

Comparative analysis of the quality of recorded sound in the function of different recording formats

Analiza porównawcza jakości zarejestrowanego dźwięku w funkcji różnych formatów zapisu

Andrzej Król*, Tomasz Szymczyk

Department of Computer Science, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Poland

Abstract

In article, the quality of the following encoders was analyzed: mp3, AAC, wma and OGG Vorbis. An original graphic method was used to carry out the quantitative research. It consists in comparing the number of pixels (representing data) between the spectrogram of a wav file and the spectrograms of files compressed with different codecs and bit rates. It has been shown that the Ogg Vorbis encoder retains the most data from the uncompressed wav sample in all tested bit rates (128KBit/s, 160KBit/s, 320KBit/s).

Keywords: spectrogram; compression quality; comparative analysis

Streszczenie

W artykule przeanalizowano jakość koderów: mp3, AAC, wma i OGG Vorbis. Do przeprowadzenia badania ilościowego wykorzystano autorską metodę graficzną. Polega ona na porównaniu liczby pikseli (reprezentujących dane) pomiędzy spektrogramem pliku wav, a spektrogramami plików skompresowanych różnymi kodekami i przepływnościami. Wykazano, iż najwięcej danych z nieskompresowanej próbki wav zachowuje koder Ogg Vorbis we wszystkich badanych przepływnościach (128KBit/s, 160KBit/s, 320KBit/s).

Słowa kluczowe: spektrogram; jakość kompresji; analiza porównawcza

*Corresponding author

Email address: s96758@pollub.edu.pl (A. Król)

©Published under Creative Common License (CC BY-SA v4.0)

1. Wprowadzenie

Przez kilka ostatnich dziesięcioleci powstawały (i ciągle powstają) nowe rozwiązania w dziedzinie kompresji dźwięku. Przykładem może być koder AAC, który jest ciągle rozwijany i ulepszany głównie do celów przesyłania danych audio przez Internet lub do celów transmisji danych audio technologii cyfrowego radia naziemnego DAB/DAB+. Transmisja taka wymaga jak najlepszej jakości dźwięku i jednocześnie małej przepływności strumienia. Innym koderem ciągle rozwijanym jest kompresor Ogg Vorbis, który jest darmowy zarówno do celów komercyjnych jak i niekomercyjnych. W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia ważne było, aby skompresowany plik był jak najmniejszy zachowując przy tym najwyższą jakość. Podyktowane to było małymi pojemnościami dysków w ówczesnych czasach. W późniejszych latach aż do teraz (2022 rok) dyski twarde są produkowane z coraz większą pojemnością sięgającą rzędu kilku terabajtów. W obecnych czasach kompresja dźwięku i obrazu jest bardziej potrzebna ze względu na przesył informacji (streamingowanie) przez Internet oraz ze względu, na rozwój jakości wideo oraz audio. Wraz ze wzrostem jakości (audio i wideo np. rozdzielczość FullHD, 4K) potrzebne jest więcej miejsca na dysku, więc zapotrzebowanie na coraz lepsze kodeki nie zmniejsza się.

Tematem artykułu jest analiza strumieni audio pod względem jakości. Do przeprowadzenia badania wykorzystano autorską metodę graficzną. Polega ona na

porównaniu liczby pikseli (reprezentujących dane) pomiędzy spektrogramem pliku wav, a spektrogramami plików skompresowanych różnymi kodekami i przepływnościami.

2. Badania literaturowe

Badania jakości dźwięku, zarówno ilościowe jak i jakościowe były przeprowadzane przez różnych badaczy.

Grzegorz Brzuchalski w swojej rozprawie doktorskiej (Politechnika Warszawska 2015) opisał miary oceny jakości kodeków. Autor stwierdził, że „za najbardziej wiarygodny sposób oceniania jakości dźwięku uważa się przeprowadzanie testów odsłuchowych na odpowiednio dobranej grupie osób. Testy są normalizowane, a wyniki uśredniane” [1]. Testy takie polegają na odsłuchiwanie skompresowanych próbek różnymi metodami oraz ocenie subiektywnej jakości przez osoby biorące udział w badaniu. Autor rozprawy wspomniał też o problemie odpowiedniego nagłośnienia i pomieszczenia do przeprowadzenia testów odsłuchowych. Inną grupą miar, które autor rozprawy opisał jest „stosunek szumu do progów słyszenia NMR (ang. Noise to Mask Ratio) jest jedną z podstawowych i najważniejszych miar w ocenie jakości dźwięku kompresowanego” [1]. Grzegorz Brzuchalski wspominał też o miarach:

- mierze struktury harmonicznej błędu,
- miarach modulacji,
- miarach głośności zniekształceń,

- miarach prawdopodobieństwa wykrycia zniekształceń.

Innymi badaczami jakości dźwięku byli chińscy naukowcy (Luo, D., Luo, W., Yang, R., & Huang, J.), którzy do badania zastosowali „21 wymiarowy wektor cech do pomiaru artefaktów kwantyzacji w różnych współczynnikach kompresji” [2]. Porównali w ten sposób kodeki mp3, wma w różnych przepływnościach z kodekiem wav. Metoda ta polega na porównaniu pięciosekundowych skompresowanych próbek koderem mp3 i wma z analogiczną pięciosekundową próbką w formacie nieskompresowanym wav. Autorzy opisali to porównanie za pomocą liczb wyrażających procentową zgodność skompresowanej próbki z analogiczną próbką w formacie wav. Okazało się, że w badaniu tym próbki skompresowane kodekiem mp3 były bardziej wierne oryginałowi zapisanemu w formacie wav niż analogiczne próbki w formacie wma.

Testy odsłuchowe były wykonywane przez różnych badaczy. Jednym z nich był Gabriel Bouvigne, który przeprowadził test odsłuchowy koderów: mp3 i wma w różnych przepływnościach. Stwierdził on, że „przy bardzo niskich przepływnościach wydaje się oczywiste, że WMA 9 jest lepszy niż Lame 3.93. Jednak wraz ze wzrostem przepływności różnica się zmniejsza, a przy 128 kb/s są one dość podobne” [3].

„HE-AAC v2 – połączenie AAC, SBR i PS – to bez wątpienia najpotężniejszy kodek audio dostępny dzisiaj” [4]. W tym artykule został opisany test odsłuchowy dźwięku wielokanałowego. Najlepszy okazał się kodek AAC+.

Włoscy naukowcy (Bucci, G., Franciosi, F., & Valocchi, P.) opisali badanie jakości za pomocą modelu percepcyjnego jakości kodeka audio. „Idea proponowanej techniki jest ważenie kodowanych zniekształceń poprzez filtrowanie ich za pomocą funkcji transferu $1/H(z)$, przed zastosowaniem standardowych pomiarów zniekształceń” [5].

Amerykańscy naukowcy (Kandadai, S., Hardin, J., & Creusere, C. D.) w artykule opisali wykorzystanie MSSIM w kontekście oceny jakości dźwięku. Zaprezentowali dwa różne sposoby zastosowania MSSIM do danych audio. Autorzy użyli siedmiu różnych sekwencji próbek monofonicznych w częstotliwości 44,1KHz. Do tych różnych sekwencji sampli wygenerowali różne rodzaje szumów [6].

H. i M. Portalscy przeprowadzili badanie jakości dźwięku. „Przedstawili analizy porównawcze dźwięku skompresowanego w formacie mp3 z oryginalnym. Podali oceny subiektywne różnic określone w oparciu o własne badania oraz metodę obiektywną bazującą na porównaniu poziomów sygnałów w podpasmach tercjowych spektrogramu” [7]. Porównali jakość formatu wav i mp3 metodą zarówno subiektywną jak i obiektywną. „Zdaniem autorów – skompresowane pliki mp3 dobrze nadają się do odtwarzania muzyki rozrywkowej, natomiast nie są zalecane dla muzyki klasycznej” [7].

Niemiecki naukowiec Karlheinz Branderburg porównał w swoim artykule koder mp3 z aac. Stwierdził,

że „używając koderów o dobrej wydajności, MPEG-1 Layer 3 i MPEG-2 można kompresować muzykę przy zachowaniu jakości zbliżonej do CD lub CD” [8].

Naukowcy z uniwersytetu z Malezji (Gunawan, T. S., Aisyah, S., Rashiud, A., Katiwi, M.) zbadali wielokanałowe kodery AAC, AC3 i OGG. Badanie polegało na zmierzeniu czasu kompresji plików źródłowych różnymi koderami. „Z obserwacji porównania stratnych koderów stwierdzili, że najlepszym koderem dla czasu kodowania jest AC3. Ten koder zapewnia dobry czas kodowania przy wielokanałowym dźwięku 5.1 i 7.1.” [9]. Natomiast koder Ogg Vorbis uzyskał najlepszy współczynnik kompresji.

Test odsłuchowy został przeprowadzony przez E.B Meyer i D. R Morgan w celu znalezienia różnicy pomiędzy jakością dźwięku z płyt CD, a jakością dźwięku z płyt SA-CD oraz płyt DVD. Test ten składał się z 554 prób, w których osoby biorące udział w badaniu odgadywały z jakiego źródła pochodził słyszany dźwięk. Poprawnych odpowiedzi było 276. Stwierdzono, że „praktycznie wszystkie płyty SACD i nagrania DVD - Audio brzmiały lepiej niż większość płyt CD - czasami znacznie lepiej” [10].

3. Opis badania

3.1. Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia badań wykorzystano komputer, którego specyfikację przedstawiono w tabeli (Tabela 1).

Tabela 1: Specyfikacja komputera wykorzystanego do badań

Komponent	Dokładne parametry
Płyta główna	ASRock Z97 Pro4
Karta dźwiękowa	Zintegrowana na płycie głównej
Procesor	Intel I5-4690K 3,5 GHz
Pamięć RAM	2x8GB DDR 3
Karta Graficzna	Gigabyte GeForce GTX 960 4 GB
Napęd optyczny	Nagrywarka Blu-Ray LG BH16NS40
Dysk twardy 1	SSD Samsung 970 EVO Plus 500 GB
Dysk twardy 2	SSD OCZ CT500BX100 500GB
System operacyjny	Microsoft Windows 10 Pro 64bit
Zasilacz	Be quiet Pure power 10 600W
Mysz, klawiatura	Logitech MK235
Monitor	LG M2380D
Słuchawki	Superlux HD681 EVO

Programy wykorzystane do badań przedstawiono w tabeli (Tabela 2).

Tabela 2: Programy zastosowane do badań

Program	Zastosowanie w badaniu
Sound Forge Audio Studio 12.6	Zgrywanie utworów z płyt CD do formatu wav, przygotowanie próbek – obcięcie wybranych

	fragmentów utworów.
--	---------------------

Tabela 2 (c.d.): Programy zastosowane do badań

DiffImg v2.1.0	Wykonanie różnicy obrazów (zawierających spektrogramy próbek).
ImageJ 1.53e	Wykonanie różnicy obrazów (zawierających spektrogramy próbek).
Pazera Free Audio Extractor v2.9 64 bit	Kompresja próbek (wav) do formatów: mp3, ogg, aac, wma w różnych przepływnościach.
FFmpeg+sox	Generowanie obrazów spektrogramów z próbek.

3.2. Przygotowanie próbek i spektrogramów

Do badania wybrano 24 próbki. Próbki zostały przygotowane z fragmentów utworów z płyt CD (po 3 próbki z każdego z siedmiu utworów) oraz z próbek instrumentów pobranych ze specjalnej strony internetowej [11] zawierającej darmowe próbki dźwięków wysokiej jakości.

Próbki fragmentów utworów przygotowano za pomocą programu Sound Forge Audio Studio w wersji 12.6. Całe utwory najpierw zgrano z płyty CD na dysk, a następnie wybrano i wycięto fragmenty piosenek w celu przygotowania próbek źródłowych (nieskompresowanych). Utwory zgrano z oryginalnych płyt, które są w posiadaniu autora pracy. W celu zachowania praw autorskich, na potrzeby artykułu wykorzystane zostały 15 sekundowe próbki zamiast całych utworów. Autorzy uważają, że 15 sekundowe próbki są wystarczająco długie aby dać jednoznaczne wyniki, a jednocześnie taka długość próbek nie obciąża zbytnio stanowiska badawczego.

Tabela 3: Lista próbek instrumentów

Numer próbki	Nazwa pliku wav	Czas (s)	Opis
1.	Ensoniq-VFX-SD-Ride-Cymbal.wav	1,338	Cymbałki – wykonanie na sentyźatorze Ensoniq VFX-SD.
2.	Alesis-Fusion-Acoustic-Bass-C2.wav	2,897	Kontrabas dźwięk c2 – wykonane na sentyźatorze Alesis Fusion.
3.	Alesis-Fusion-Nylon-String-Guitar-C4.wav	2,208	Gitara akustyczna dźwięk c4 c2 – wykonane na sentyźatorze Alesis Fusion.

Do badań wykorzystano także próbki trzech instrumentów, które opisano w tabeli (Tabela 3).

Lista utworów wykorzystanych do badań:

1. Whitney Houston – I will always love you

2. Sandra- Midnight man
3. Belinda Carlisle – Shades of Michaelangelo
4. Marek Grechuta – Dni, których jeszcze nie znamy
5. Queen – Don't stop me now
6. Offspring – Have you ever
7. A-Ha – Take on me

Parametry wspólne dla wszystkich próbek źródłowych to:

1. Częstotliwość: 44.1 KHz.
2. Rozdzielczość: 16bit.
3. Liczba kanałów: 2 (stereo).
4. Format: PCM wav nieskompresowany.
5. Bitrate: 1411 Kbps.

Próbki fragmentów utworów przygotowano za pomocą programu Sound Forge Audio Studio w wersji 12.6. Całe utwory najpierw zgrano z płyty CD na dysk, a następnie wybrano i wycięto fragmenty piosenek w celu przygotowania próbek źródłowych (nieskompresowanych).

Tabela 4: Kodeki wraz przepływnościami

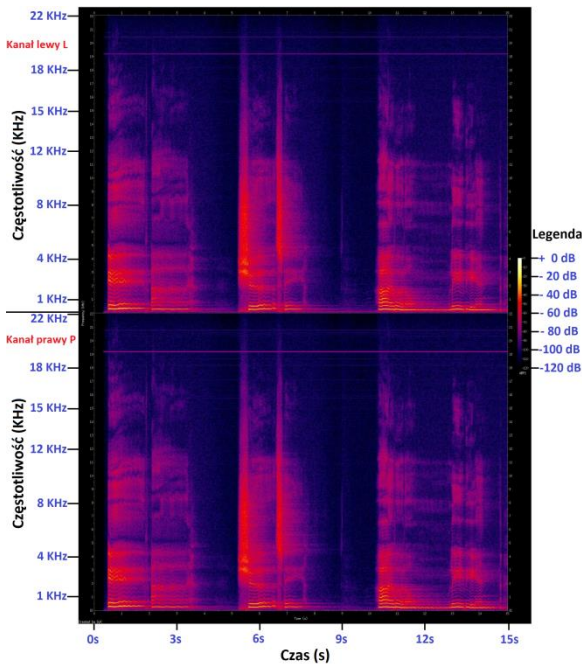
Numer próbki	Kodek	Przeplw-ność (KBit/s)	Rodzaj przepływności
1.	Mp3	320	Stała
2.	Mp3	160	Stała
3.	Mp3	128	Stała
4.	Mp3	170-210	Zmienna
5.	Mp3	140-185	Zmienna
6.	Mp3	100-130	Zmienna
7.	Ogg Vorbis	320	Stała
8.	Ogg Vorbis	160	Stała
9.	Ogg Vorbis	128	Stała
10.	M4a (Aac)	320	Stała
11.	M4a (Aac)	160	Stała
12.	M4a (Aac)	128	Stała
13.	Wma	320	Stała
14.	Wma	160	Stała
15.	Wma	128	Stała

Następnym krokiem, który podjęto była kompresja próbek źródłowych do formatów: mp3, ogg vorbis, aac, wma. Kompresję przeprowadzono z różnymi wielkościami parametru bitrate (przeplwność). Listę kodeków wraz z przepływnościami pokazano w tabeli (Tabela 4). Wykorzystano program Pazera Free Audio Extractor 64bit w wersji 2.9. Próbki skompresowane przygotowano z próbek źródłowych (wav).

Po skompresowaniu próbek źródłowych stworzono obrazy w formacie png zawierające spektrogramy próbek źródłowych (WAV) i skompresowanych (mp3, ogg vorbis, wma, aac). Spektrogramy przygotowano w identycznej skali za pomocą programu FFmpeg wraz programem Sox.

W celu przeprowadzenia badania przygotowano pliki png zawierające różnicę obrazów spektrogramów pomiędzy próbką źródłową nieskompresowaną wav, a próbkami skompresowanymi różnymi kodekami z różnymi przepływnościami.

Przykładowy spektrogram pliku WAV PCM nieskompresowanego zaprezentowano na rysunku (Rysunek1). Na osi x przedstawiono czas w sekundach, natomiast na osi y przedstawiono częstotliwości (KHz) w obu kanałach. Rysunek jest podzielony poziomo na dwie części. Górna część rysunku odpowiada za lewy kanał. Natomiast dolna część rysunku odpowiada za prawy kanał. Kolory na rysunku oznaczają moc sygnału na poszczególnych częstotliwościach w danym czasie. Amplitudę mocy sygnału przestawiono z prawej strony rysunku na legendzie.



Rysunek1: Przykładowy spektrogram z pliku Whitney Houston 1.wav.

3.3. Zasada działania autorskiej metody

Liczba pikseli spektrogramu jest liczbą pikseli, którymi narysowano spektrogram. W przypadku spektrogramu pliku wav tą liczbę oznaczono jako 100 % ze względu na bezstratny sposób kompresji pliku dźwiękowego wav. W przypadku spektrogramów plików skompresowanych stratnie, ta liczba będzie mniejsza. Liczba pikseli spektrogramu pliku skompresowanego, będąca najbardziej zbliżona do liczby pikseli spektrogramu pliku wav, będzie oznaczała najlepszą jakość kodeka (najmniejszy ubytek danych względem oryginału). Do obliczeń wykorzystano kody kolorów w formacie RGB. W celu znalezienia liczby pikseli spektrogramu należy wykonać następujące kroki:

1. Obliczyć liczbę wszystkich pikseli obrazu png (przemnożyć liczbę pikseli w poziomie przez liczbę pikseli w pionie).
2. Od otrzymanej liczby wszystkich pikseli należy odjąć:
 - a) Liczbę czarnych pikseli tj. o wartości: (0,0,0).
 - b) Liczbę szarych pikseli tj. o wartości: (127,127,127) oraz (191,191,191), które wykorzystano do narysowania osi oraz ich jednostek.
 - c) Liczbę białych pikseli tj. o wartości: (255,255,255), które wykorzystano do opisu

nazw osi, nazwy legendy oraz napisu „Created by SoX”. Liczba ta zawsze wynosi 561 pikseli.

- d) Liczbę pikseli, które przeznaczono na legendę (zawsze 5600 pikseli).
3. Otrzymana liczba jest „liczbą pikseli spektrogramu”.

Kolory są reprezentacją jednoznaczną harmonicznym dźwięku. Obrazy sprktrogramów stworzono z najwyższą możliwą rozdzielczością. Spektrogramy próbek wav i spektrogramy odpowiadających im plików audio skompresowanych są w tej samej rozdzielczości, co umożliwia przeprowadzenie badań.

Tabela 5: Analiza liczb pikseli spektrogramów próbek "Queen – Don't stop me now" zapisanych w różnych formatach

Lp	Spektrogramu wraz z rodzajem kompresji (plik png)	Liczba pikseli spektrogramu	Procent zachowanych pikseli spektrogramu względem oryginału wav (%)
1.	wav	3219648	100
2.	m4a_128	2251199	69,92
3.	m4a_160	2348385	72,94
4.	m4a_320	2504022	77,77
5.	mp3_128	2359469	73,28
6.	mp3_160	2397147	74,45
7.	mp3_320	2790219	86,66
8.	mp3_V_100-130	2235228	69,42
9.	mp3_V_140-185	2358129	73,24
10.	mp3_V_170-210	2394366	74,37
11.	ogg_128	2510499	77,97
12.	ogg_160	2614504	81,20
13.	ogg_320	2879735	89,44
14.	wma_128	1907267	59,24
15.	wma_160	2033098	63,15
16.	wma_320	2333860	72,49

Tabela 5 zawiera obliczone liczby pikseli spektrogramów wraz z procentami zachowanych pikseli spektrogramów względem źródłowego i nieskompresowanego pliku wav dla jednej próbki. Im większa liczba (w %) , tym więcej zachowanych danych. Można wnioskować, że największa liczba (w %) oznacza najlepszą jakość skompresowanej próbki. Takie obliczenia wykonano dla wszystkich 24 próbek w formacie nieskompresowanym wav.

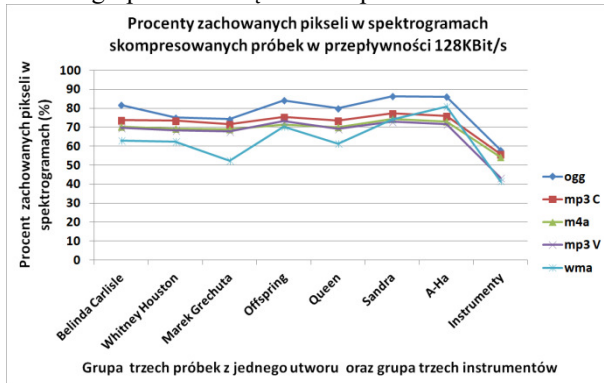
Następnym krokiem było policzenie średnich procentowych wartości (zachowanych pikseli względem oryginału wav) dla poszczególnych utworów, uwzględniając kodery i przepływności.

4. Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań pogrupowano względem przepływności na trzy grupy:

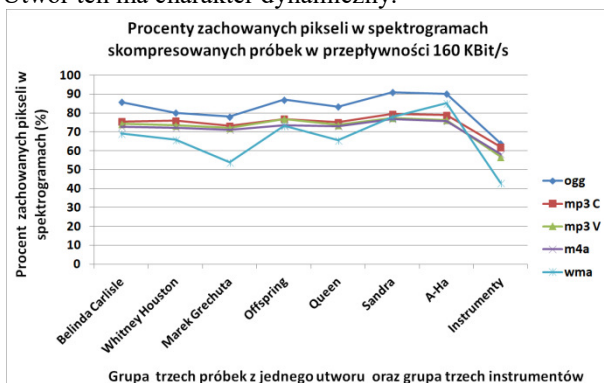
- pierwsza grupa - 128KBit/s,
- druga grupa - 160Kbit/s,
- trzecia grupa - 320KBit/s.

Na rysunku (Rysunek 2) przedstawiono wykres średnich procentów zachowanych pikseli ze spektrogramów grup próbek skompresowanych w przepływności 128 KBit/s względem ich odpowiedników w formacie wav nieskompresowanym. Pierwsze siedem grup składa się z trzech próbek wybranych z jednego utworu. Natomiast ostatnia grupa składa się z trzech próbek instrumentów.



Rysunek 2: Wykres średnich zachowanych pikseli w spektrogramach próbek skompresowanych (w przepływności 128 KBit/s) względem analogicznych spektrogramów w formacie wav.

We wszystkich grupach najlepszym koderem okazał się Ogg Vorbis. Natomiast najgorszym i najbardziej zmiennym okazał się koder wma, pomimo iż lepiej radził sobie z próbkami z utworu A-ha (drugie miejsce). Utwór ten ma charakter dynamiczny.

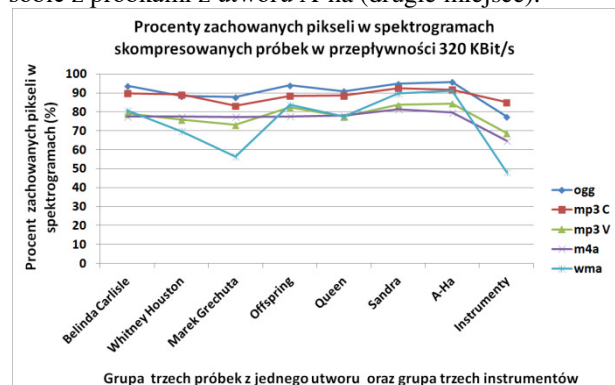


Rysunek 3: Wykres średnich zachowanych pikseli w spektrogramach próbek skompresowanych (w przepływności 160 KBit/s) względem analogicznych spektrogramów w formacie wav.

Na rysunku powyżej (Rysunek 3) przedstawiono wykres średnich procentów zachowanych pikseli ze spektrogramów grup próbek skompresowanych w przepływności 160 KBit/s względem ich odpowiedników w formacie wav nieskompresowanym. Pierwsze siedem grup składa się z trzech próbek wybranych z jednego utworu. Natomiast ostatnia grupa składa się z trzech próbek instrumentów. We wszystkich grupach najlepszym koderem okazał się Ogg Vorbis. Natomiast najgorszym i najbardziej zmiennym okazał się koder wma, pomimo iż lepiej radził sobie z próbkami z utworu A-ha (drugie miejsce).

Na kolejnym rysunku (Rysunek 4) przedstawiono wykres średnich procentów zachowanych pikseli ze spektrogramów grup próbek skompresowanych w przepływności 320 KBit/s względem ich odpowiedników w formacie wav nieskompresowanym. Pierwsze siedem

grup składa się z trzech próbek wybranych z jednego utworu. Natomiast ostatnia grupa składa się z trzech próbek instrumentów. W prawie wszystkich grupach najlepszym koderem okazał się Ogg Vorbis. W grupie instrumentów najlepiej wypadł koder mp3 ze stałą przepływnością. Natomiast najgorszym i najbardziej zmiennym okazał się koder wma, pomimo iż lepiej radził sobie z próbkami z utworu A-ha (drugie miejsce).



Rysunek 4: Wykres średnich zachowanych pikseli w spektrogramach próbek skompresowanych (w przepływności 320 KBit/s) względem analogicznych spektrogramów w formacie wav.

Reasumując autorska metoda zastosowana w niniejszej pracy jednoznacznie wykazała, że najwięcej danych zostało zachowanych (w trzech badanych przepływnościach) po skompresowaniu próbek kodekiem Ogg Vorbis. Natomiast najgorzej poradził sobie koder wma, gdyż prawie wszystkie próbki skompresowane próbki tym koderem traciły najwięcej danych. Wszystkie badane kodery najgorzej radziły sobie z próbkami instrumentów, gdyż w tych skompresowanych samplach utracono najwięcej danych względem im odpowiadającej próbki nieskompresowanej w formacie wav.

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule została zaprezentowana autorska metoda graficzna. Metoda ta wykazała, że najwięcej danych (względem pliku wav nieskompresowanego) zostało zachowanych po skompresowaniu próbek kodekiem Ogg Vorbis (w prawie wszystkich przypadkach). Jest to metoda mająca na celu uniezależnienie wyników od jakości odsłuchowych słuchawek lub głośników oraz od możliwości słuchowych badacza. Metoda ta wskazuje jaki procent danych zostało zachowanych w skompresowanym pliku dźwiękowym względem analogicznego oryginału nieskompresowanego. Można stwierdzić, że próbki zachowujące najwięcej danych z oryginału są najwierniejsze oryginałowi i przez to są najlepszej jakości.

Można też przypuszczać, iż wykorzystana autorska metoda graficzna nie jest idealna, gdyż nie ocenia w jakich pasmach częstotliwości utracono najwięcej danych, a w jakich najmniej. Metoda nie ocenia także, które dane są słyszalne (istotne), a które nie np. jeden koder może usuwać więcej nieistotnych danych, a drugi mniej. Każdy człowiek inaczej słyszy dźwięk, więc nie da się jednoznacznie stwierdzić, czy słyszalna jakość będzie najwyższa, gdyż metoda ta nie bierze pod uwagę

możliwości słuchowych badacza. Można jedynie przypuszczać, że skoro koder OGG Vorbis zachowuje najwięcej danych z oryginału nieskompresowanego, to znaczy, że pliki skompresowane tym koderem mają najlepszą jakość względem oryginału.

Literatura

- [1] G. Brzuchalski, Optymalizacja algorytmów kwantyzacji w kodowaniu dźwięku, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2015.
- [2] D. Luo, W. Luo, R. Yang, J. Huang, Compression history identification for digital audio signal, 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 3 (2012) 1733-1736, <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2012.6288233>.
- [3] G. Bouwigne, WMA9 versus MP3, <http://www.mp3-tech.org/tests/wma9/index.html>, [15.03.2022].
- [4] S. Meltzer, G. Moser, MPEG-4 HE-AAC v2 – audio coding for today’s digital media world, 1 (2006) 37-48.
- [5] G. Bucci, F. Franciosi, P. Valocchi, The measurement of audio-codec sound quality, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference and IMEKO Tec, 1 (1996) 622–627, <https://doi.org/10.1109/IMTC.1996.507457>.
- [6] S. Kandadai, J. Hardin, C. D. Creusere, Audio quality assessment using the mean structural similarity measure, 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (2008) 221–224, <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2008.4517586>.
- [7] H. Portalska, M. Portalski, Dźwięk w przekazie marketingowym – oryginał, czy mp3?, Marketing i rynek, 11 (2014) 555–564.
- [8] K. Branderburg, MP3 and AAC explained, AES 17th International Conference on High Quality Audio Coding, Erlangen 1999.
- [9] T. S. Gunawan, S. A. A. Rashid, M. Katiwi, Investigation of Various Algorithms on Multichannel Audio Compression, IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, 11 (2017) 1–5, <https://doi.org/10.1109/ICSIMA.2017.8311985>.
- [10] E. B. Meyer, D. R. Moran, Audibility of a CD-Standard A/D/A Loop Inserted into High-Resolution audio playback, Journal of the audio engineering society, 55 (2007) 775–779.
- [11] Strona z próbkami instrumentów w formacie wav, <https://freewavesamples.com/>, [15.01.2022].