

Wpływ zmiany objętości pudła rezonansowego na brzmienie chordofonu szarpanego

Jan Jasiński

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

jjasinsk@agh.edu.pl

Streszczenie

Tematem pracy jest analiza możliwości wpływania na barwę dźwięku chordofonu szarpanego dzięki modyfikacji objętości jego komory rezonansowej. Celem pracy jest zaobserwowanie, czy zakres możliwych zmian charakterystyk brzmieniowych jest wystarczająco istotny, aby zasadny był dalszy rozwój tej technologii. Zaprojektowany i zbudowany został prototyp instrumentu z komorą rezonansową o zmiennej objętości. Został on stworzony na bazie gitary klasycznej, w której ruchoma płyta tylna umożliwia zmianę głębokości jej komory rezonansowej. Przeprowadzone zostały badania sprawdzające zakres możliwych modyfikacji brzmieniowych mechanizmu w wyniku nagrania pojedynczych wymuszeń struny w przypadku różnych objętości komory. Analiza wyników pomiarów, z wykorzystaniem wielu parametrów barwowych, wykazała, że zmiana głębokości pudła instrumentu w znaczący i słyszalny sposób może wpłynąć na brzmienie instrumentu. Przeprowadzone badania wskazują, że zaprojektowane rozwiązanie pozwala osiągnąć zmianę brzmienia instrumentu strunowego w stopniu, który uzasadnia dalszy rozwój zaproponowanej technologii.

1. Wstęp

Proces rozwoju instrumentów akustycznych trwa zazwyczaj wiele wieków. Pokolenia lutników doskonalili wzorce konstrukcyjne, tworząc standardy, które obecnie można wykorzystywać przy budowie instrumentów klasycznych. W związku z rozwojem technologii zjawisko to zostało jednak w znaczącym stopniu przyspieszone. Szczególnym przykładem tego procesu może być gitara, której postać klasyczna zaczęła być modyfikowana wraz ze wzrostem zapotrzebowania na głośniejsze instrumenty. Zawdzięczamy temu powstanie gitary akustycznej w jej wielu postaciach, a następnie gitary elektrycznej. W trakcie tego rozwoju doszło zatem do zastąpienia pojedynczych form gitar wieloma różnymi modelami, które teraz znajdują swoje zastosowanie w różnych sytuacjach muzycznych, zależnie od barwy i dynamiki. Spowodowało to jednak, że twórcy wykorzystują wiele osobnych instrumentów. Pojawia się zatem pytanie, czy nie byłoby możliwe zastąpienie wielu różnorodnych barwowo instrumentów akustycznych pojedynczym instrumentem, którego charakterystykę można modyfikować zależnie od potrzeb.

Celem pracy było stworzenie instrumentu akustycznego, który zawiera mechanizm umożliwiający zmianę jego brzmienia w wyniku modyfikacji parametrów fizycznych instrumentu oraz sprawdzenia zakresu zmian, który zostanie przez takie rozwiązanie umożliwiony. Regulacja brzmienia

instrumentu nie ma z założenia następować w trakcie gry, lecz w ramach przygotowań do nagrania lub występu. Do badań modyfikacji brzmienia wybrano gitarę klasyczną ze względu na powszechność jej zastosowania i prostotę konstrukcyjną, które ułatwiły budowę prototypu. Podjęta została decyzja o próbie modyfikacji brzmienia instrumentu dzięki zmianie objętości jego komory rezonansowej. Warto zaznaczyć, że wyniki wykonywanych w ramach tej pracy badań nie są przeznaczone do wykorzystywania w trakcie procesu projektowania i budowy samych gitar. Konstruowany instrument będzie w zdecydowanie zbyt dużym stopniu zmodyfikowany, by móc na podstawie wyników tego badania wyciągać wnioski dotyczące gitary.

2. Opis rozwiązania

2.1. Projektowanie mechanizmu modyfikującego brzmienie chordofonu

Spośród wszystkich parametrów fizycznych, które mogą być zmieniane wewnątrz systemu, czyli instrumentu, w niniejszej pracy analizie został poddany wpływ zmiany objętości jego komory rezonansowej na brzmienie. Rozważane jednak były również inne rozwiązania, takie jak zmiana wielkości otworu rezonansowego, przykładanie dodatkowego napięcia mechanicznego do płyty wierzchniej, regulacja sztywności płyty wierzchniej oraz modyfikacja rozkładu masy w kluczowych miejscach instrumentu. Wszystkie te rozwiązania zostały jednak ocenione jako niezbyt satysfakcjonujące ze względu na wpływ na barwę instrumentu [1] i będą rozważane w kolejnych pracach badawczych. Objętość instrumentu może być zmieniana na wiele sposobów, jednak wybrana została regulacja ruchomą płytą tylną instrumentu i jej odległością od płyty wierzchniej. Zasada działania mechanizmu przedstawiona została na schemacie na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat działania mechanizmu modyfikującego objętość komory rezonansowej instrumentu

2.2. Skonstruowany prototyp

Prototyp rozwiązania został skonstruowany w wyniku modyfikacji gitary klasycznej firmy String Instruments. Po usunięciu płyty tylnej na jej miejsce wprowadzona została konstrukcja umożliwiająca zmianę objętości. Pierwszym jej elementem jest drewniany szkielet, widoczny na rysunku 2, którego zadaniem jest zapewnienie mechanicznej sztywności instrumentu po usunięciu płyty tylnej oraz stworzenie punktu zaczepu mechanizmu zmiany objętości instrumentu.



Rys. 2. Zdjęcie drewnianego szkieletu wprowadzonego w miejsce usuniętej płyty tylnej

Drugim elementem tego mechanizmu jest płyta wykonana ze sklejki, wycięta w kształcie wnętrza pudła rezonansowego, przedstawiona na rysunku 3. Płyta ta otoczona jest uszczelką, która po wprowadzeniu płyty do wnętrza pudła rezonansowego zapewnia szczelność komory rezonansowej od strony tylnej.



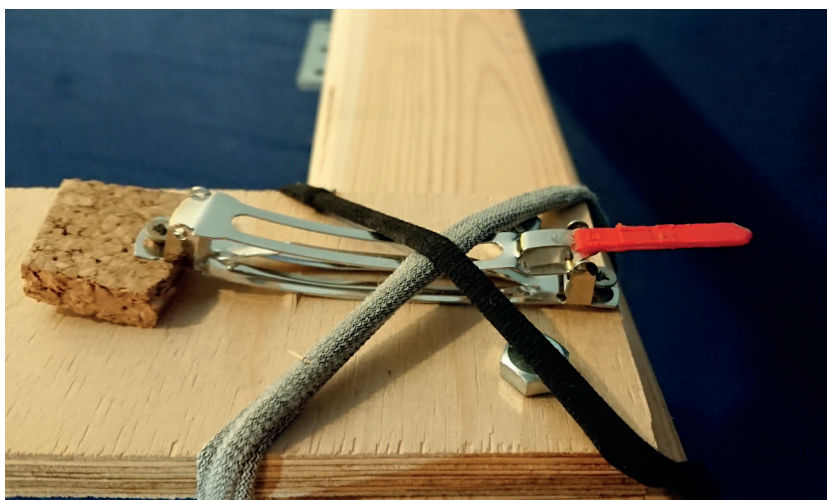
Rys. 3. Zdjęcie wewnętrznej płyty instrumentu zamontowanej do szkieletu konstrukcyjnego

Płyta zamontowana jest do szkieletu za pomocą czterech śrub, których regulacja umożliwia zmianę głębokości pudła rezonansowego.

3. Opis eksperymentu

3.1. Stanowisko pomiarowe

W celu zwiększenia wiarygodności otrzymanych wyników podjęto wiele działań, w których dążono do wyeliminowania potencjalnych czynników zewnętrznych mogących zaburzyć wykonywany eksperyment. Kluczowym elementem stanowiska pomiarowego jest stworzony specjalnie spust, który miał za zadanie w powtarzalny sposób symulować szarpnięcie struny przez muzyka. Wykonany on został ze sprężyny piórowej z zatrzaskiem, która zrobiona została ze spinki do włosów. Do jej wolnego końca przymocowane zostało piórko gitarowe, które po zwolnieniu zatrzasku szarpie strunę. Mechanizm taki po montażu umożliwia wzbudzanie dźwięku w powtarzalny sposób podczas kolejno wykonywanych pomiarów. Rysunek 4 przedstawia zdjęcie mechanizmu wzbudzającego.



Rys. 4. Zdjęcie konfiguracji stanowiska badawczego do pomiarów zależności brzmienia chordofonu szarpanego od głębokości pudła rezonansowego

Skonstruowany został również statyw zapewniający montaż spustu w stałej pozycji względem struny chordofonu oraz utrzymujący instrument w stabilnym ułożeniu względem mikrofonów pomiarowych, jednocześnie umożliwiając regulację objętości komory rezonansowej bez potrzeby zdejmowania go. Rysunek 5 przedstawia zdjęcie stanowiska pomiarowego.



Rys. 5. Zdjęcie konfiguracji stanowiska badawczego do pomiarów zależności brzmienia chordofonu szarpanego od głębokości pudła rezonansowego

Celem eksperymentu jest obserwacja zmian w barwie instrumentu w muzycznym kontekście, zatem do pomiarów zostały wybrane mikrofony estradowe, czyli Rode NT2 ustawiony w odległości 20 cm od instrumentu naprzeciw łączenia pudła rezonansowego z gryfem [2] oraz Shure SM57 umieszczony w odległości 15 cm nad mostkiem instrumentu i skierowany na środek przestrzeni pomiędzy mostkiem a otworem rezonansowym [2]. Dodatkowo wewnątrz instrumentu zamontowany został przetwornik piezoelektryczny. Sygnały zarejestrowane zostały przy wykorzystaniu karty dźwiękowej Focusrite Scarlett 18i8.

3.2. Wykonanie pomiarów

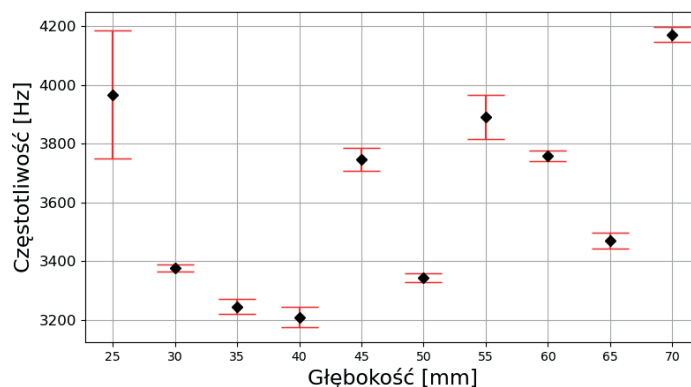
W ramach eksperymentu przeprowadzone zostały serie pomiarowe dziesięciu różnych głębokości pudła rezonansowego instrumentu z uwzględnieniem dźwięku E (82,41 Hz) i trzech ustawień głębokości w przypadku dźwięków G (98,0 Hz), A# (116,54 Hz) i c# (138,59 Hz). W ramach każdej serii rejestrowano dziesięć wymuszeń instrumentu za pomocą spustu wraz z pełnym wybrzmieniem dźwięku.

4. Analiza wyników

Uzyskane próbki poddane zostały analizie parametrycznej, w ramach której wyznaczony został następujący zbiór parametrów: *spectrum centroid* [3], *spectrum spread* [3], *high energy-low energy ratio* [3], *tristimulus* [3], *inharmonicity* [3], *noisiness* [3], *odd-even ratio* [3], *zero crossing rate* [4], *entropy* [4]. Parametry te zostały wybrane na podstawie prac analizujących korelacje pomiędzy percepcją barwy dźwięku, semantycznymi określeniami wykorzystywanymi do jej opisu oraz zmianami w analizie parametrycznej [4–6], a także na podstawie prac łączących zmiany w barwie dźwięku z aktywnością neurologiczną [7]. Analiza sygnałów wykonana została w języku Python z wykorzystaniem bibliotek Librosa [8] i Iracema [9]. W artykule przedstawiona zostanie zaledwie część uzyskanych wyników oraz w celu ułatwienia porównywania wszystkie przedstawione wyniki będą dotyczyły nagrań dźwięku E2. Przedstawiane wnioski poparte są jednak analizą wszystkich uzyskanych wyników.

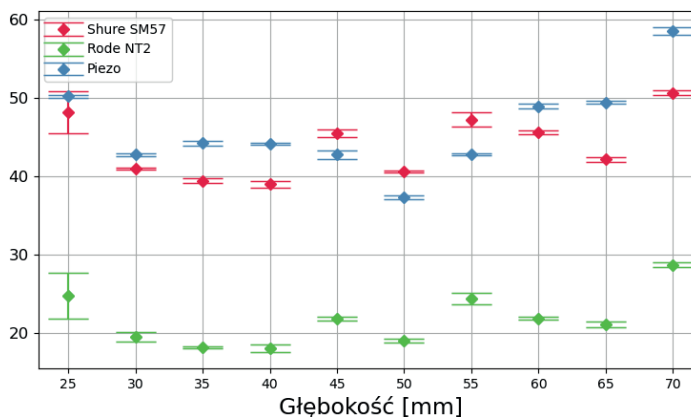
4.1. Analiza barwowa

Jednym z najistotniejszych parametrów wykorzystywanych do analizy barwy instrumentów jest środek ciężkości widma, który w wielu badaniach pokazany został jako silnie korelujący z percepcją jasności barwy dźwięku [10]. Rozważając wartości *spectrum centroid* wyznaczone z dźwięków nagranych za pomocą mikrofonu Shure SM57 przy różnych objętościach komory rezonansowej instrumentu, które zostały przedstawione na rysunku 6, możemy zaobserwować znaczące różnice pomiędzy nimi.



Rys. 6. Wykres wartości środka ciężkości widma w przypadku dźwięku E2 nagrałego mikrofonem Shure SM57 w zależności od głębokości komory rezonansowej instrumentu wraz z zaznaczonymi odchyleniami standardowymi w ramach serii pomiarowych

Zmiany dźwięku powodujące zróżnicowanie wartości tego parametru w zakresie 3200–4200 Hz będą niezwykle znaczące w kontekście jego barwy i sposobu, w jaki instrument będzie mógł być wykorzystywany muzycznie. Na wykresie 7 przedstawiona została wartość parametru środka ciężkości widma po normalizacji częstotliwością podstawową dźwięku w przypadku wszystkich zastosowanych metod rejestracji dźwięku.



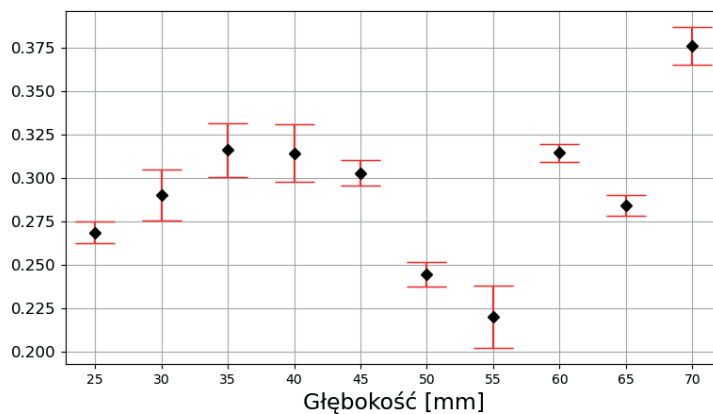
Rys. 7. Wykres wartości środka ciężkości widma znormalizowanego częstotliwością podstawową dźwięku w przypadku dźwięku E2 w zależności od głębokości komory rezonansowej instrumentu wraz z zaznaczonymi odchyleniami standardowymi w ramach serii pomiarowych

W badaniach eksperymentalnych JND (*Just-Noticeable Difference*) dotyczących środka ciężkości widma normalizowanego częstotliwością podstawową wartość progowa, powyżej której zmiany są zauważalne i rozróżnialne dla słuchaczy, wyniosła 0,15 [11]. Jest to znacząco poniżej zakresu zmian tego parametru, które zostały zarejestrowane każdą z metod rejestracji dźwięku. W związku z tym zmiany spowodowane zmianą głębokości komory rezonansowej instrumentu będą wyraźnie odczuwalne i będą wpływały na to, jak będą odbierane dźwięki generowane przez ten instrument. Podobny zakres zmian możemy zaobserwować również w kolejnych parametrach barwowych – *zero crossing rate* (0,04–0,07 s) i *noisiness* (0,025–0,175), które opisują szumowość sygnału i stosunek energii szumowej do energii harmonicznym w dźwięku [3]. Oba te parametry również zostały określone jako skorelowane z odczuwaną jasnością i głębią barwy dźwięku [4, 5].

Na wykresach 6 i 7 przedstawione również zostały wartości odchylenia standardowego wyznaczonych parametrów w przypadku próby dziesięciu wzbudzeń wykonanych w ramach serii pomiarowej. Niewielkie wartości tych odchyżeń w stosunku do różnic pomiędzy wartościami uzyskanymi przy różnych konfiguracjach wskazują na wysoki poziom powtarzalności nagrywanych wybrzmień oraz prawidłowe funkcjonowanie skonstruowanego mechanizmu wzbudzającego. Dodatkowo analiza strojenia instrumentu pomiędzy poszczególnymi konfiguracjami wykazała, że maksymalne odchylenie pomiędzy strojeniami wynosiło poniżej sześciu centów. Wartość ta jest znacząco poniżej progu rozróżnialności przeciętnego słuchacza [12] i w związku z tym nie powinien to być czynnik wpływający na wyniki analizy. Wskazuje to na prawidłowe działanie skonstruowanego stanowiska badawczego oraz wysoki poziom wiarygodności uzyskanych wyników.

4.2. Analiza harmoniczna

Warte rozważenia są również parametry opisujące struktury harmoniczne widoczne w widmie amplitudowym sygnału. Takim parametrem jest *tristimulus*, definiowany jako stosunek amplitud poszczególnych harmonicznych sygnału do sumy amplitud wszystkich harmonicznych. Na rysunku 8 przedstawiono wartości *tristimulus 2*, czyli stosunek amplitud harmonicznych 2, 3 i 4 do sumy amplitud wszystkich harmonicznych sygnału [3].

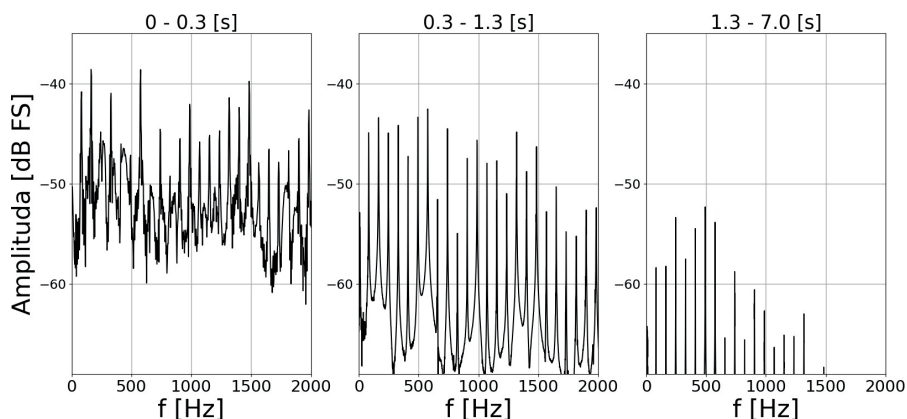


Rys. 8. Wykres wartości parametru *tristimulus 2* w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Shure SM57 w zależności od głębokości komory rezonansowej instrumentu wraz z zaznaczonymi odchyleniami standardowymi w ramach serii pomiarowych

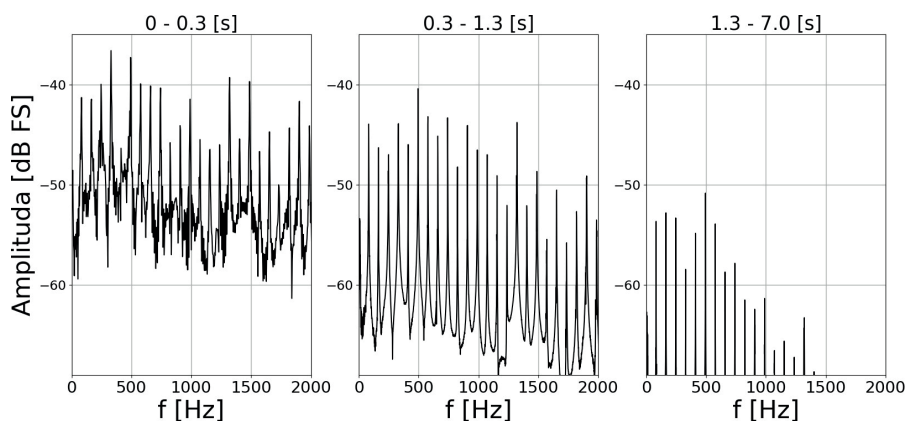
Zakres różnic zaobserwowanych przy różnych objętościach badanego chordofonu wynosi 0,225–0,375. Podobny zakres różnic występuje również w przypadku parametrów *tristimulus 1* (0,025–0,09) i *tristimulus 3* (0,56–0,66). Parametry te wykazują silną korelację z odczuwaną ostrością barwy dźwięku i jego fakturą [5]. W związku z tym opisane różnice mogą mieć wpływ na to, jak instrument jest odbierany przez słuchaczy. Dodatkowo analiza sygnału pokazała, że modyfikacja związana ze zmianą objętości nie miała znaczącego wpływu na nieharmoniczność produkowanego dźwięku.

Analiza widm amplitudowych impulsów instrumentu z podziałem na fazy wybrzmienia pokazała również, że stosunki pomiędzy amplitudami harmonicznych ewoluują wraz z trwaniem dźwięku. Oznacza to, że sposób, w jaki dochodzi do wybrzmiewania, również jest zależny od objętości komory rezonansowej. Na rysunkach 9 i 10 przedstawione zostały widma uzyskane w przypadku głębokości komory 25 mm i 50 mm z podziałem na trzy fazy wybrzmienia dźwięku (0,0–0,3 s; 0,3–1,3 s; 1,3–7,0 s). Porównując je, można zaobserwować, że dźwięk w przypadku głębokości 25 mm charakteryzuje się dominującymi harmonicznymi drugą i siódmą w pierwszej fazie, siódmą, szóstą i drugą harmoniczną w drugiej fazie oraz szóstą i trzecią harmoniczną w wybrzmieniu, natomiast w przypadku głębokości 50 mm są to harmoniczne czwarta i szóstą w pierwszej fazie, szóstą i pierwszą w drugiej fazie oraz szósta, druga, trzecia i pierwsza w wybrzmieniu. Różnice te są niezwykle znaczące w kontekście percepcji barwy instrumentu przez słuchaczy, gdyż powodują zmianę dominującego interwału w serii alikwotowej dźwięku. Dokładne porównanie widma ukazuje że w drugiej fazie wybrzmienia w przypadku głębokości 25 mm dominującym interwałem jest kwinta, natomiast w przypadku głębokości 50 mm jest nim tercja

mała. Jeden z tych interwałów jest konsonansem doskonałym, zaś drugi konsonansem niedoskonałym, co może mieć znaczący wpływ na odczuwaną barwę brzmienia [13].

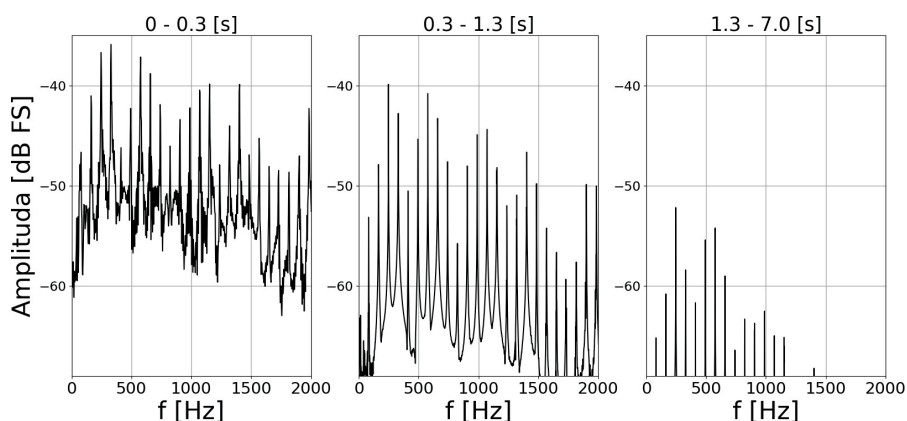


Rys. 9. Uśrednione widma amplitudowe uzyskane w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Rode NT2 z ustawieniem głębokości 25 mm

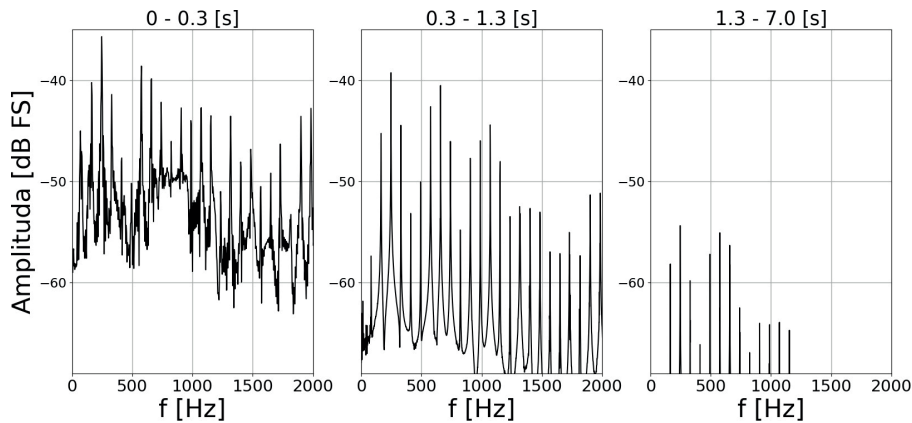


Rys. 10. Uśrednione widma amplitudowe uzyskane w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Rode NT2 z ustawieniem głębokości 50 mm

Porównanie widm z rysunków 11 i 12 ukazuje kolejny powód, dla którego analiza poszczególnych harmonicznych może być znacząca. W dźwięku E2 nagrany w przypadku ustawienia głębokości 60 mm możemy zaobserwować wyraźnie widoczną harmoniczną szóstą zarówno w pierwszej, jak i drugiej fazie wybrzmienia. W dźwięku E2 uzyskany w przypadku głębokości 70 mm harmoniczna ta jest znacząco słabsza i przyjmuje wartość o ponad 7 dB niższą w pierwszej fazie wybrzmienia i 5 dB niższą w drugiej fazie.



Rys. 11. Uśrednione widma amplitudowe uzyskane w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Shure SM57 z ustawieniem głębokości 60 mm



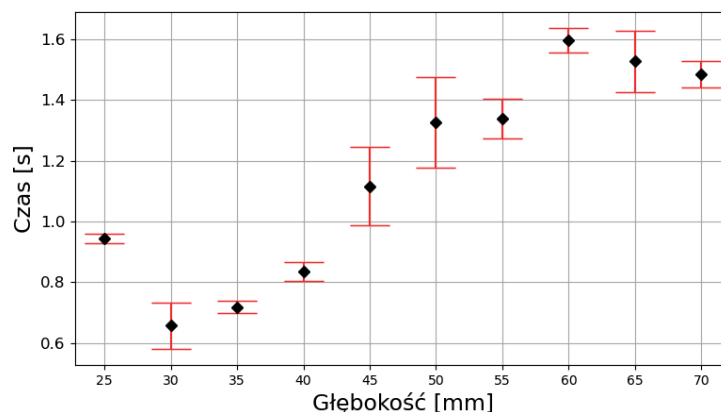
Rys. 12. Uśrednione widma amplitudowe uzyskane w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Shure SM57 z ustawieniem głębokości 70 mm

Różnica znacząco przekracza 1 dB, która to wartość została uznana za graniczną dla zmiany pojedynczej harmonicznej dźwięku, przy której różnica ta jest już wykrywalna przez słuchaczy [11, 14, 15]. Pokazuje to, że zakres obserwowanych zmian będzie wyraźnie słyszalny przez odbiorców. Dodatkowo szosta harmoniczna tworzy interwał kwinty z częstotliwością podstawową dźwięku. Konsonansowy charakter tego interwału może powodować znaczące zmiany w brzmieniu całości dźwięku.

Oczywiście charakter i zakres tych zmian będzie inny w przypadku każdego dźwięku i określenie całokształtu zmian wymagałoby wyznaczenia pełnej charakterystyki widmowej instrumentu. Zmiany te jednak pokazują, że zmiana objętości w wyniku wykorzystania skonstruowanego mechanizmu może wpływać na brzmienie w złożony sposób.

4.3. Analiza czasowa

Kolejnym aspektem analizy zmian w brzmieniu instrumentu jest jego obwiednia amplitudowa. Zmiany w charakterystyce czasowej instrumentu w postaci zmiany w nachyleniu zbocza narastania dźwięku lub zmiany w jego czasie wybrzmiewania są niezwykle kluczowe dla charakteru instrumentu oraz kontekstów muzycznych, w których może on być wykorzystywany. Rysunek 13 przedstawia wykres wartości czasów wybrzmienia instrumentu, czyli czasów pomiędzy osiągnięciem maksimum obwiedni amplitudowej sygnału a jej opadnięciem poniżej ustalonej wartości granicznej 10% wartości maksymalnej.



Rys. 13. Wykres wartości parametru decay time w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Shure Sm57 w zależności od głębokości komory rezonansowej instrumentu wraz z zaznaczonymi odchyleniami standardowymi w ramach serii pomiarowych

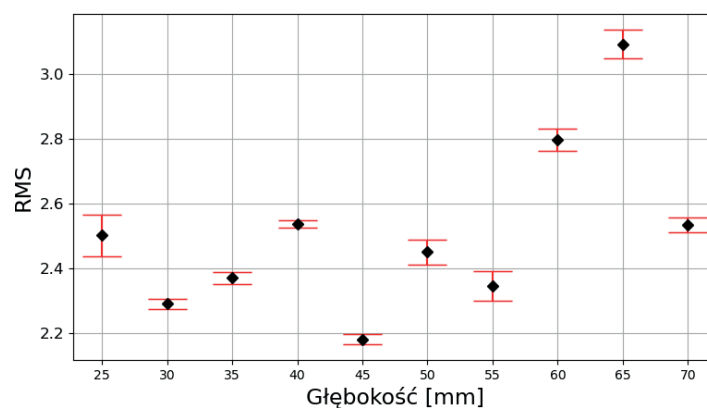
Zakres różnic zaobserwowanych w przypadku różnych ustawień głębokości wynosi 0,6–1,3 s, co oznacza, że zmiana objętości instrumentu może się wiązać z dwukrotną zmianą jego czasu wybrzmienia. Są to różnice, które byłyby łatwo zauważalne dla słuchaczy i zmieniałyby możliwe zastosowania instru-

mentu. W wartościach parametru log attack time nie można jednak zauważyć znaczących różnic. Wskazuje to, że charakterystyka czasowa chordofonu szarpanego jest silnie zależna od objętości jego komory rezonansowej, jednak zmiany zauważalne są głównie w czasie wybrzmienia instrumentu, bez znaczących zmian w fazie narastania dźwięku.

4.4. Analiza energetyczna

Warto również zwrócić uwagę na wpływ badanego mechanizmu na energię rejestrowanego sygnału instrumentu. Na rysunku 14 przedstawiona została zależność energii sygnału, która jest wskaźnikiem poziomu głośności dźwięku, od ustawionej głębokości komory rezonansowej.

Wyraźnie widać, że zmiany związane z wykorzystywanym mechanizmem zmiany objętości znacząco wpływają na energię wytwarzanego dźwięku. Zakres różnic wynosi 2,2–3 dB FS, co pokazuje, że energia impulsów w przypadku różnych głębokości różniła się o 40%. Dlatego też skonstruowany mechanizm może mieć zauważalny wpływ na głośność instrumentu. Jest to szczególnie znaczące w związku z faktem, że głośność była historycznie najważniejszym czynnikiem, który próbowano maksymalizować, co prowadziło do rozwoju nowych postaci gitary akustycznej i jest jedną z głównych cech, na podstawie których podejmuje się decyzje przy wyborze odpowiedniego typu gitary.



Rys. 14. Wykres wartości parametru RMS w przypadku dźwięku E2 nagranych mikrofonem Shure SM57 w zależności od głębokości komory rezonansowej instrumentu wraz z zaznaczonymi odchyleniami standardowymi w ramach serii pomiarowych

5. Wnioski

Celem niniejszej pracy było zbadanie możliwości modyfikacji brzmienia instrumentu akustycznego w wyniku zmiany jego właściwości fizycznych. Zaprojektowany został instrument strunowy, w którym objętość komory rezonansowej jest regulowana w rezultacie zmiany pozycji ruchomej płyty tylnej. Stworzony został prototyp opisanego instrumentu i wykonane zostały nagrania w różnych konfiguracjach.

Analiza uzyskanych nagrań pokazuje, że różnice w brzmieniu instrumentu uzyskane dzięki zmianie objętości jego komory rezonansowej są wyraźnie widoczne. Znaczące różnice w wartościach środka ciężkości widma, *noisiness* i *tristimulus*, wskazują na to, że mechanizm może modyfikować barwę instrumentu, a w szczególności jego jasność i fakturę. Różnice w czasie ataku i wybrzmienia pokazują wpływ objętości komory na cechy czasowe instrumentu, natomiast zmiany w parametrach energetycznych przedstawiają możliwość modyfikacji jego głośności.

Zasadne jest stwierdzenie, że w wyniku wykorzystania zaprojektowanego mechanizmu możliwa jest modyfikacja wszelkich aspektów brzmienia instrumentu. Uzyskane wyniki pokazują jednak niezwykle złożony charakter opisywanych zmian i nie umożliwiają przewidywania, jak modyfikowana będzie tonalność instrumentu w związku z konkretnymi konfiguracjami mechanizmu. Można wnioskować zatem, że mechanizmy modyfikujące brzmienie chordofonów przez wpływ na ich parametry fizyczne mogą znaleźć zastosowanie w muzyce, jednak proces ich projektowania i zrozumienia wymaga dodatkowych badań.

Bibliografia

- [1] N. Fletcher, T. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Springer, New York, 1998, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21603-4>
- [2] B. Owsinski, *The Recording Engineers Handbook*, Thomson Course Technology PTR, 2005
- [3] G. Peeters, B.L. Giordano, P. Susini, N. Misdariis, S. McAdams, *The Timbre Toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 2011, vol. 130, s. 2902–2916, <https://doi.org/10.1121/1.3642604>
- [4] V. Alluri, P. Toiviainen, *Exploring Perceptual and Acoustical Correlates of Polyphonic Timbre*, *Music Perception* 2010, vol. 27, s. 223–242
- [5] A. Zacharakis, K. Pastiadis, J.D. Reiss, *An Interlanguage Study of Musical Timbre Semantic Dimensions and Their Acoustic Correlates*, *Music Perception* 2014, vol. 31, s. 339–358, <https://doi.org/10.1525/mp.2014.31.4.339>
- [6] A. Zacharakis, K. Pastiadis, J.D. Reiss, *An Interlanguage Unification of Musical Timbre*, *Music Perception* 2015, vol. 32, s. 394–412, <https://doi.org/10.1525/mp.2015.32.4.394>
- [7] V. Alluri, P. Toiviainen, I. Jääskeläinen, E. Glerean, M. Sams, E. Brattico, *Large-scale brain networks emerge from dynamic processing of musical timbre, key and rhythm*, *NeuroImage* 2012, vol. 59, s. 3677–3689, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.019>
- [8] B. McFee, A. Metsai, M. McVicar, S. Balke, C. Thomé, C. Raffel, F. Zalkow i in., *librosa/librosa: 0.8.1rc2*, wer. 0.8.1rc2, maj 2021, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4792298>
- [9] T. N. Magalhaes, F.B. Barros, M.A. Loureiro, *Iracema: a Python library for audio content analysis*, *Revista de Informática Teórica e Aplicada* 2020, vol. 27, s. 127–138, <https://doi.org/10.22456/2175-2745.107202>
- [10] E. Schubert, J. Wolfe, A. Tarnopolsky, *Spectral centroid and timbre in complex, multiple instrumental textures*, w: *ICMPC8: Proceedings of the 8th international conference on music perception & cognition: August 3–7, 2004: Evanston, Illinois, USA*, Causal Productions, Sydney, Australia, 2004, s. 654–657
- [11] S. Carral, *Determining the Just Noticeable Difference in Timbre Through Spectral Morphing: A Trombone Example*, *Acta Acustica united with Acustica* 2011, vol. 97, s. 466–476, <https://doi.org/10.3813/AAA.918427>
- [12] J.M. Zarate, C.R. Ritson, D. Poeppel, *Pitch-interval discrimination and musical expertise: Is the semitone a perceptual boundary?*, *The Journal of the Acoustical Society of America* 2012, vol. 132, s. 984–993
- [13] M. Pluta, *Zasady muzyki i notacja muzyczna*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2012
- [14] D.M. Green, *Auditory intensity discrimination*, w: W.A. Yost, A.N. Popper, R.R. Fay (eds.), *Human Psychophysics*, Springer, New York, 1993, s. 13–55, https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2728-1_2
- [15] E. Ozimek, *Dźwięk i jego percepcja: aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2020