

Izdvajanje značajnih akustičkih karakteristika motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Marko Milivojčević, Dejan Ćirić

Apstrakt— U ovom radu su izdvojena, a zatim i analizirana akustička obeležja motora sa unutrašnjim sagorevanjem putničkih vozila pokretanih najzastupljenijim fosilnim gorivima - benzinom i dizelom. Analiza je realizovana u softveru Matlab upotrebom predefinisanih funkcija za izdvajanje akustičkih (audio) obeležja signala. Analizom su obuhvaćena obeležja u vremenskom i u frekvencijskom domenu, odnosno, ukupno je analizirano po 35 akustičkih obeležja za svaki tip pogonskog goriva. Cilj ovako obimne analize je izdvajanje značajnih akustičkih karakteristika (obeležja) na osnovu kojih bi postojala mogućnost razlikovanja tipa pogonskog goriva kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem korišćenih u putničkim vozilima.

Ključne reči—akustičke karakteristike, motori sa unutrašnjim sagorevanjem, audio obeležja, vremenski domen, frekvencijski domen.

I. UVOD

Zvuk generisan radom motora sa unutrašnjim sagorevanjem sniman mikrofonom postavljenim u oblasti ispod samog motornog prostora, dok se motor nalazi u praznom hodu tj neopterećenom stanju, predstavlja audio signal koji je predmet analize u ovom radu. Ovakav audio signal predstavlja i predmet analize u [1] i [2], a sve sa ciljem identifikacije pogonskog goriva na osnovu akustičkih karakteristika datog signala. U [1] su analizirani spektri signala audio zapisa koji potiču od motora pokretanih različitim pogonskim gorivima, pri čemu su utvrđene izvesne razlike prilikom poređenja ovih signala. U [2] je analiziran uticaj položaja i tipa mikrofona na karakteristiku audio zapisa, pri čemu je utvrđeno da vremenski oblik signala minimalno varira bez obzira na tačku u kojoj je postavljen merni mikrofoni. Takođe je moguće uočiti da tip izduvnog sistema vozila ne utiče na oblik audio zapisa.

U cilju uočavanja što jasnije razlike u karakteristikama audio signala koji potiču od motora na benzin i dizel u ovom radu je izvršena sveobuhvatnija analiza u odnosu na [1]. Analiza se ovde bazira na izdvajanju audio obeležja (u engl. literaturi *features*) koja se odnose na vremenski i frekvencijski domen. U svakom od ovih domena su, za svaki tip pogonskog goriva, posmatrane karakteristike interesantne iz ugla mašinskog učenja i klasifikacije audio signala. Kako je dostupan broj ovih obeležja veliki, krajnji cilj analize je

izdvajanje najznačajnijih od njih, odnosno karakteristika čijim poređenjem se mogu uočiti najveće razlike između motora.

Rezultati analize pokazuju da postoje akustička obeležja između kojih postoji jasna razlika u zavisnosti od pogonskog goriva.

II. PREGLED LITERATURE

U dostupnoj literaturi može se uočiti da ne postoji veliki broj radova čija je tema izdvajanje i analiza audio obeležja motora sa unutrašnjim sagorevanjem putničkih vozila, kao ni motora sa unutrašnjim sagorevanjem uopšteno. U najvećem broju slučajeva, kada su predmet istraživanja obeležja audio signala, dostupni su radovi na temu automatskog prepoznavanja govora što predstavlja posledicu dugogodišnjeg razvoja ove oblasti. Karakteristike audio signala govora i motora sa unutrašnjim sagorevanjem se razlikuju, kako u vremenskom tako i u frekvencijskom domenu [3], pa je u dosadašnjim radovima akcenat bio na separaciji ova dva izvora signala. Radovi čija su tema isključivo audio signali motora sa unutrašnjim sagorevanjem pretežno su fokusirani na industrijsku primenu i na detekciju nepravilnosti u radu motora pokretanih na jedno od fosilnih goriva, benzin ili dizel [4, 5, 6]. U [7] upotrebljen je psihoakustički pristup analizi audio signala generisanih radom automobilskih motora, odnosno analiziran je jedan od tri bitna parametra sa stanovišta psihoakustike, "grubost" audio signala. Ovo je postignuto upotrebom kompleksne kepralne analize što će se takođe pokazati kao jedno od veoma važnih obeležja u ovom radu.

III. METODOLOGIJA

Uzorci audio signala korišćeni za analizu su generisani četvrocilindričnim motorima putničkih vozila približno iste zapremine u okviru istog tržišnog segmenta, što ne bi trebalo da bude zanemarljiv faktor uzimajući u obzir činjenicu da vozila iz različitih segmenata imaju i različite nivoe zvučne izolacije, kao i kompleksnost izduvnog sistema. U pitanju su vozila iz nižeg segmenta: Renault Clio radne zapremine 1149 cm³ sa četiri ventila po cilindru, pokretan na benzin i Opel Corsa radne zapremine 1248 cm³ sa četiri ventila po cilindru pokretana na dizel takođe korišćena u [1], gde je posmatran spektar signala. Uzorci su snimljeni ručnim snimačem Zoom H4n u mono wav formatu sa rezolucijom od 24 bit po uzorku i sa frekvencijom odabiranja od 48000 odbiraka u sekundi. Rad motora je sniman u režimu praznog hoda na približno 700

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)

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

obrataja radilice u minutu. Dužina analiziranih audio sekvenci je 5 sekundi, odabrana tako da ne zahteva preveliko vreme obrade, a da sa druge strane obezbedi dovoljno ponavljanje signala.

Audio obeležja dobijena za dva uzorka zvuka motora su izdvojena primenom predefinisanih funkcija opisanih u [8]. Referenca [8] predstavlja objedinjeni skup matematičkih funkcija za izdvajanje audio obeležja pre svega govornih signala, ali bez ograničenja i na druge tipove audio signala.

Proces izdvajanja obeležja započinje deljenjem originalnog snimka zvuka motora na segmente kraćeg i fiksnog vremenskog trajanja koji se zatim pojedinačno obrađuju u odgovarajućim matematičkim funkcijama. Rezultat ovakve obrade je vektor obeležja koji se dobija nakon obrade u kraćim vremenskim intervalima (*short-term analysis*), a zatim i obradom u intervalima srednje dužine trajanja (*mid-term analysis*), čime se dobijaju statistički parametri, odnosno varijacije obeležja po ovim parametrima - srednja vrednost (*mean*), medijana (*median*), standardna devijacija (*std*), standardna devijacija podeljena srednjom vrednošću (*stdbymean*) maksimalna i minimalna vrednost (*max*, *min*), itd. U funkcijama za podelu ulaznog signala na segmente postoji mogućnost definisanja trajanja segmenta kao i vremenskog koraka analize (preklapanja, u engleskoj literaturi *overlap* ili *hop size*). U ovom radu su korišćene preporučene vrednosti [8] za *short-term* i *mid-term* analizu, odnosno dužina segmenta *short-term* analize od 50 μ s sa korakom od 25 μ s i dužina segmenta 2s sa korakom od 1 s za *mid-term* analizu. Rezultat upotrebe preporučenih parametara je dao najoptimalnije i grafički najjednoznačajnije rezultate.

IV. REZULTATI

Rezultati izdvajanja audio obeležja su predstavljeni grafički pri čemu je x-osa za svako od obeležja iz vremenskog domena vreme kako bi se uočile varijacije odgovarajućih obeležja na celokupnom trajanju audio uzorka.

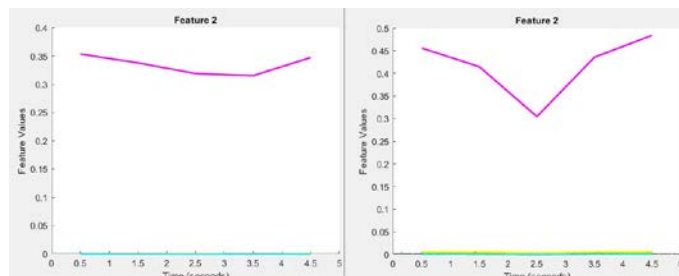
A. Vremenski domen

Izdvojena obeležja u vremenskom domenu predstavljaju najzastupljenija obeležja signala u audio analizi: energiju, entropiju energije i broj prolaza kroz nulu (*zero crossing rate - ZCR*).

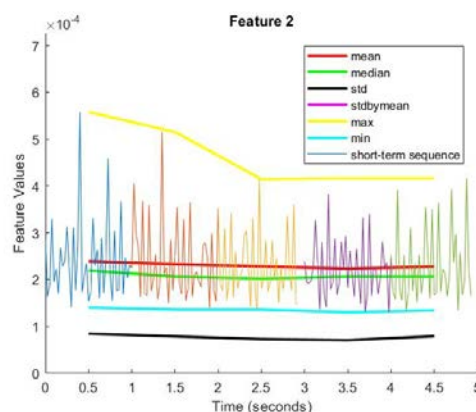
Na Sl. 1 je prikazan rezultat izvršavanja funkcije za izdvajanje obeležja koje prestavlja energiju audio zapisa vozila pokretanih na benzin (levo) i na dizel (desno). Uporednim pregledom obeležja datih na Sl. 1 može se uočiti da se po vrednosti izdvaja standardna devijacija podeljena srednjom vrednošću vektora energije dobijenog pojedinačnim izračunavanjem energije za svaki od audio segmenata analiziranog uzorka.

Detaljnijom analizom proračunatih statističkih parametara iz *mid-term* opsega koji se odnose na energiju signala (maksimalna i minimalna vrednost, medijana, standardna devijacija, srednja vrednost) koje su prikazane na Sl. 2 i 3 jasno se može uočiti razlika u nivoima maksimalne i minimalne vrednosti energije, koja su kod vozila pokretanog

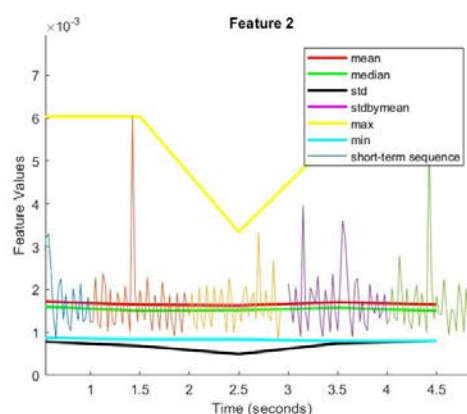
na dizel približno deset puta veće u odnosu na vozilo pokretano na benzin. Posmatrajući srednju vrednost i medijanu takođe se može uočiti da su vrednosti kod dizel motora znatno veće što je posledica višeg nivoa signala koje ovakav motor generiše. Standardna devijacija, kao mera disperzije u određenom skupu, je na obadva uzorka gotovo konstantna, ali je kod dizel motora približno deset puta veća što se u realnosti može precipirati "grubljim" radom motora.



Sl. 1. Audio obeležje energija audio zapisa vozila pokretanog na benzin (levo) i na dizel (desno).



Sl. 2. Audio obeležje energija audio zapisa vozila pokretanog na benzin, uvećani prikaz.

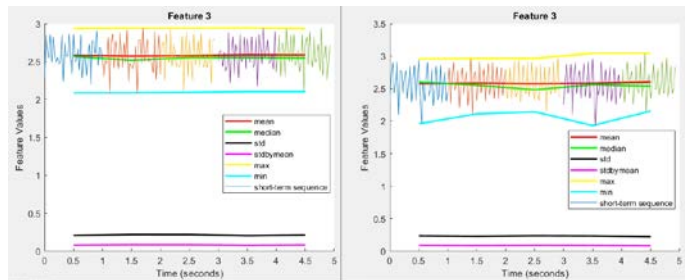


Sl. 3. Audio obeležje energija audio zapisa vozila pokretanog na dizel, uvećani prikaz.

Posmatrajući vrednosti audio obeležja energije u *short-term* intervalima, može se takođe uočiti određena razlika kod dva

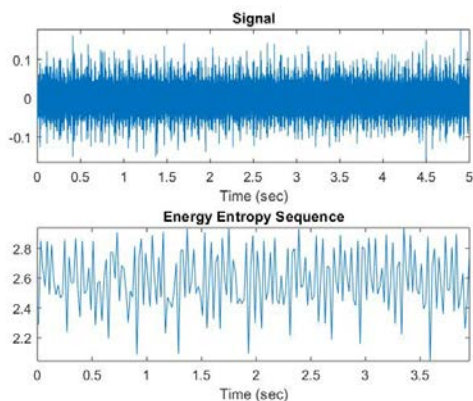
analizirana motora. Naime, kod motora pokretanog na benzin postoji veći broj pikova čije su vrednosti slične, dok se kod motora pokretanog na dizel pojavljuje manji broj pikova veće amplitude u odnosu na ostale vrednosti obeležja (vrednosti u ostalim segmentima).

Entropija energije predstavlja meru nagle promene nivoa energije audio signala [8] što omogućava da ovo obeležje bude upotrebjeno za detekciju značajnih promena u energiji signala kao što su pucnji, detonacije, buka iz okruženja itd. Rezultati izdvajanja ovog obeležja na audio sekvencama motora sa unutrašnjim sagorevanjem su prikazani na Sl. 4.



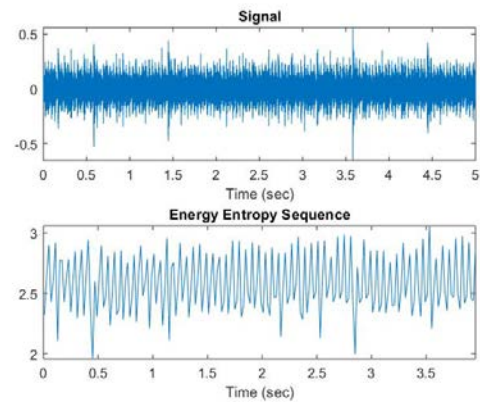
Sl. 4. Audio obeležje entropija energije vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Sa Sl. 4 se može uočiti da su entropije energije motora sa unutrašnjim sagorevanjem pokretanih na benzin i dizel i po vrednosti i po obliku veoma slične, što odgovara “ujednačenom” radu motora u praksi. Perceptivno je moguće zapaziti da je rad konkretnog dizel motora nešto manje “ujednačen”. Sa druge strane, oblik audio obeležja entropija energije iz short-term segmenata se nešto razlikuje kod benzin i dizel motora. Ovaj oblik je nešto “hrapaviji” (sa više zubaca) kod benzinskog motora nego kod dizel motora. Ovo je dodatno ilustrovano na Sl. 5 za vozilo pokretano na benzin, odnosno na Sl. 6 za vozilo pokretano na dizel. Signal u vremenskom domenu je ujednačeniji za benzinski motor, što se konvertuje u entropiju energije koja ima „zupčastu” strukturu ali su šiljci (pikovi) češći i ujednačeniji u odnosu na slučaj kod dizel motora, gde se javlja manji broj ovih šiljaka sa većom razlikom u amplitudi.

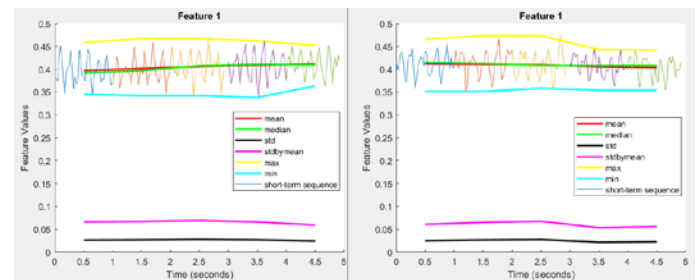


Sl. 5. Audio obeležje entropija energije zvuka vozila pokretanog na benzin dobijena short-term analizom.

Audio obeležje broj prolaza kroz nulu (*Zero crossing rate – ZCR*) predstavlja broj promena predznaka signala u određenom vremenskom okviru, konkretno u ovom radu, u okviru svakog od segmenata analiziranih uzoraka. Izdvajanje ovog obeležja za dva različita tipa pogonskog goriva prikazano je na Sl. 7.



Sl. 6. Audio obeležje entropija energije zvuka vozila pokretanog na dizel dobijena short-term analizom.



Sl. 7. Audio obeležje broj prolaza kroz nulu (ZCR) zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Upoređivanjem prikaza izdvojenog ZCR obeležja na Sl. 7 ne može se uočiti značajna razlika između motora sa unutrašnjim sagorevanjem pokretanih na benzin odnosno dizel zato što se radi o motorima sa istim brojem cilindara i istim brojem radnih taktova u jednom ciklusu, pri čemu rade na približno istom broju obrtaja radilice u minutu pa im je i osnovna frekvencija motora približno jednaka [1].

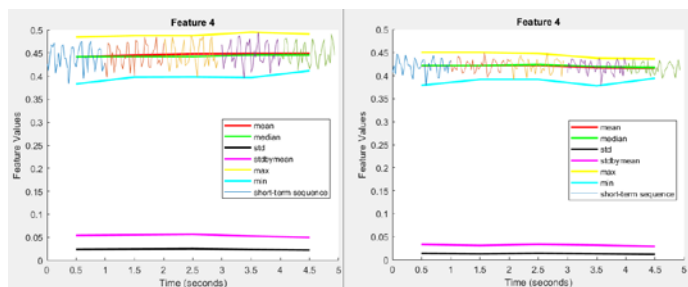
B. Frekvencijski domen

U okviru analize u frekvencijskom domenu prvo je izračunata diskretna Furijeova transformacija (DFT) pojedinačnih segmenata audio uzoraka za svaki od tipova pogonskog goriva nakon čega su izdvojena sledeća obeležja: spektralni centroid i spektralno širenje, spektralna entropija i MFCC (*mel frequency cepstral coefficients*) koeficijenti.

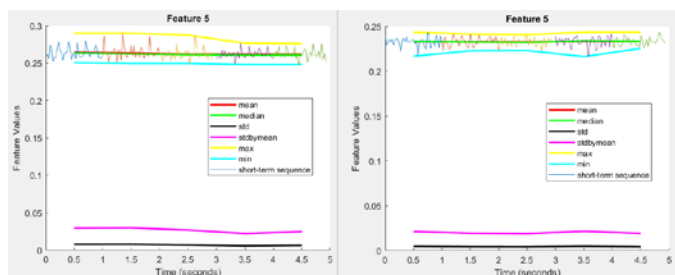
Spektralni centroid i spektralno širenje predstavljaju meru položaja i oblika spektra [8]. Spektralni centroid predstavlja tačku ka kojoj gravitira najveći deo spektra, dok je spektralno širenje druga centralna tačka spektra. Rezultat izdvajanja obeležja spektralni centroid za analizirane uzorke signala je prikazano na Sl. 8 gde se može uočiti kako je tačka ka kojoj gravitira spektar vozila pokretanog na dizel niža u odnosu na

vozilo pokretano na benzin što odgovara percepciji „dubljeg“ zvuka dizel motora.

Posmatrajući funkciju za dobijanje spektralnog širenja, više (veće) vrednosti dobijenog parametra odgovaraju „svetlijem“ zvuku [8]. Na Sl. 9 su prikazani dobijeni rezultati prilikom izdvajanja ovog obeležja, gde je vidljivo da vozilo pokretano na benzin ima nešto više vrednosti što takođe odgovara percepciji da vozila pokretana na benzin imaju manje prigušen, odnosno „svetliji“ zvuk.

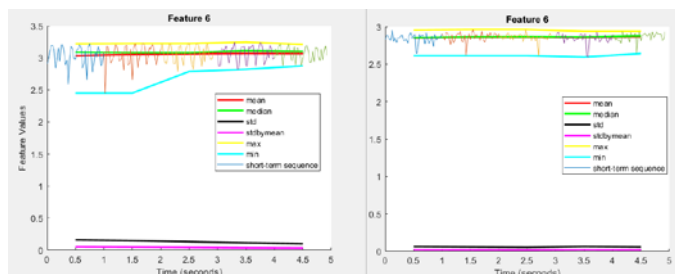


Sl. 8. Audio obeležje spektralni centroid vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).



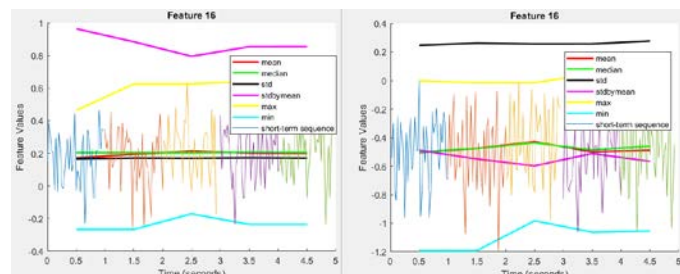
Sl. 9. Audio obeležje spektralno širenje (*spectral spread*) zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Spektralna entropija se izračunava na sličan način kao i entropija energije, pri čemu se kod spektralne entropije spektar deli na manje podopsege za koje se računa entropija normalizovane spektralne energije. Ovo obeležje predstavlja promenljivost spektra na određenim učestanostima. Na Sl. 10, koja prikazuje rezultat izdvajanja ovog obeležja, vozilo pokretano na benzin ima nešto više vrednosti spektralne entropije što ukazuje na zauzimanje nešto viših učestanosti u spektru u odnosu na vozilo pokretano na dizel, iako razlike nisu velike.

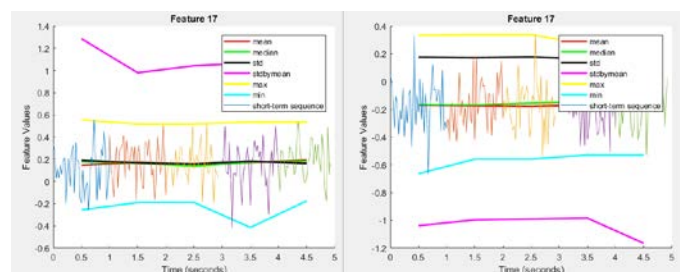


Sl. 10. Audio obeležje spektralna entropija (*spectral entropy*) zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Izdvajanje obeležja MFCC koeficijenata je postupak određivanja keprstralnih koeficijenata prema mel-ovoj skali koja je bazirana na psiho-akustičkoj percepciji. Ovo obeležje audio signala je veoma zastupljeno u sistemima za automatsko prepoznavanje govora [8, 9]. Od ukupno 13 MFCC koeficijenata (obeležja), na Sl. 11 i 12 su prikazana dva kod kojih je posebno jasna vidljiva razlika između vozila pokretanog na benzin i vozila pokretanog na dizel.



Sl. 11. Audio obeležje MFCC broj 8 zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).



Sl. 12. Audio obeležje MFCC broj 9 zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Analizom Sl. 11 i 12 može se uočiti sledeće: vrednost standardne devijacije podeljene sa srednjom vrednošću obeležja je kod vozila na benzin pozitivna, a kod vozila na dizel negativna; maksimalna vrednost obeležja je kod vozila na benzin viša u odnosu na vozilo na dizel; srednja vrednost signala i medijana su kod vozila na benzin pozitivne dok su kod vozila na dizel negativne.

V. ZAKLJUČAK

Analizom obeležja audio signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem pokretanih na benzin i dizel izvršena u ovom radu sa ciljem da se identifikuju obeležja kod kojih su uočljive najveće razlike u zavisnosti od pogonskog goriva, obuhvaćena su najzastupljenija audio obeležja iz vremenskog i frekvencijskog domena. Određena obeležja karakteristična za muzičke i govorne signale nisu pružila dovoljno jasne rezultate koji bi pomogli u identifikaciji i razdvajanju motora po pogonskom gorivu, pa su u ovom radu izostavljena.

Među izdvojenim obeležjima, dobijeni rezultati su u skladu sa percepcijom slušaoca, pri čemu se vizuelno mogu uočiti razlike između tipa pogonskog goriva. Frekvencijska analiza, a posebno MFCC koeficijenti su dali najuočljiviju razliku između pogonskih goriva što pokazuje njihov potencijal za identifikaciju pogonskog goriva.

Budući rad će, pre svega, biti oslonjen na potencijal ovih audio obeležja, pri čemu je potrebno proces automatizovati i znatno porširiti brojem analiziranih uzoraka kako bi se utvrdila verodostojnost razlikovanja sa što manjom greškom. Broj prolaza kroz nulu (ZCR) je jedino obeležje u ovom radu kod koga je gotovo nemoguće uočiti razliku između pogonskih goriva, ali postoji mogućnost identifikacije drugih parametara motora sa unutrašnjim sagorevanjem, kao što je broj cilindara ili broj radnih taktova.

Potencijal za dalje izdvajanje ovih obeležja ogleda se i u načinu reprezentacije dobijenih podataka, kao i u ukrštanju odgovarajućih obeležja sa ciljem što tačnije identifikacije pogonskog goriva.

ZAHVALNICA

Istraživanje sprovedeno uz pomoć Fonda za nauku Republike Srbije, 6527104, VI-Com-in-AI.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] S. A. Amman, M. Das, "Internal combustion engine noise analysis and production using a novel multipulse excited time series modeling technique" *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, pp. 2460, 1996.
- [4] T. A. Nguyen, Y. Kai, M. Mikami, "Study on combustion noise from a running diesel engine based on transient combustion noise generation model," *International Journal of Automotive Engineering*, vol. 3, pp. 131-140, 2012.
- [5] J. Yao, Y. Xiang, S. Qian, S. Wang, "Noise source separation of an internal combustion engine based on a single-channel algorithm," *Hindawi-Shock and Vibration*, vol. 2019, 19 pages, 2019.
- [6] V. Singh, N. Meena, "Engine fault diagnosis using DTW, MFCC and FFT," Proc. of the First International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI 2009), Allahabad, India, pp. 83-94, 20-23 January 2009.
- [7] A. Camacho, G. Piñero, M. de Diego, A. González, "Exploring roughness perception in car engine noises through complex cepstrum analysis," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 94, pp. 130-140, January/February 2008.
- [8] T. Giannakopoulos, A. Pikrakis, "Introduction to Audio Analysis, A MATLAB Approach," Academic Press, 2014
- [9] B. J. Mohan, R. Babu N, "Speech recognition using MFCC and DTW", International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Vellore, India, 9-11 January, 2014.

ABSTRACT

In this paper, the acoustic features of the internal combustion engine passenger vehicles that run on most common fossil fuels - petrol and diesel are allocated and then analyzed. The analysis was performed in Matlab software using the predefined functions for extracting acoustic (audio) features of the signal. The analysis included features in the time and frequency domain, i.e., total of 35 acoustic features were analyzed for each type of fuel. The aim of such a comprehensive analysis is the allocation of relevant acoustic features that would enable making a distinction of the type of fuel in internal combustion engines used in passenger cars.

Extracting Relevant Acoustic Features of the Internal Combustion Engines

Marko Milivojčević, Dejan Ćirić