoraka. Dodatno su proračunata Euklidova rastojanja između reprezentativnih uzoraka i uzoraka u svakoj od podgrupa, kako bi se proverila sličnost sa predstavnicima klasa i uporedila međusobna sličnost podgrupa.

III. REZULTATI

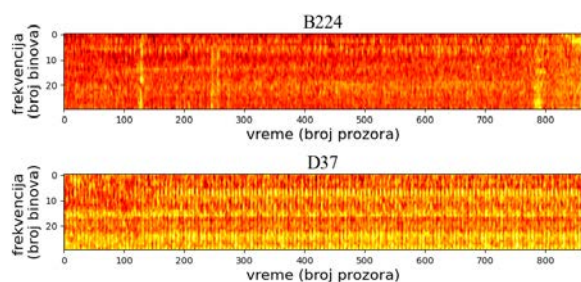
Ilustracija dva reprezentativna mel-spektrograma dizel i benzinskog motora je data na Sl. 1. Razlog za obeležavanje osa na grafičkom prikazu u pikselima je jednostavnija manipulacija sa dimenzijama matrica koje predstavljaju ulaz u algoritam za klasifikaciju.



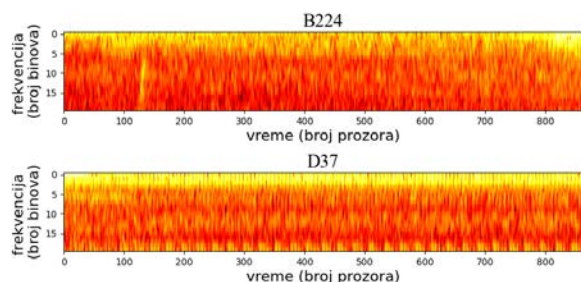
Sl.1. Mel-spektrogrami reprezentativnog benzinskog i dizel motora

Dodatnom opservacijom dobijenih mel-spektrograma je uočeno da postoje jasne razlike i po x i po y -osi tj. i po rasporedu energije po frekvencijama i po vremenu, pa je na Sl. 2 dat prikaz izvojenih delova mel-spektrograma za opseg viših učestanosti (za 20 tačaka po y -osi). Uporedni prikaz mel-spektrograma izdvojenih po y -osi od 30. do 60. tačke tj. u srednjem opsegu učestanosti je dat na Sl. 3. Pored uočene razlike u frekvencijskom domenu, vidljiva je razlika i u vremenskom domenu gde kod dizel motora postoji izražena periodičnost signala.

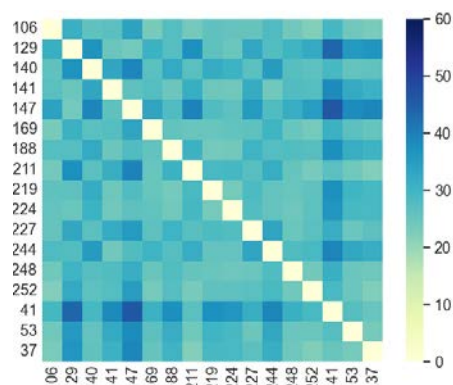
Proračunom Euklidovog rastojanja na osnovu mel-spektrograma za svih šest podgrupa dobijene su vrednosti međusobnog rastojanja, odnosno sličnosti koje su grafički prikazane na Sl. 4 do Sl. 9. Statističke vrednosti Euklidovog rastojanja su data tabelarno za parove poređenih mel-spektrograma, i to maksimalne, medijalne i srednje (prosečne) vrednosti za svaku od podgrupa, videti Tabelu 1.



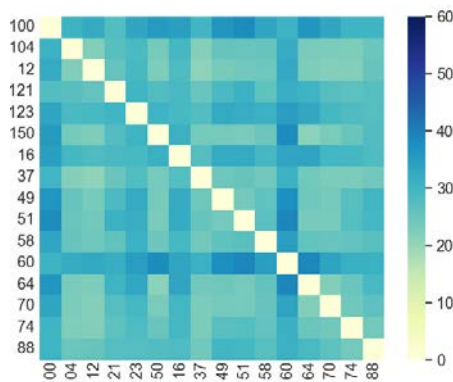
Sl.2. Izdvojeni delovi mel-spektrograma reprezentativnog benzinskog i dizel motora



Sl.3. Izdvojeni delovi mel-spektrograma reprezentativnog benzinskog i dizel motor



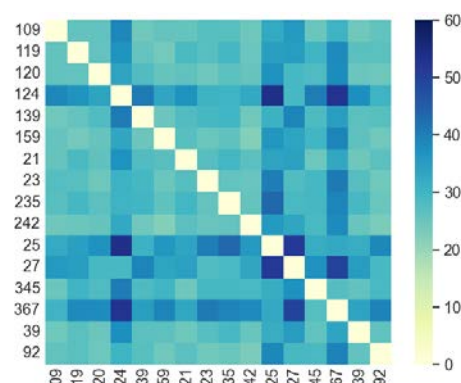
Sl. 4. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe benzinskih motora koji zvuče kao benzinski motori (BpB)



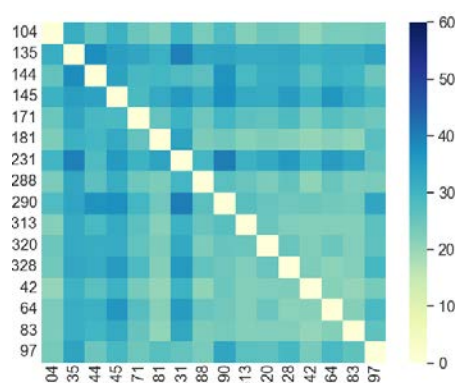
Sl. 5. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe dizel motora koji zvuče kao dizel motori (DpD)

Opseg prikaza vrednosti Euklidovih rastojanja za svaki od grafika podešen je od 0 do 60, jer je maksimalna vrednost

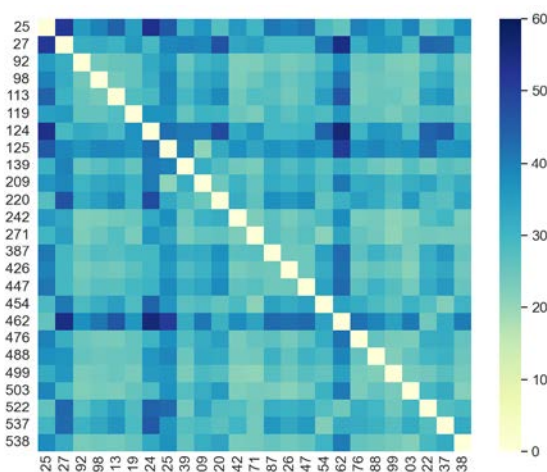
dobijenih rastojanja, uzimajući u obzir rezultate za svih šest podgrupa, iznosila 55.8 i to u podgrupi BkD (Sl. 8).



Sl. 6. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe benzinskih motora koji zvuče kao dizel motori (BpD)



Sl. 7. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe dizel motora koji zvuče kao benzinski motori (DpB)

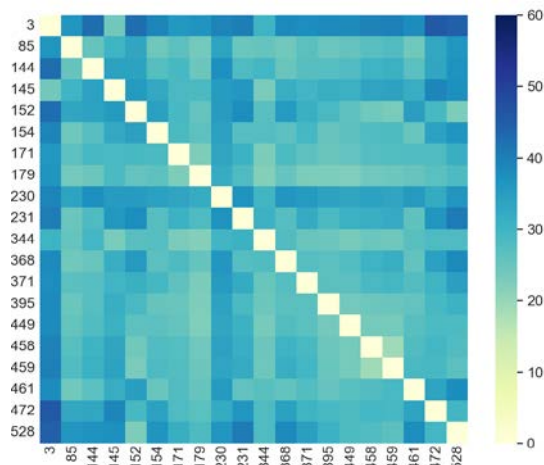


Sl. 8. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe benzinskih motora koje je algoritam klasifikao kao dizel motori (BkD)

Posmatrajući sve dobijene grafičke prikaze Euklidovog rastojanja mogu se uočiti dijagonale svetle boje koje reprezentuju vrednost 0, što je rezultat za rastojanje između istih mel-spektrograma (uzorak uparen sa samim sobom), dok su veće vrednosti rastojanja prikazane tamnijim bojama.

Uporednom analizom Sl. 4 i Sl. 5, odnosno podgrupa BpB i DpD, moguće je uočiti da su razlike između uzoraka u

podgrupi dizel motora (DpD) manje. Uzorci koji se izdvajaju kao tamnije vertikalne ili horizontalne linije se mogu izdvojiti za dodatnu analizu jer oni predstavljaju uzorke koji se najviše razlikuju u okviru iste podgrupe. Posmatrajući Tabelu 1 za ove dve podgrupe, uočljivo je da je maksimalna vrednost Euklidovog rastojanja u podgrupi benzinskih motora (BpB) znatno veća nego kod dizel motora. U ovoj podgrupi su i vrednosti medijane i prosečne vrednosti Euklidovog rastojanja bliže, što odgovara ravnomernijoj raspodeli rastojanja, odnosno većoj homogenosti unutar podgrupe.



Sl. 9. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe dizel motora koje je algoritam klasifikovao kao benzinski motori (DkB)

TABELA I

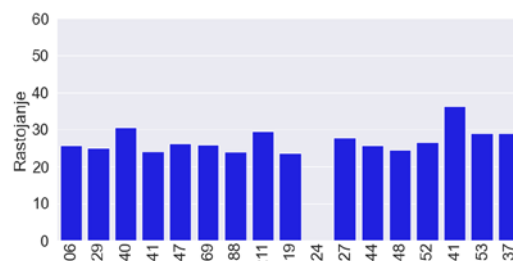
STATISTIČKE VREDNOSTI EUKLIDOVOG RASTOJANJA U OKVIRU PODGRUPA

Podgrupa	Maksimalna vrednost	Vrednost medijane	Prosečna vrednost
BpB	45.99	27.45	28.83
DpD	38.97	27.66	28.06
BpD	53.75	29.09	30.76
DpB	40.42	26.83	27.72
BkD	55.80	29.73	30.91
DkB	45.82	28.94	30.15

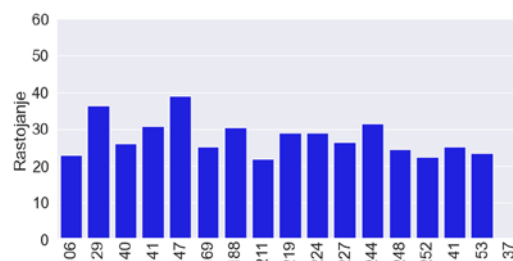
Komparacijom Euklidovih rastojanja u okviru podgrupe BpD i podgrupe DpB (Sl. 6 i 7), ponovo je moguće uočiti manje varijacije rastojanja odnosno veću homogenost uzoraka u podgrupi dizel motora. Uzimajući u obzir vrednosti iz Tabele 1. maksimalno rastojanje za podgrupu BpD je za oko 32% veće nego za podgrupu DpB. Vrednosti medijane i prosečne vrednosti rastojanja u okviru ove podgrupe DpB su na manjem međusobnom rastojanju, što takođe ukazuje na veću homogenost u okviru ove podgrupe.

Koristeći dva audio signala, jedan koji predstavlja tipičan zvuk benzinskog motora (referentni benzinski motor) i drugi koji predstavlja karakterističan zvuk dizel motora (referentni dizel motor) - B224 i D37, respektivno (Sl. 1), proračunata su Euklidova rastojanja za podgrupu gde se nalaze samo benzinski motori (BpB) i za podgrupu gde su izdvojeni dizel motori (DpD). Na osnovu dobijenih prikaza vrednosti

Euklidovih rastojanja u okviru podgrupe BpB u odnosu na referentni uzorak benzinskog i dizel motora (Sl. 10 i 11), moguće je uočiti nešto veću sličnost i manje varijacije rastojanja kada se vrši poređenje sa referentnim benzinskim motorom u odnosu na poređenje sa referentnim dizel motorom. Međutim, ovde postoje i benzinski motori koji su slučajni referentnom dizel motoru nego referentnom benzinskom motoru.

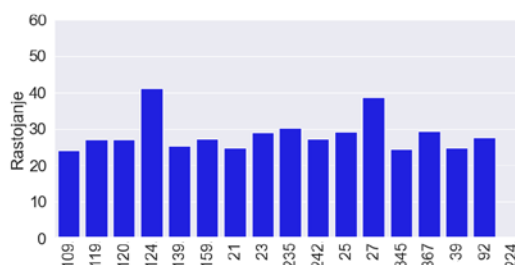


Sl. 10. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe benzinskih motora BpB u odnosu na referentni benzinski motor



Sl. 11. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe benzinskih motora BpB u odnosu na referentni dizel motor

Grafički prikazi vrednosti Euklidovih rastojanja u okviru podgrupe BpD u odnosu na referentne uzorke benzinskog i dizel motora (Sl. 12 i 13, respektivno) načelno nemaju velikih razlika. Međutim, moguće je uočiti da se uzorci koji imaju najmanje sličnosti sa jednim referentnim uzorkom ne ponavljaju u odnosu na drugi referentni uzorak, npr. 124 i 27 u komparaciji sa referentnim benzinskim motorom i 25 i 367 u odnosu na referentni dizel motor.

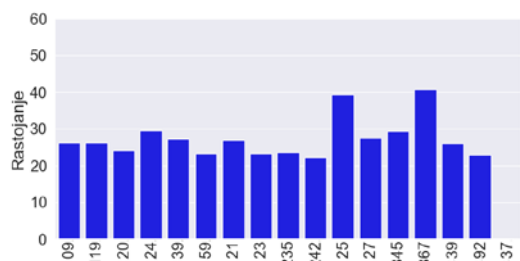


Sl. 12. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe BpD u odnosu na referentni benzinski motor

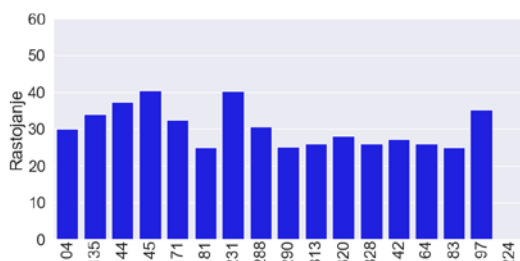
U okviru podgrupe DpB, evidentno je uočljivija veća sličnost sa referentnim uzorkom dizel motora, videti Sl. 14 i 15, što ukazuje na veću homogenost među uzorcima dizel motora, bez obzira kako oni zvučali.

Euklidova rastojanja proračunata za podgrupe uzoraka koje je algoritam pogrešno klasifikovao (BkD i DkB) u odnosu na referentne motore su data na od Sl. 16 do 19. Ovde je moguće

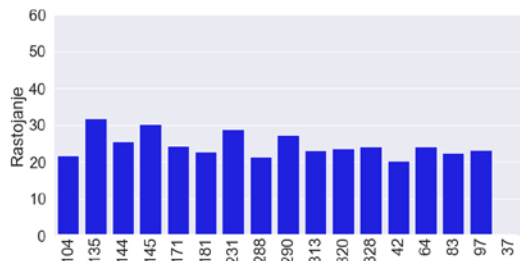
uočiti identičnu pojavu kao i za podgrupe formirane slušanjem (percepcijom), a to je veća homogenost u podgrupi dizel motora. U odnosu na podgrupe dizel motora formirane slušanjem, Euklidova rastojanja su za pojedine uzorke u DkD podgrupi nešto veća, što i dalje ne narušava uniformnije rezultate, dok je u slučaju podgrupe benzinskih motora (BkB) prisutna veća heterogenost, što takođe odgovara podgrupama benzinskih motora formiranih slušanjem.



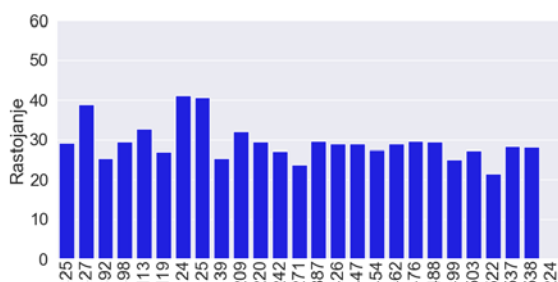
Sl. 13. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe BpD u odnosu na referentni dizel motor



Sl. 14. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe DpB u odnosu na referentni benzinski motor



Sl. 15. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe DpB u odnosu na referentni dizel motor

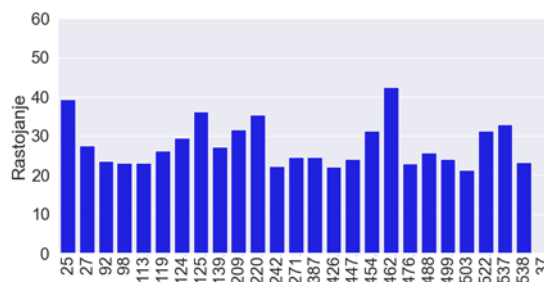


Sl. 16. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe BkD u odnosu na referentni benzinski motor

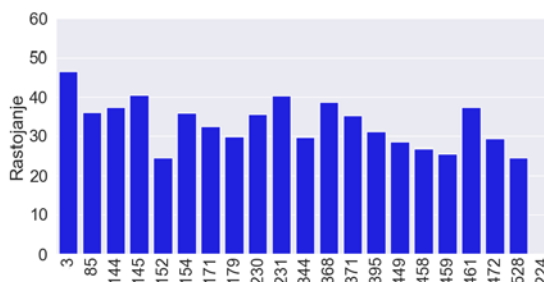
Poređenje motora iz podgrupe BkD sa referentnim benzinskim i dizel motorom je prikazano na Sl. 16 i 17. Na osnovu njih je moguće zaključiti, slično kao i kod podgrupa

formiranih slušanjem, da postoji određena heterogenost u ovim podgrupama. Pored toga, uzorci sa maksimalnim rastojanjem u odnosu na jedan referentni motor se ne ponavljaju za drugi referentni motor.

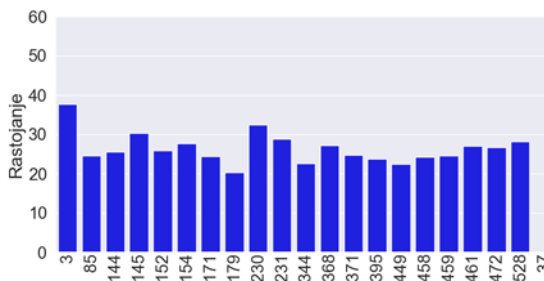
U podgrupi DkB, prilikom poređenja sa referentnim motorima (Sl. 18 i 19), moguće je uočiti veću sličnost sa referentnim dizel motorom. Ovakav odnos Euklidovih rastojanja postoji i u podgrupama dizel motora formiranih slušanjem.



Sl. 17. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe BkD u odnosu na referentni dizel motor



Sl. 18. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe DkB u odnosu na referentni benzinski motor



Sl. 19. Euklidovo rastojanje u okviru podgrupe DkB u odnosu na referentni dizel motor

IV. ZAKLJUČAK

Primenom automatizovanog sistema za klasifikaciju, koji je baziran na algoritmu veštačke inteligencije, na interno generisanu bazu zvukova motora sa unutrašnjim sagorevanjem, identifikovan je određeni broj pogrešno klasifikovanih motora. Ovaj broj predstavlja nešto manje od 10% celokupne baze prikupljenih audio signala. U cilju analize uzroka, pogrešno klasifikovani motori su smešteni u dve podgrupe - BkD i DkB. Od pravilno klasifikovanih motora su formirane još četiri podgrupe na osnovu preslušavanja signala - dve podgrupe koje prema slušanju predstavljaju ispravno klasifikovane uzorke (BpB i DpD) i još

dve podgrupe koje sadrže uzorke pogrešno klasifikovane slušanjem (BpD i DpB). Dodatno su iz baze preslušavanjem izdvojena dva referentna motora - jedan predstavnik klase benzinskih motora, i jedan predstavnik klase dizel motora.

Na osnovu rezultata proračuna Euklidovog rastojanja unutar podgrupa, prikazanih na od Sl. 4 do 9, uočeno je da su podgrupe sastavljene od uzoraka dizel motora homogenije u odnosu na grupe sastavljene od benzinskih motora. Ovaj zaključak potvrđuje veću međusobnu sličnosti dizel motora koja je zapažena preslušavanjem uzoraka. U podgrupama sastavljenim od benzinskih motora, međusobne razlike su i slušanjem i nakon proračuna Euklidovog rastojanja mel-spektrograma veće. Do ovog zaključka se dolazi i poređenjem Sl. 4, 6 i 8 sa Sl. 5, 7 i 9 gde se jasno uočava veća homogenost u podgrupama sastavljenim od dizel motora.

Poređenjem uzoraka iz podgrupe karakterističnih benzinskih motora izdvojenih slušanjem (BpB) sa referentnim benzinskim motorom dobijena je veća sličnost u odnosu na poređenje sa referentnim dizel motorom, uprkos činjenici da su benzinski motori u okviru svoje podgrupe manje homogeni (Sl. 10 i 11). Motori iz podgrupe BpD i DpB pokazale su veću međusobnu sličnost nego sličnost sa referentnim motorom koji koristi isto pogonsko gorivo. Naime benzinski motori iz podgrupe BpD u pogledu Euklidovog rastojanja daju slične rezultate u poređenju i sa referentnim benzinskim i dizel motorom, Sl. 12 i 13. Sa druge strane, dizel motori iz podgrupe DpB pokazuju za nijansu veću sličnost sa referentnim dizel (Sl. 15) nego sa referentnim benzinskim motorom (Sl. 14). Posmatrajući poređenje uzoraka iz podgrupa formiranih od motora koje je algoritam pogrešno klasifikovao, moguće je doći do identičnog zaključka kao i za podgrupe formirane slušanjem. Benzinski motori iz podgrupe BkD dovode do sličnih vrednosti Euklidovog rastojanja u poređenju i sa referentnim benzinskim i dizel motorom (Sl. 16 i 17), pri čemu je uočljiva nešto veća homogenost u odnosu na referentni benzinski motor. Kod podgrupa sačinjenih od dizel motora (DkB) postoji veća sličnost sa referentnim dizel motorom (Sl. 18 i 19).

Dobijeni zaključci ukazuju da je kako slušanjem, tako i proračunom Euklidovog rastojanja veća sličnost među dizel motorima i da ih je lakše pravilno prepoznati i klasifikovati. Ova činjenica objašnjava i razlog manjeg broja pogrešno klasifikovanih dizel motora primenom algoritma veštačke inteligencije.

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. Rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, evidencioni broj 451-03-47/2023-01/200102.

LITERATURA

- [1] <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- [2] Emission Standards: Summary of Worldwide Emission Standards. Available at: www.dieselnet.com/standards/. Accessed 01 April 2023.
- [3] "Net Zero by 2050 – Analysis", IEA, Archived from the original on 19 May 2021, Accessed 01 April 2023.
- [4] D. Muoio, "These countries are banning gas-powered vehicles by 2040", Business Insider, Archived from the original on 28 September 2020. Accessed 01 April 2023.
- [5] M. Milivojević, E. Kisić, D. Ćirić, „Izdvajanje režima praznog hoda motora sa unutrašnjim sagorevanjem na osnovu audio zapisa “ Zbornik radova 65 Konferencije ETRAN, Etno Selo Stanišići, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, 8-10 septembar, 2021.
- [6] M. Milivojević, E. Kisić, D. Ćirić, „Komparativna analiza akustičkih signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem mapiranih u slike bazirane na spektrogramu“ Zbornik radova 66 Konferencije ETRAN, Novi Pazar, Srbija, 6-9 jun, 2022.
- [7] K. W. Cheuk, K. Agres, D. Herremans, "The impact of audio input representations on neural network based music transcription," International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Glasgow, UK, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207605
- [8] S. S. Stevens, J. Volkman, E. B. Newman, "A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 8, no. 3, pp. 185-190, January 1937.
- [9] J. Thickstun, Z. Harchaoui, S. M. Kakade, "Learning features of music from scratch," *ArXiv*, vol. abs/1611.09827, 2016.
- [10] B. Li, *Machine Learning for Audio Signals*, ECE 272/472 Audio Signal Processing, University of Rochester, 2018.
- [11] McFee, Brian, C. Raffel, D. Liang, D. PW Ellis, M. McVicar, E. Battenberg, O. Nieto. "Librosa: Audio and music signal analysis in Python." *Proc. 14th Python in Science Conference*, pp. 18-25. 2015.
- [12] K Kavitha, B. Thirumala Rao, "Evaluation of distance measures for feature based image registration using AlexNet," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, no. 10, 2018.
- [13] L. Wang, Y. Zhang, J. Feng, "On the Euclidean distance of images," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, no. 8, pp. 1334-1339, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPAMI.2005.165.

ABSTRACT

Internal combustion engines during their operation generate sound that is characterized by specific characteristics through which these engines can be distinguished from each other. This fact can serve as a basis for the development of an automated system for the recognition of internal combustion engines based on fuel, that is, for the classification of engines into those that use diesel and those that use gasoline. The mentioned system is typically based on the application of a suitable artificial intelligence algorithm. In this context, the input to such a system is of great importance, that is, how to present the sound of the engine. One of the options is related to the mapping of engine sound into corresponding images, where an often applied alternative is mel-spectrogram. This paper uses an internally generated database of internal combustion engine sounds consisting of 475 diesel and gasoline engine sounds. Characteristic subgroups of engines (sounds) were identified from this database. The sounds from these subgroups were mapped into mel-spectrograms whose similarity within subgroups and between subgroups was analyzed using the Euclidean distance. Special attention is paid to the similarity between motors within and between subgroups.

Similarity of Internal Combustion Engine Sounds based on Mel-spectrogram

Marko Milivojević, Dejan Ćirić, Amela Zeković