

# Automatsko prepoznavanje akorda pomoću hromatograma

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović  
Laboratorija za akustiku, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu  
Beograd, Srbija  
mt173222m@student.etf.rs; bjelic@etf.rs; dsumarac@etf.rs

**Sadržaj**—Harmonijska struktura tonova muzičkih instrumenata omogućava uvođenje određenih postupaka obrade signala kojima je moguće prepoznati ton koji je odsviran. Akordi, kao sazvučje od tri ili više tonova predstavljaju jedan od osnovnih elementa muzičkih kompozicija. Postupak automatskog prepoznavanja akorda može olakšati rad muzičarima, kompozitorima, ali se može koristiti u pretraživanju audio zapisa po njihovom sadržaju. U ovom radu prikazan je algoritam za automatsko prepoznavanje akorda koji se bazira na izračunavanju hromatograma. Realizovani algoritam omogućava analizu tonova u 12 frekvencijskih opsega koji odgovaraju temperovanim muzičkim skalama. Odnos energija u polustepenima hromatograma iskorišćen je za određivanje osnovnog tona i tipa akorda. Analiziran je rad algoritma sa akordima odsviranim na realnim instrumentima. Za potrebe ovog istraživanja formirana je baza akorda koju čine snimci za dve vrste gitare i klavir, oba tipa akorda kako durski tako i molski, šest oktava i tri tehnike sviranja. Pokazano je da rezultati prepoznavanja zavise od: tipa akorda, oktave u kojoj je akord odsviran, kvaliteta muzičkog instrumenta, tehnike sviranja i muzičara. Korišćenjem ovog algoritma dobijeni su visoki procenti prepoznavanja akorda za snimke iz formirane baze. Predloženi algoritam je jednostavan za implementaciju i ima manju računsku i vremensku kompleksnost u odnosu na druge algoritme koji se koriste za ove namene.

**Ključne reči** – akordi; hromatogram; prepoznavanje; spektrogram;

## I. UVOD

Razvojem digitalnih tehnologija pronalazak različitih tipova informacija značajno je pojednostavljen. Ukoliko se kao jedan vid informacije posmatraju audio zapisi muzičkog sadržaja njihov pronalazak se do sada zasnivao na pretraživanju podataka vezanih za autora dela, naziv dela ili albuma. U cilju raznovrsnije pretrage audio zapisa javila se potreba za pretraživanjem njihovog sadržaja. Pretraga sadržaja muzičkih signala može se vršiti na osnovu različitih parametara. Neki od osnovnih parametara koji opisuju muzičke signale su: visina tona, melodija, harmonija i ritam.

Visina tona (*pitch*) je jedan od psihoakustičkih atributa zvuka. Neophodno je razlikovati pojam frekvencije zvuka koja se meri odgovarajućim instrumentima i pojam tonske visine koja se određuje čovečijim opažanjem. Šezdesetih godina prošlog veka Roger Shepard zaključio je da je percepcija

tonske visine kod čoveka određena dvodimenzionalnim sistemom [1]. Čovekov slušni sistem bolje opaža tonsku visinu ukoliko se ona predstavi spiralnom linijom umesto krugom [2]. Dvodimenzionalni sistem Shepard je slikovito prikazao spiralom, gde je ugaona dimenzija predstavljena kao *chroma*, a vertikalna dimenzija kao tonska visina [3]. Ugaona dimenzija, hroma krug nastaje pri preslikavanju svih frekvencija na opseg jedne oktave, gde oktava predstavlja frekvencijski interval koji odgovara odnosu 1:2. Na hroma krugu su postavljeni svi tonovi jedne oktave na jednakim rastojanjima.

Iako postoje raznovrsni muzički sadržaji njihova osnova je ista i čine je tonovi. Ton predstavlja zvuk koji ima izraženu tonsku visinu. Spektar tona je diskretan i sastavljen od harmonijskog niza frekvencija koji se u muzičkoj literaturi naziva alikvotni niz. Harmonijski niz frekvencija kao takav određuje boju tona i prema osnovnom tonu se odnosi kao 1:2:3:4:n, gde je *n* određena granična frekvencija. Sam proces percepcije tonske visine kod čoveka formira se po logaritamskoj frekvencijskoj osi. Proces koji se odvija u čulu sluha dovodi do preslikavanja harmonijskog niza frekvencija na logaritamsku frekvencijsku osu. Pri preslikavanju spektralnih komponenti tona na hroma krug pozicije nekih komponenti odgovaraju određenim tonovima unutar jedne oktave. Analizom pozicija harmonika određenog tona na hroma krugu nakon preslikavanja pokazano je da se ukupna energija tona dominantno nalazi na osnovnoj frekvenciji tona i na frekvencijama koje odgovaraju intervalima velike terce i čiste kvinte.

Posmatrajući međusobne odnose različitih tonova uveden je pojam akorda koji predstavlja organizovano sazvučje od tri ili više tonova različite visine [1]. Trozvuk, odnosno akord, je sačinjen od tri tona i kao takav ne čini grupu bilo koja tri tona, već postoje određena harmonijska pravila na osnovu kojih je izgrađen. U klasičnoj harmoniji svi akordi su izgrađeni slaganjem tonova po tercama. Najniži ton akorda postavljen po tercama naziva se osnovni ton, a ostali tonovi dobijaju ime po svom intervalskom odnosu prema osnovnom tonu. U zavisnosti od intevralskog odnosa prema osnovnom tonu razlikujemo durske i molske akorde. Durski trozvuk se sastoji od osnovnog tona, velike terce i čiste kvinte, dok se molski trozvuk sastoji od osnovnog tona, male terce i čiste kvinte [4].

Harmonijska struktura kao što je akord predstavlja pogodan alat za prepoznavanje različitih karakteristika kojima se opisuju audio signali. U literaturi se mogu pronaći različiti algoritmi za prepoznavanje akorda [5], [6], [7].

U ovom radu prikazan je algoritam za prepoznavanje akorda. Algoritam se bazira na izračunavanju hromatograma i analizi raspodele energije unutar hromatograma. Prikazane su prednosti i nedostaci ovog algoritma kroz analizu signala snimljenih na realnim instrumentima. Snimljeni su audio signali akorda odsviranih na različitim instrumentima u nekoliko oktava služeći se različitim tehnikama sviranja. U snimanju signala učestvovalo je više izvođača. Na taj način napravljena je baza snimaka koja se može koristiti i za druga istraživanja. U literaturi je pokazano da hromatogram može imati različitu strukturu za isti akord koji je odsviran u različitim oktavama [8]. Zbog toga je izvršena analiza i poređenje rezultata algoritma po više kategorija i to po: oktavama, tehnikama sviranja, različitim izvodjačima, durskim i molskim lestvicama. Takođe, sprovedena je statistička analiza uspešnog prepoznavanja akorda po navedenim kategorijama. Analizirani su i karakteristični slučajevi u kojima su ostvareni mali procenti prepoznavanja, kao i razlozi koji su doveli do toga. Cilj ovog rada je analiza mogućnosti korišćenja jednog jednostavnog algoritma za prepoznavanje akorda sa realnim signalima.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazan je hromatogram kao alat za analizu muzičkih signala i algoritam za prepoznavanje akorda baziran na hromatogramu. U narednom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju dat je zaključak o mogućnosti korišćenja prikazanog algoritma za prepoznavanje akorda.

## II. METODOLOGIJA

### A. Hromatogram

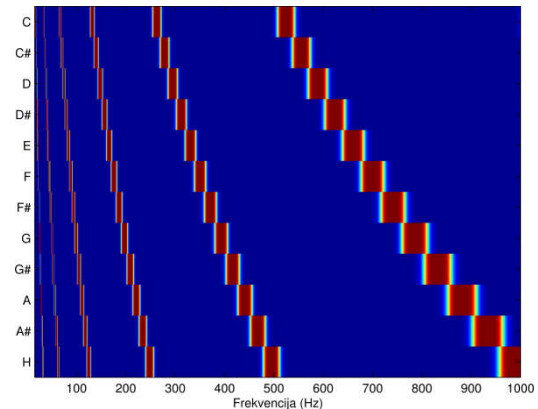
Hromatogram predstavlja sredstvo za analizu raspodele energije signala unutar određenog broja intervala jedne oktave. Kako je akcenat istraživanja na muzici zapadne kulture sa temperovanim skalama posmatrana je raspodela energije signala unutar 12 intervala koji odgovaraju polustepenima unutar jedne oktave. U tom slučaju hromatogram predstavlja vremensko-frekvencijski prikaz signala gde je kompletan spektar signala transponovan na jednu izabranu oktavu koja je izdelfena na 12 opsega.

Izračunavanje hroma karakteristika jednog muzičkog signala se svodi na množenje hroma matrice i spektrograma datog signala, čime se dobija nova matrica koja se naziva hromatogram [9]. Spektrogram signala predstavlja matricu  $S$  dimenzija  $N \times M$  dobijenu pomoću kratkovremene Furijeove transformacije ( $STFT$ ). Redovi matrice  $S$  odgovaraju svakoj od  $N$  frekvencija i imaju indekse  $k, k \in [0, N-1]$ . Broj kolona matrice  $S$  odgovara broju prozora u vremenu  $M$ . Hroma matrica  $C$  je dimenzija  $K \times N$ , gde  $K$  predstavlja broj opsega u okviru jedne oktave. Vrednost parametra  $K$  je 12, što odgovara temperovanoj skali. Redovi matrice  $C$  dobijaju se sumiranjem

vektora  $c$  svih oktava koji odgovaraju traženoj noti. Vrednost  $c$  dobija se na sledeći način [8]:

$$c = \begin{cases} 0, & p = 0 \\ e^{-50 \left| \log_2 \frac{p}{k} \right|}, & p = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (1)$$

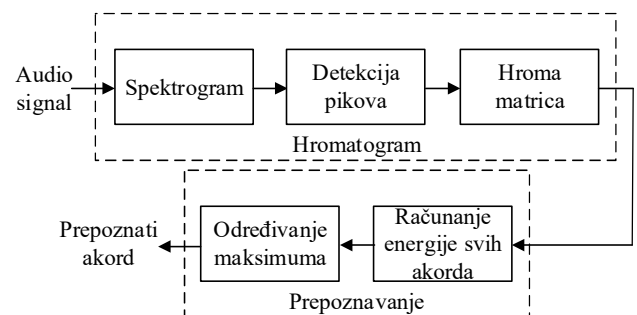
Eksponencijalni faktor izabran je tako da se pri računanju matrice  $C$  eliminišu vrednosti vektora u okolini vektora koji odgovara  $c$ . Izgled hroma matrice prikazan je na Slici 1. Množenjem matrice  $C$  i spektrograma dobijaju se svi frekvencijski binovi hromatograma. Pri računanju hromatograma sve oktave muzičkog signala transponovane su u nultu oktavu, koja počinje od frekvencije 16.35 Hz.



Slika 1. Dvdimenzionalni prikaz hroma matrice

### B. Algoritam za prepoznavanje akorda

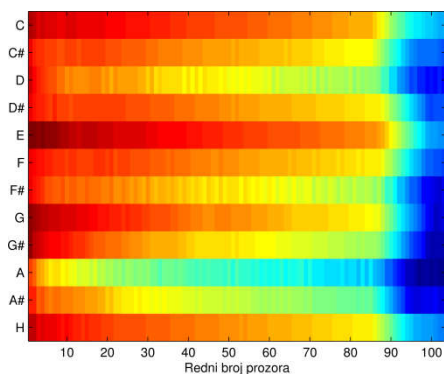
Na Slici 2 prikazana je blok šema algoritma za prepoznavanje. Kao ulazni podaci u algoritam koriste se odmerci iz audio signala snimljenog tona. Za učitani audio signal izračunava se spektrogram sa zadatim vrednostima za dužinu prozora, procenat preklapanja prozora i broj tačaka za FFT algoritam. Nakon izračunavanja spektrograma vrši se određivanje maksimuma za svaki vremenski prozor. Vrednosti u spektrogramu koje nisu maksimumi po frekvenciji za posmatrani prozor se menjaju vrednostima 0. Tako modifikovani spektrogram se zatim množi sa hroma matricom i dobija se hromatogram koji se koristi za prepoznavanje.



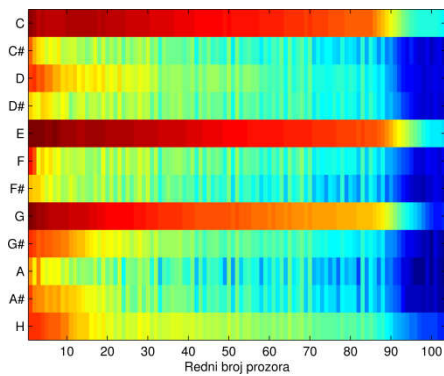
Slika 2. Blok šema algoritma za prepoznavanje akorda

Na Slici 3 prikazan je izgled hromatograma za snimljeni akord C dura u četvrtoj oktavi. Hromatogram je izračunat za

12 polustepena na osnovu spektrograma sa dužinom prozora od 2048 odbiraka i 50% preklapanja. Akord C čine tonovi C, E i G i očekivano je da se u hromatogramu na tim tonovima koncentriše energija. Sa slike se vidi da postoji velika vrednost energije u hromatogramu za skoro sve polustepene. Na osnovu ovakvog odnosa energije u hromatogramu nije moguće utvrditi koji je akord odsviran. Na Slici 4 prikazan je hromatogram izračunat sa istim parametrima kao hromatogram sa prethodne slike, ali pomoću spektrograma u kom su zadržani samo maksimumi u spektru za jedan vremenski prozor, dok su vrednosti na ostalim frekvencijama ukinute. Analizom prikazane slike uočava se da postoji velika koncentracija energije na tonovima C, E i G za sve vremenske prozore. Na osnovu toga može se zaključiti da analizirani audio signal predstavlja akord C dura. Posmatranjem dve prethodne slike zaključuje se da se uvođenjem procedure za zadržavanje maksimuma u spektrogramu dobija hromatogram na osnovu koga je moguće izvršiti prepoznavanje akorda.



Slika 3. Izgled hromatograma za akord C dura u četvrtoj oktavi



Slika 4. Izgled hromatograma sa zadržanim maksimumima u spektrogramu za akord C dura u četvrtoj oktavi

Za dobijeni hromatogram moguće je sumirati energije za tonove koji čine jedan akord u svakom vremenskom prozoru. Takav postupak može se ponoviti za sve durske i molske akorde, odnosno ukupno 24 različite kombinacije polustepena. Ovo izračunavanje vrši se u delu algoritma koji je na blok šemi sa Slike 2 označen sa "Računanje energije svih akorda". Na osnovu ovog izračunavanja dobijaju se 24 vrednosti koje predstavljaju energiju 24 moguća akorda za posmatrani vremenski prozor. U bloku označenom sa "određivanje

maksimuma" vrši se određivanje maksimalne vrednosti za niz od 24 izračunate energije koje odgovaraju akordima. Na osnovu Slike 4 uočava se da će suma energija tonova za akord koji je odsviran imati maksimum u odnosu na sve ostale akorde koji su analizirani. Akord sa maksimalno izračunatom energijom proglašava se za prepoznati akord. Procedura prepoznavanja vrši se za sve vremenske prozore učitano audio signala. Na taj način dobija se niz akorda na osnovu koga se može pratiti vremenska promena prepoznavanja akorda za analizirani audio signal. Pored prepoznatog akorda za dati audio zapis izračunava se i procenat prepoznavanja kao usrednjena vrednost uspešnog prepoznavanja za sve vremenske segmente. Na taj način se za rezultat dobija jedan broj koji pokazuje uspešnost prepoznavanja.

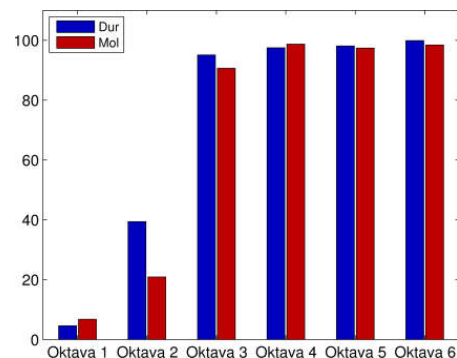
### III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

#### A. Baza snimaka

Za potrebe ovog rada napravljena je baza snimaka koja je korišćena za testiranje predloženog algoritma za automatsko prepoznavanje. Bazu čine snimci durskih i molskih akorda klavira i gitare, kao instrumenti na kojima je uobičajno da se sviraju akordi. Akordi na klaviru snimani su za različite oktave, počevši od oktave 1 do oktave 6. Akordi na klaviru snimljeni su za dva različita muzičara kako bi se testirala zavisnost prepoznavanja akorda od muzičara. Na gitari je moguće svirati značajno manje oktava nego na klaviru. Snimljeni su durski i molski akordi na gitari za oktavu 3 i oktavu 4. Snimanje je izvršeno za dve gitare različitog kvaliteta kako bi se kasnije testiralo da li uspešnost prepoznavanja zavisi i od kvaliteta instrumenta. Takođe, akordi na gitari snimljeni su i za tri različite tehnike sviranja jednog muzičara sa ciljem da se ispita da li uspešnost prepoznavanja varira ukoliko se koriste različite tehnike. Baza ukupno sadrži 576 snimaka. Ova baza je značajna jer se može koristiti i u daljim istraživanjima.

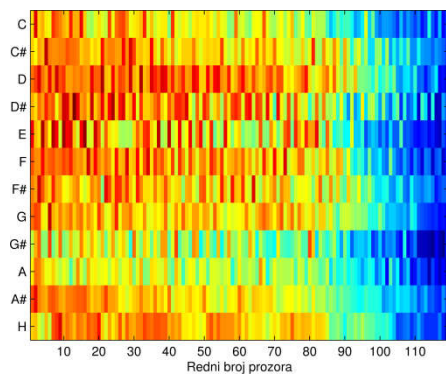
#### B. Rezultati prepoznavanja za klavir

Na Slici 5 prikazan je rezultat prepoznavanja durskih i molskih akorda koje je odsvirao prvi muzičar za sve analizirane oktave.

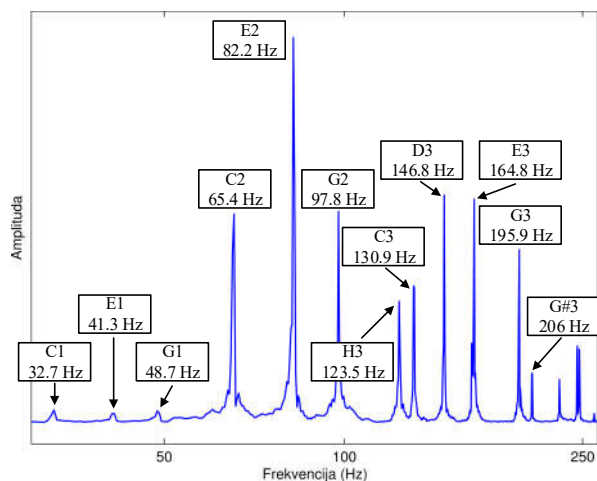


Slika 5. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na klaviru – muzičar 1

Za akorde iz četvrte, pete i šete oktave uspešnost prepoznavanja je gotovo idealna, odnosno procenat prepoznavanja je blizak 100%, i za durske i za molske akorde. Uspešnost prepoznavanja je nešto manja za akorde iz treće oktave i iznosi oko 90%. Za oktave 1 i 2 ostvaren je vrlo nizak procenat uspešnog prepoznavanja akorda. Za oktavu 1 procenat je manji od 5%, dok za oktavu 2 iznosi oko 40% za durske i oko 20% za molske akorde. Da bi se utvrdio razlog za ovako loš rezultat algoritma za prepoznavanje potrebno je posmatrati izgled hromatograma za tonove iz ovih oktava. Na Slici 6 prikazan je hromatogram za akord C dura u prvoj oktavi i kao takav predstavlja potvrdu lošeg rezultata algoritma za prepoznavanje. Analizom Slike 6 se može uočiti kako energija nije koncentrisana isključivo na tonovima C, E i G, već se određeni procenat energije razlio na ostalih 9 polustepena.



Slika 6. Izgled hromatograma sa zadržanim maksimumima za akord C dura u prvoj oktavi

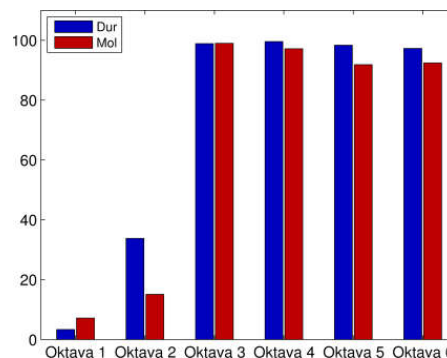


Slika 7. Izgled spektra akorda C dura u prvoj oktavi

Na Slici 7 dat je prikaz spektra signala akorda C dura, sa označenim frekvencijama harmonika i pripadajućim tonovima, koji objašnjava razlivanje energije u hromatogramu. Iako je snimljeni akord C dura u prvoj oktavi na osnovu spektra se može zaključiti kako su amplitude koje odgovaraju tonovima tog akorda značajno manje u odnosu na amplitude harmonika koji se javljaju na višim frekvencijama. Maksimumi u spektru

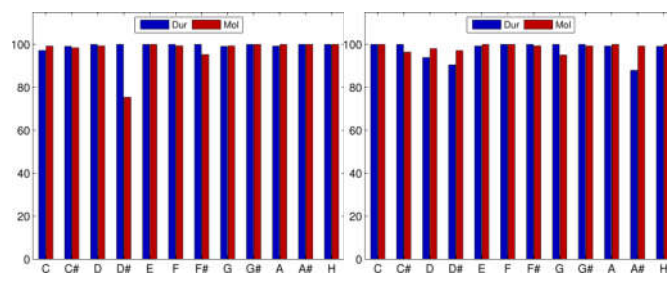
koji ne odgovaraju tonovima odsviranog akorda su posledica prirode tona i njegovog diskretnog spektra koji se sastoji od harmonijskog niza frekvencija čija se pozicija malo menja na višim frekvencijama. Pojava diskretnih komponenti koje odgovaraju tonovima H3 i G#3 ne predstavljaju komponente harmonijskog niza frekvencija tona C što takođe dovodi do raspodele energije prikazane na Slici 6. Transponovanjem svih oktava u nultu oktavu u hromatogramu se pojavljuje koncentracija energije i na drugim tonovima koji ne čine akord.

Na Slici 8 prikazan je rezultat prepoznavanja durskih i molskih akorda koje je odsvirao drugi muzičar za sve analizirane oktave. Analizom Slike 5 i 8, koje prikazuju rezultate prepoznavanja durskih i molskih akorda odsviranih na klaviru za dva različita izvođača, može se izvesti zaključak da na procenat prepoznavanja utiče i izbor izvođača. Procenat prepoznavanja akorda sviranih od strane muzičara 2 su niži u odnosu na procenat ostvarene kod muzičara 1, što je posledica muzičkog obrazovanja prvog izvođača. Takođe, nizak procenat prepoznavanja akorda u prvoj i drugoj oktavi se svodi na problem raspodele energije u hromatogramu objašnjen pomoću Slike 6.



Slika 8. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na klaviru – muzičar 2

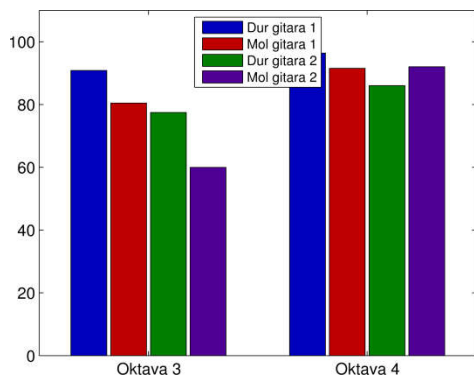
Na Slici 9 prikazani su rezultati prepoznavanja akorda odsviranih na klaviru u oktavi 4 od strane muzičara 1 i 2. Analizom prikazanih rezultata može se uočiti da prepoznavanje akorda na osnovu ovog algoritma ne zavisi od tonaliteta kojem akord pripada.



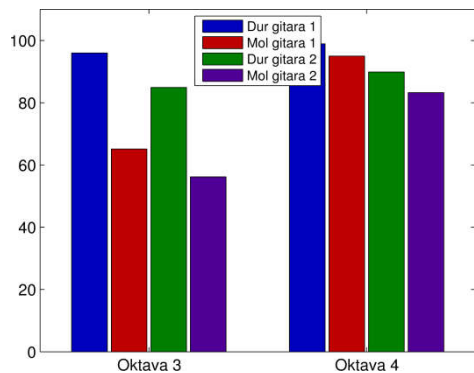
Slika 9. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na klaviru u oktavi 4 – muzičar 1 i muzičar 2

### C. Rezultati prepoznavanja za gitaru

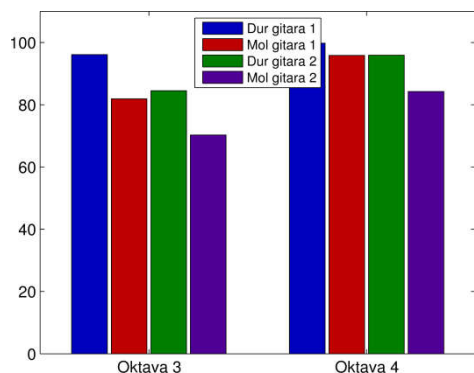
Na Slikama 10, 11 i 12 prikazani su rezultati prepoznavanja akorda odsviranih na gitari. Slike predstavljaju procentualni prikaz rezultata prepoznavanja akorda i to po više parametara: za dve vrste gitare, oba tipa akorda kako durski tako i molski, dve oktave treću i četvrtu i tri tehnike sviranja. U razmatranje su uzete tri najzastupljenije tehnike sviranja na gitari i to sviranje prstima, trzalicom i palcem. Sprovedena je analiza sa tri različite tehnike sa ciljem da se utvrdi njihov uticaj na rezultat predloženog algoritma za automatsko prepoznavanje akorda.



Slika 10. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na dve gitare prstima



Slika 11. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na dve gitare palcem



Slika 12. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na dve gitare trzalicom

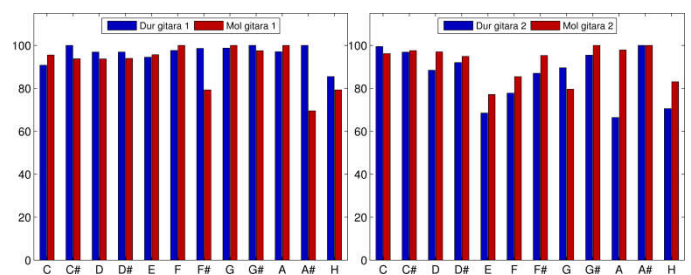
Analizom rezultata algoritma za prepoznavanje u četvrtoj oktavi zaključeno je da ne postoje značajna odstupanja između pojedinih tehnika za durske i molske akorde, kao ni za dve

korišćene gitare. Ukoliko se posmatraju rezultati za treću oktavu može se zaključiti da postoje razlike u vrednostima rezultata uspešnog prepoznavanja akorda za različite tehnike sviranja. Najbolji rezultat postignut je tehnikom sviranja pomoću trzalice, i do 15% u odnosu na druge tehnike sviranja. Najlošiji rezultat prepoznavanja ostvaren je za tehniku sviranja palcem, što se može videti sa Slike 11. Razlog za lošije rezultate prepoznavanja u trećoj oktavi za tehnike sviranja palcem i prstima, u odnosu na tehniku sviranja trzalicom je to što se pri sviranju trzalicom žice pobuđuju preciznije i većom silom.

Analizom rezultata sa Slika 10, 11 i 12 jasno je da kvalitet instrumenta utiče na procenat prepoznavanja akorda. Gitara 1 je znatno većeg kvaliteta u odnosu na gitaru 2 te je stoga rezultat prepoznavanja akorda bolji za gitaru 1 za obe analizirane oktave, kao i za durske i molske akorde.

Posmatranjem rezultata uočava se da je veći procenat prepoznavanja druskih akorda u odnosu na molske. Objasnjene te tvrdnje leži u prirodi spektra gde osnovni ton akorda u svom spektru sadrži i harmonike na frekvencijama koje odgovaraju intervalu velike terce. Kako se durski akord sastoji od osnovnog tona, velike terce i čiste kvinte, činjenica da osnovni ton sadrži određeni procenat energije i na frekvencijama koje odgovaraju intervalu velike terce pojašnjava veći procenat prepoznavanja druskih akorda u odnosu na molske.

Ukoliko se izvrši poređenje rezultata prepoznavanja akorda odsviranih na kvalitetnijoj gitari i klaviru, kada svira muzičar 2 za slučaj četvrte oktave mogu se uočiti bolji rezultati prepoznavanja u slučaju klavira. Takav rezultat može se objasniti činjenicom da se pri sviranju akorda na gitari nejednakom silom pobuđuju žice, dok kod klavira to nije slučaj. Takođe, pri snimanju akorda odsviranih na klaviru korišćen je sintetizator te su svi harmonici tonova naštimovani po temperovanoj skali. U toku sviranja na gitari žice se opuštaju i nisu naštimovane uvek idealno, pa dolazi do frekvencijskog pomeraja harmonijskog niza odsviranih tonova što dovodi do manjeg procenta uspešnosti prepoznavanja akorda.



Slika 13. Rezultat prepoznavanja akorda odsviranih na dve gitare istom tehnikom u oktavi 4

Na Slici 13 dat je prikaz rezultata prepoznavanja akorda odsviranih na dve gitare istom tehnikom u oktavi 4. Cilj ovog grafičkog prikaza je da se pokaže zavisnost kvaliteta rezultata za slučaj kada se svira sa dve različite gitare. Sa slike se može uočiti da je procentualna vrednost prepoznavanja akorda veća

za gitaru 1 u odnosu na vrednosti prepoznavanja akorda odsviranih na gitari 2, što se pripisuje boljem kvalitetu gitare 1. Bolji kvalitet gitare se može kvantifikovati kvalitetnijim žicama gitare i dužem potrebnom vremenu da se žice umire nakon odsviranog akorda. Dodatno, kod gitare lošijeg kvaliteta postoji izvesna deformacija vrata gitare, zbog čega žice na određenim pozicijama dodiruju pragove. To dovodi do pojave i drugih harmonijskih komponenti koje nisu posledica samog harmonijskog niza datog tona. Zbog postojanja drugih harmonijskih komponenti u hromatogramu se javlja energija na pozicijama koje ne odgovaraju tonovima odsviranog akorda, što za posledicu ima lošije prepoznavanje.

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je algoritam za automatsko prepoznavanje akorda pomoću hromatograma. Napravljena je baza koja se sastoji od više različitih snimaka koji se mogu razvrstati po kategorijama. Zastupljene su dve vrste instrumenta, tri različita izvođača, različite tehnike sviranja, kako durski tako i molski akordi koji su odsvirani u šest oktava. Ostvareni su visoki procenti prepoznavanja za većinu snimaka iz baze. Lošiji rezultati prepoznavanja ostvareni su za akorde odsvirane u najnižim oktavama koje su analizirane. Pokazano je da rezultati prepoznavanja zavise od tehnike sviranja, izvođača, vrste tonaliteta kom akord pripada, kao i kvaliteta muzičkog instrumenta. Prikazani algoritam je jednostavan i ne zahteva dodatna procesiranja hromatograma analiziranog snimka. Zbog toga ovaj algoritam ima smanjenu računsku i vremensku kompleksnost u odnosu na druge algoritme iz literature. Visoki procenti prepoznavanja ostvareni su analizom izolovanih akorda, a ne polifonih muzičkih zapisa. Ovakav način prepoznavanja predstavlja gotovo idealan slučaj koji nije česta pojava u realnosti. Međutim, iako su uslovi za prepoznavanje akorda bili idealni rezultati prikazani u ovom radu pokazali su zavisnost uspešnosti prepoznavanja od raznih parametara sviranja. Razlike u uspešnosti prepoznavanja koje se javljaju za različite akorde mogu biti velike. Cilj rada je bio sagledavanje i kvantifikacija razlika u prepoznavanju različitih akorda i pronalaženje uzroka njihovog nastanka. Ovi zaključci mogu biti od koristi u daljim istraživanjima kako i za predloženi algoritam tako i za druge algoritme bazirane na hromatogramu.

#### ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se kolegi Miodragu Stanojeviću na pomoći pri kreiranju baze muzičkih signala koja je korišćena u ovom radu.

#### LITERATURA

[1] R. N. Shepard, "Circularity in judgements of relative pitch", *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 36, pp. 2346–2353, 1964.

[2] R. D. Patterson, "Spiral detection of periodicity and the spiral form of musical scales," *Psychol. Music*, vol. 14, pp. 44–61, 1986.

[3] M. A. Bartsch, G. H. Wakefield, "Audio Thumbnailing of Popular Music Using Chroma-Based Representations", *IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA*, VOL. 7, NO. 1, 2005.

[4] M. Živković, „Harmonija”, Zavod za udžbenike, Beograd, ISBN: 978-86-17-16534, 2009.

[5] T. Cho, R. J. Weiss, and J. P. Bello, "Exploring common variations in state of the art chord recognition systems", In *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference (SMC)*, pages 1–8, Barcelona, Spain, 2010.

[6] T. Fujishima, "Realtime chord recognition of musical sound: A system using common lisp music", In *Proc. ICMC*, pages 464–467, Beijing, 1999.

[7] C. Harte and M. Sandler, "Automatic chord identification using a quantised chromagram", In *Proceedings of the 118th AES Convention*, Barcelona, Spain, 2005.

[8] M. Slavković-Ivić, D. Šumarac Pavlović, „Analiza muzičkih tonova pomoću hromatograma”, *ETRAN*, Zlatibor, jun 2016, Zbornik radova, ISBN: 978-86-7466-618-0.

[9] M. Muller, D. W. Ellis, A. Klapuri, G. Richard, "Signal Processing for Music Analysis", *Journal of latex class files*, Vol. 6, No. 1, January 2007.

#### ABSTRACT

The harmonic structure of musical instruments allows for the introduction of signal processing that enables the played tone to be recognized. Chords, being a consonance of three or more tones, are one of the primary elements of musical compositions. The automatic chord identification process can simplify work for musicians and composers, when searching the contents of audio recordings. This project shows an algorithm for automatic chord recognition, based on chromatogram calculation. The realized algorithm enables the analysis of tones in 12 frequency ranges that correspond to the tempered musical scales. The relationship of energies in the chromatogram's half-tones is used to determine the basic tone and type of chord. The algorithm's work is analyzed with the chords played on real instruments. A chord database was collected for the purpose of this research, made up of recordings from two types of guitar and a piano, both chord types, major and minor, six octaves and three playing techniques. It has shown that tone recognition depends on: the type of chord, the octave in which the chord was played, the quality of the musical instrument, the playing technique and the musician. With the use of this algorithm, there have been high percentages of chord recognition in the recordings from the formed database. The proposed algorithm can easily be implemented and is not as complex in computing and time duration, compared to other algorithms used for the same purposes.

#### CHROMATOGRAM BASED AUTOMATIC CHORD RECOGNITION

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović