

Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI
I TECHNIK INFORMACYJNYCH



Instytut Systemów Elektronicznych

Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Elektronika

w specjalności Elektronika i inżynieria komputerowa

Cyfrowy układ efektów dźwiękowych do gitary transakustycznej

Bartosz Ostrowski

Numer albumu 300331

promotor

dr hab. inż. Jacek Misiurewicz

WARSZAWA, 2022

Streszczenie.

Niniejsza praca poświęcona jest poszczególnym etapom projektowania prototypu cyfrowego efektu pogłosu do gitary trans-akustycznej z wykorzystaniem cyfrowego przetwarzania sygnałów. Przedstawione zostały dwie drogi rozwiązania problemu: poprzez splot sygnału wejściowego z odpowiedzią impulsową pogłosu pomieszczenia oraz poprzez symulację pogłosu pomieszczenia z wykorzystaniem opóźnień. W ramach pracy wykonany został fizyczny prototyp z wykorzystaniem samodzielnie zaprojektowanego przedwzmacniacza analogowego wraz z płytką drukowaną, mikrokontrolera STM32, wzmacniacza audio oraz głośnika wibracyjnego.

Słowa kluczowe: STM32, PCB, cyfrowe przetwarzanie sygnałów

1. Wstęp

1.1. Pochodzenie gitary

Dzięki naturalnemu rozwojowi ludzkości i pojawieniu się potrzeby ekspresji emocjonalnej, ludzkość zaczęła tworzyć instrumenty, a za ich pomocą muzykę od najprostszych kilkudziesiękowych zlepków, aż do kilkuset stronicowych tabulatur. Instrumenty strunowe szarpane od zawsze wtórowały na rynku dzięki swojemu unikalnemu brzmieniu. Odegrały one kluczową rolę w rozwoju kultury, będąc filarem brzmień w wielu gatunkach muzycznych. Jednakże wiedza o ich początkach jest ograniczona.

Prawdopodobnie jednych z pierwszych instrumentów strunowych był powstały w czasach prehistorycznych łuk muzyczny. Jest to przykład wykorzystania przedmiotu codziennego użytku do wytwarzania dźwięku. Podstawą instrumentu był myśliwski łuk, którego drgająca cięciwa generowała falę akustyczną. Jego dźwięk był cichy ze względu na brak pudła rezonansowego, co rozwiązano poprzez dodanie pudła rezonansowego u podstawy instrumentu [1] Początki wykorzystania łuku myśliwskiego jako środka ekspresji szacuje się na 7000 lat przed naszą erą [2] .



Rysunek 1.1. Łuk muzyczny [3] .

Jednymi z najstarszych instrumentów znanych w historii są Środkowo Afrykańskie harfy jamowe, w których drgającym elementem był napięty giętki pręt. Wydobywanie dźwięku odbywało się poprzez szarpanie lub uderzanie [4] . Człowiek na drodze rozwoju nauczył się jak odpowiednio manipulować instrumentem, by zmieniać wysokości granych dźwięków, tworzyć skale muzyczne i zwiększać możliwości samego instrumentu.

Dodając do instrumentu drewniane pudło rezonansowe udało się zwiększyć głośność i wydobyć nowe, niespotykane wcześniej brzmienie. W ten sposób powstał stworzony w Wietnamie *cai dan bau* o zawodzącym i jęklwym brzmieniu. W podobnym czasie Wietnamczycy stworzyli również cytrę jamową. Rama rezonansowa instrumentu obudowana jest korą drzewną, natomiast źródłem dźwięku są struny o długości do 3,5 m wykonane z włókien trzcinopalmy [4] .

Dalszy rozwój instrumentów w postaci zwiększenia ilości strun o różnych grubościach oraz wielu mechanizmów ich mocowania i możliwości regulacji napięcia przyniósł kolejne możliwości kreowania dźwięku i brzmienia. Starożytni Egipcjanie, Grecy oraz Persowie konstruowali bardziej rozbudowane instrumenty takie jak kitary, liry oraz lutnie [1] .



Rysunek 1.2. Harfa jamowa [5] .

1.2. Współczesne gitary

Dzięki wielu udoskonaleniom powstałym na przestrzeni lat, takim jak; zwiększenie ilości, strun i rozmiaru pudła rezonansowego oraz dostosowanie długości szyjki i ilości progów w celu precyzyjnego, manualnego skracania długości strun, dzisiejsza gitara jest instrumentem kompletnym, uniwersalnym. Pierwsza gitara była rezultatem wzajemnego przejmowania cech wcześniej wspomnianych kitar, lir i lutni. Okres jej powstania nie jest dokładnie znany. Jedne źródła podają okres pierwszego tysiąclecie naszej ery w Afryce Północnej [1] , natomiast według drugich pierwowzorem był posiadający 6 strun Perski *sitar* z szóstego wieku przed naszą erą. Instrument ten dzięki swojej wszechstronności dotarł na południe Europy, gdzie zyskał ogromną popularność, szczególnie w Hiszpani i Włoszech. Pierwsze wspomnienie gitary możemy odnaleźć w dziele *Ars Musica* autorstwa Juana Gil of Zamora z 1265 roku [4] .

Instrument ten w znanej nam formie powstał w XIX wieku, kiedy to hiszpański lutnik Almerii Antonio de Torres Jurado skonstruował gitarę klasyczną. Gitara posiadała wzmocnione brzmienie przez powiększone pudło rezonansowe z ożebrowaniem w kształt wachlarza [4] . Dzięki obecności pudła energia kinetyczna jest szybciej odbierana ze struny, a co za tym idzie, w ciągu jednostki czasu zwiększona jest ilość emitowanej energii [7] . W wyniku tego, drgania trwają krócej, ale głośność instrumentu znacząco wzrasta. Wymiary całego instrumentu to 98 cm długości, 37 cm szerokości oraz 10 cm grubości. Manipulacja jasnością brzmienia na etapie konstrukcyjnym odbywa się poprzez odpowiednio dobraną grubość pudła rezonansowego. Większa grubość pozwala uzyskać ciemniejsze brzmienie (zwiększone wzmocnienie dolnych częstotliwości), natomiast mniejsza – jaśniejsze (zwiększone wzmocnienie wyższych częstotliwości). W klasycznej wersji instrumentu jest 19 progów umieszczonych na przyklejonej szyjce (inaczej gryfie), wykonanej z drewna [4] . Ich odległość jest ściśle określona zgodnie ze wzorem (1.1)[1] . Gitara posiada maszynki umieszczone na główce, do regulacji napięcia strun. One zaś do roku 1946 wykonywane były z jelit zwierzęcych, natomiast później już z nylonu. Dzięki temu jej

brzmienie jest dosyć miękkie i bardzo dobrze wpasowuje się w kompozycje zarówno solowe jak i orkiestralne. Sama wysokość dźwięku ściśle zależy od dobru odpowiednich strun. Wysokość dźwięku zależna jest od częstotliwości drgań struny, a ta jest zależna od materiału, z którego struna została wykonana, jej przekroju, długości oraz napięcia zgodnie ze wzorem (1.2)[4] . Z tej zależności widać, że jest kilka możliwości manipulacji wysokością dźwięku, jak; skracanie drgającej części struny za pomocą palców, naprężanie za pomocą stroików oraz poprzez dobranie odpowiedniej grubości strun. Struna oparta jest w dwóch punktach: w mostku oraz w siodełku. Zatem drganie struny wytwarza falę stojącą o połowie długości fali, której częstotliwością jest częstotliwość podstawowa danego dźwięku. Jej wielokrotności tworzą harmoniczne budujące brzmienie. Gitarzysta może wpływać też na wycinanie harmoniczných szarpiąc strunę w odpowiednim miejscu. Uderzenie w $1/n$ długości struny spowoduje usunięcie n -tej harmonicznej. Warty wspomnienia elementem jest mostek, którego zadaniem jest przeniesienie energii kinetycznej ze struny na płytę wierzchnią pudła rezonansowego, do której jest on przyklejony. W jego środku znajduje się wyżłobienie, w którym znajduje się podstawek. To właśnie na nim oparte są struny. Może on być wykonany plastiku, grafitu, mosiądzu oraz kości słoniowej. Jest on również specjalnie wyprofilowany dla każdej struny, by odpowiednio dopasować menzurę, czyli długość akcji strun tak, by skracając strunę z użyciem progów na gryfie, wysokość dźwięków była zgodna ze skalą muzyczną.

$$l_{N+1} = \frac{m - \sum_0^N l_n}{17,817} \quad (1.1)$$

Gdzie:

17,817 – stała określająca teoretyczną proporcję rozstawu progów

m – menzura instrumentu (czynna akcja strun od mostka do siodełka)

N – numer poprzedniego progu

l_n – odległość n -tego progu od $(n - 1)$ -go

$$f = \frac{1}{2 \cdot s \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot P}{\pi \cdot d}} \quad (1.2)$$

Gdzie:

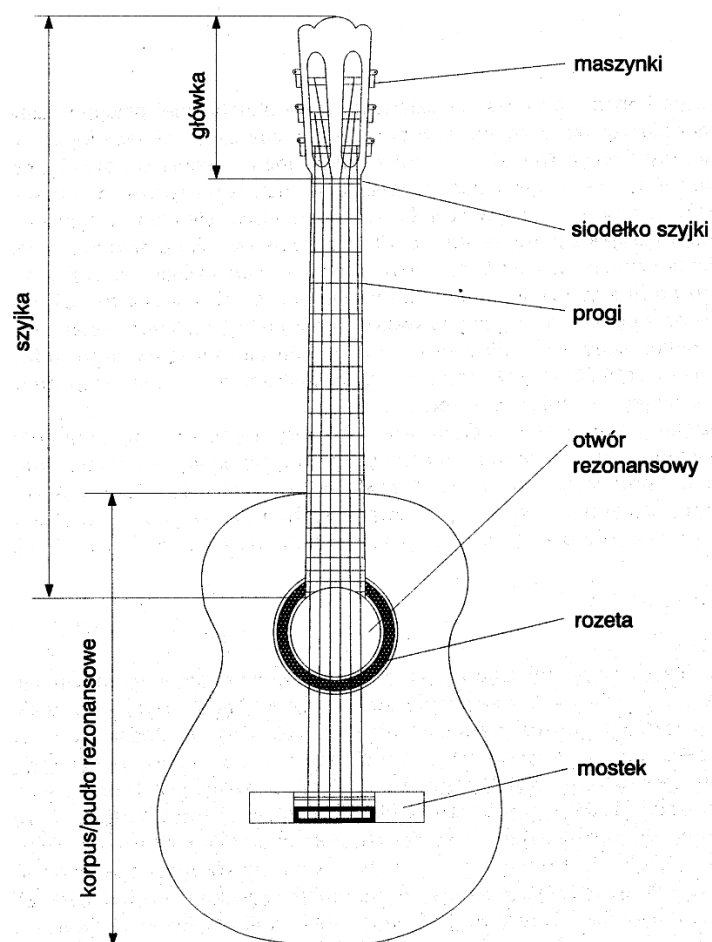
$g = 981 \text{ cm}$,

s – długość struny,

r – promień w przekroju [cm],

P – napięcie w gramach,

d – gęstość materiału.



Rysunek 1.3. Budowa gitary klasycznej [1] .

Nieduża różnica dzieli gitarę klasyczną od gitary akustycznej. Gitara posiada nie dużo większe pudło rezonansowe wykonane zazwyczaj z drewna, czasami też z tworzyw sztucznych. Materiały użyte do wykonania pudła mają duży wpływ na wzmacnianie poszczególnych harmoniczných, co przekłada się na zróżnicowanie brzmień tych instrumentów. Istotną zmianą wpływającą równie mocno na brzmienie instrumentu są zastosowane w gitarze akustycznej metalowe struny. Połączenie tych dwóch modyfikacji pozwala na uzyskanie głośniejszego, ostrzejszego, a wręcz szklatego brzmienia. Dodatkowo szyjka gitary została odchudzona, a w jej wnętrzu pod podstrunnicą umieszczony został pręt regulacyjny w celu zapobiegania odkształceniu gryfu przez zwiększony naciąg metalowych strun. Oprócz aspektów technicznych zastosowano kilka urozmaiceń wizualnych takich jak; znaczniki numeracji progów na podstrunnicy czy też *pickguard*, czyli cienki element z tworzywa umieszczony obok otwory rezonansowego, który przeciwdziała uszkodzeniom lakieru od uderzeń kostką gitarową. Dodatkowo menzura instrumentu została zwiększona, progi zostały obniżone, co pozwala na wykorzystanie większej ilości technik gitarowych podczas gry na instrumencie [4] .

Dodatkową funkcją zaimplementowaną w gitarze akustycznej była możliwość wyprowadzenia informacji o dźwięku w postaci prądu elektrycznego poprzez zamontowanie pod podstawkiem mostka przetwornika piezoelektrycznego podłączonego do układu wzmacniającego

sygnał. Najczęściej taki układ zasilany baterią 9V, co pozwala na podłączenie instrumentu do aparatury studyjnej czy też estradowej. Instrument ten nazwano gitarą elektro-akustyczną.

W obecnych czasach popularność gitary w muzyce komercyjnej zaczyna stopniowo maleć. Pomimo zanikających trendów związanych z muzyką odgrywaną na instrumentach strunowych na rzecz muzyki elektronicznej, na rynku ciągle dostępne są rozmaite gitary począwszy od gitar klasycznych, akustycznych, elektrycznych, elektro-akustycznych, basowych, barytonowych oraz mniej popularnych, lecz niezwykle ciekawych gitarach trans-akustycznych. Ich obecność na rynku można zaobserwować dzięki firmie Yamaha od trzeciej dekady dwudziestego pierwszego wieku. Niezwykłość tych gitar polega na ich możliwościach brzmieniowych wynikających z połączenia akustycznych właściwości instrumentu oraz wykorzystaniu efektów do uwydatnienia jej brzmienia [6] .

1.3. Gitara trans-akustyczna

Gitara trans-akustyczna różni się od zwykłej gitary elektro-akustycznej w niedużym stopniu. W gitarze elektro-akustycznej między mostkiem a podstawkiem znajduje się przetwornik piezoelektryczny, który przekształca energię kinetyczną strun w energię elektryczną. Następnie, sygnał transportowany jest do aktywnego układu wzmacniającego wbudowanego w gitarę, dostarczając sygnał na wyjście liniowe. Takie rozwiązanie pozwala na łatwe nagłośnienie instrumentu z wykorzystaniem miksera bez konieczności wykorzystania dodatkowego wzmocnienia. W gitarze trans-akustycznej również umieszczony jest przetwornik piezoelektryczny i układ wzmacniający, jednakże dźwięk nie jest transportowany do wyjścia liniowego. W tym przypadku, w gitarę wbudowany jest procesor efektów, który nakłada w czasie rzeczywistym efekty dźwiękowe na sygnał. Najczęściej występującymi efektami wbudowanymi są *reverb* (pogłos) oraz *chorus* (modulacja czasowa). Zmodulowany sygnał zostaje wzmocniony, a następnie trafia na głośnik wibracyjny nazwany przez firmę Yamaha jako *actuator*. Zamienia on sygnał elektryczny z powrotem na energię kinetyczną, którą przekazuje na płytę wierzchnią gitary. Co za tym idzie, pudło rezonansowe wzmacnia zarówno naturalny dźwięk pochodzący ze strun oraz sygnał przetworzony. Dzięki takiemu rozwiązaniu, słuchacz odczuwa wrażenie jakby był to naturalny dźwięk instrumentu [6] .



Rysunek 1.4. Actuator w gitarze transakustycznej [8] .



Rysunek 1.5. Actuator w gitarze transakustycznej [9] .

System ten zasilany jest dwiema bateriami – AA 1,5 V, dzięki czemu korzystanie z instrumentu nie wymaga dodatkowego zasilania [6] . Z pełni możliwości gitary można zatem korzystać w dowolnym momencie, a efekty które w przypadku pozostałych gitar wymagają dodatkowego zasilania, miejsca i wzmocnienia tutaj są wbudowane i energooszczędne. Gitara trans-akustyczna cechuje się zatem dużą mobilnością i poręcznością, biorąc pod uwagę jej funkcjonalność na tle gitar elektrycznych, akustycznych i elektro-akustycznych.

Niestety zastosowane rozwiązania technologiczne i wykorzystane komponenty do ich realizacji są chronione przez Yamahę, więc dostępność kart technologicznych i specyfikacji technicznej jest znacząco ograniczona, co znacząco utrudnia realizację projektu. Podobną technologię możemy zaobserwować w gitarach *Lag hyvibe*, natomiast jakość efektów dźwiękowych zastosowanych w tych instrumentach jest subiektywnie gorsza od rozwiązań Yamahy. Dzięki Obecności tylko dwóch bardziej znaczących producentów gitar trans-akustycznych na rynku muzycznym doradziła do wysokich cen tych instrumentów. Najtańszy model Yamahy FS-TA na dzień 5 maja 2022 kosztuje 4350 złotych.

1.4. Cel i założenia pracy

Celem pracy jest stworzenie prototypu gitary transakustycznej oraz weryfikacja jego poprawnego działania. Prototyp powinien spełniać następujące założenia:

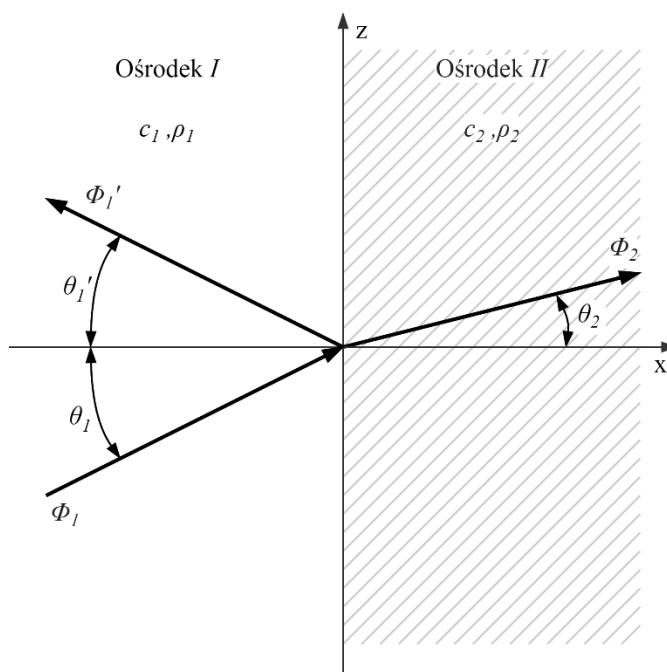
- gitara powinna symulować co najmniej jeden efekt dźwiękowy,
- przetworzony dźwięk powinien wydobywać się pudła rezonansowego,
- jak najniższe koszty powinny być uwzględnione przy doborze komponentów,
- układ przetwarzania sygnału oraz zasilanie powinny umożliwić mobilne korzystanie z gitary.

Realizacja celu wymagała następujących kroków:

- badania możliwości realizacji efektu dźwiękowego,
- doboru komponentów umożliwiających poprawną pracę układu,
- zaprojektowania toru sygnału dźwiękowego,
- dobrania odpowiedniego do możliwości komponentów algorytmu realizującego efekt dźwiękowy,
- zaprogramowania procesora efektów,
- sprawdzenie poprawności działania układu z wykorzystaniem sygnałowej aparatury pomiarowej.

2. Efekt pogłosu

Jednym z dwóch najpopularniejszych efektów wykorzystywanych w gitarach trans-akustycznych jest *reverb*, czyli pogłos. Jest on zjawiskiem akustycznym, w którym dźwięk docierający do ucha jest stopniowo wygaszany w czasie. Długość pogłosu określa się czasem potrzebnym do spadku natężenia dźwięku o 60 dB. Ze względu na budowę ludzkiego ucha człowiekowi ciężko usłyszeć pogłos trwający krócej niż 1/15 sekundy ze względu na to, że przy takiej różnicy czasu między bezpośrednią falą ze źródła i falą odbitą, obie fale są postrzegane przez narząd słuchu jako jedna. Bardzo często efekt ten można usłyszeć w sytuacjach codziennych, gdy słuchacz znajduje się w pomieszczeniu bez miękkich elementów na ścianach czy podłodze. Powierzchnie płaskie jak ściany, podłoga czy sufit o stają się przeszkodą na drodze fal akustycznych [10]. W momencie, gdy fala akustyczna trafia na granicę dwóch ośrodków, może w zależności od impedancji ośrodków, odbita, częściowo odbita lub pochłonięta [11].



	$\rho_1 \Phi' = \rho_2 \Phi''$	
--	--------------------------------	--

	$\frac{\partial \Phi'}{\partial x} = \frac{\partial \Phi''}{\partial x}$	
--	--	--

	$\theta_1 = \theta_1'$	
--	------------------------	--

	$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{c_1}{c_2}$	
--	---	--

1.5. Badanie pogłosu pomieszczeń.

2.1.1. Metoda badania

Do zbadania pogłosów pomieszczeń potrzebne były krótkie impulsy dźwiękowe. Do tych celów wykorzystać można np. szum przerywany lub nadmuchany powietrzem balon, który podczas przebicia generuje krótki impuls. W tym przypadku wykorzystana została metoda z wykorzystaniem balonów. Do późniejszych obliczeń i uzyskania odpowiedzi impulsowej z pogłosu pomieszczeń potrzebna była próba kontrolna. Musiała ona być wykonana w warunkach bezechowych. Takie warunki mogą być zapewnione w dużych otwartych przestrzeniach oraz w komorach bezechowych. Ze względu na sytuację pandemiczną i ograniczony dostęp w okresie przeprowadzania testów do poszczególnych pomieszczeń wydziałowych, próba kontrolna uzyskana została wykonana przez budynkiem wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Do wykonania wszystkich próbek przebicia balonów wykorzystany został mikrofon pojemnościowy NOVOX NC-1 nagrywający monofonicznie do formatu WAVE przy pomocy programu Audacity. Wzmocnienie mikrofonu przez większość widma częstotliwości jest równa dzięki czemu doskonale sprawdzi się on w rejestrowaniu przebić. Mikrofon przesyła dźwięk poprzez złącze USB. Poziom czułości mikrofonu był ustawiany indywidualnie dla każdego pomieszczenia, w taki sposób by przebicie balonu nie powodowało przesterowania mikrofonu.

2.1.2. Wykonanie pomiarów

Podczas wykonywania próby kontrolnej balon znajdował się w odległości 3 m od mikrofonu w chwili przebijania. Wykonanie próby kontrolnej pozwoliło uzyskać następujący przebieg czasowy oraz widmo sygnału:

Po wykonaniu próby kontrolnej należało wybrać pomieszczenia do badań ich pogłosu. Pierwszy pomiar wykonany został w korytarzu skrzydła C na czwartym piętrze wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Mikrofon został umieszczony w połowie korytarza, dzięki czemu odległość od ścian wyniosła 135 cm. Znajdował się on 1 m nad powierzchnią podłogi. Balon przebijany był na wysokości mikrofonu w odległości 470 cm. Na wykresie [] widoczny jest przebieg czasowy oraz widmo sygnału.

Następnym pomieszczeniem było audytorium centralne wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Mikrofon umieszczony był również w tym przypadku na wysokości 1 m. odległość do przedniej ściany wynosiła 750 cm, do tylnej 460 cm, natomiast odległość balonu wyniosła 700 cm. Wyniki prezentują się następująco:

Kolejnym pomieszczeniem była sala wykładowa 133 na wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych. Sufit pomieszczenia był w kształcie elipsy. Podłoga pomieszczenia pokryta jest wykładzinami w celu redukcji zbędnego pogłosu podczas prowadzenia zajęć. Znacząco wpłynęło to na przebieg eksperymentu, ponieważ pomimo dużego rozmiaru Sali wykładowej pogłos był najkrótszy. Balon przebijany był w odległości 680 cm od mikrofonu.

2. Realizacja pogłosu przy pomocy splotu

Efekt pogłosu można zrealizować na dwa sposoby. Pierwszy z nich zakłada wyekstrahowanie odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia z nagrania wybuchającego balonu. W odróżnieniu od metody ze sztucznym generowaniem pogłosu, możemy uzyskać efekt bardziej zbliżony do rzeczywistych wrażeń słuchowych.

Ekstrakcja odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia wymaga posiadania nagranej próbki kontrolnej z krótkim impulsem o jak najszerszym widmie w warunkach bezpogłosowych oraz drugie nagranie wykonane w pomieszczeniu, z którego wyekstrahowany zostanie pogłos, przy użyciu tego samego sygnału. W tym celu można wykorzystać krótki impuls szumu białego. Zaletą takiego rozwiązania jest szerokie widmo sygnału, natomiast wykonanie testu z wykorzystaniem szumu białego wymaga użycia głośnika do jego odtworzenia. Jest to dodatkowy element toru akustycznego mogący ograniczyć pasmo i wprowadzić pewne zniekształcenia. Ponadto membrana wibracyjna głośnika, ze względu na niejednakowy na całej powierzchni kształt, emituje dźwięk o różnym widmie w różnych kierunkach, a zależy nam na generacji niemalże jednakowej fali dźwiękowej w każdym kierunku. Zamiast białego szumu wykorzystać można dźwięk przebijanego balonu o zbliżonym ciśnieniu wewnętrznym. Takie rozwiązanie pozwoli uzyskać falę o zbliżonym widmie w każdym kierunku.

Aby wyekstrahować odpowiedź impulsową pogłosu pomieszczenia należy wykonać operację odwrotną do splotu, czyli dekonwolucję albo inaczej rozplot. Operacje matematyczne wykonywane będą zatem w dziedzinie częstotliwości. W tym celu na obu nagraniach wykonujemy transformację fourierowską. Uzyskane w ten sposób widma oznaczone będą jako $Y(\omega)$ – widmo przebijanego balonu w pomieszczeniu, z którego ekstrahowany jest pogłos, $X(\omega)$ – widmo próbki kontrolnej oraz $H(\omega)$ – widmo odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia. W dziedzinie częstotliwości operacja odwrotna do splotu będzie dzieleniem. Nie można jednak podzielić widm przez siebie $X(\omega)$ posiada wartości ujemne oraz zerowe. Aby prawidłowo wykonać obliczenia należy licznik i mianownik pomnożyć przez $\overline{X(\omega)}$, dzięki czemu pozbędziemy się wartości ujemnych z mianownika. Pozostają jeszcze zera w mianowniku, które można wyeliminować dodając pewną stałą eps . Stosując się do tych założeń otrzymujemy widmo odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia.

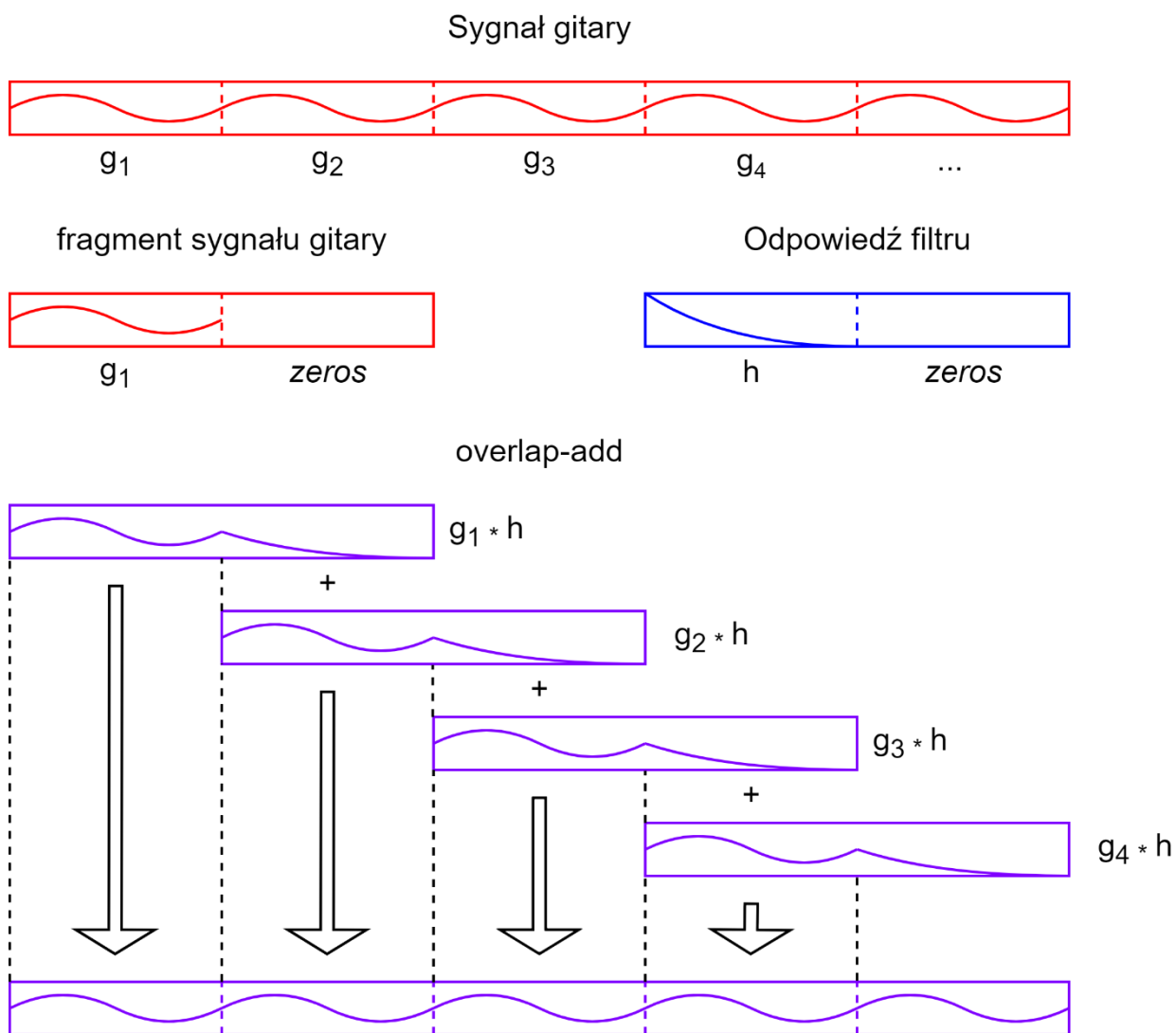
$$H(\omega) = \frac{Y(\omega) \cdot \overline{X(\omega)}}{X(\omega) \cdot \overline{X(\omega)} + eps} = \frac{Y(\omega) \cdot \overline{X(\omega)}}{|X(\omega)|^2 + eps}$$

Posiadając odpowiedź impulsową pogłosu pomieszczenia możemy wykonać spłot z sygnałem gitary. Należy jednak pamiętać, aby operacja splotu wycinka sygnału z pogłosem powinna trwać krócej niż czas trwania takiego fragmentu. W przypadku gdy odpowiedź

impulsowa trwa jedną sekundę i gdy częstotliwość próbkowania wynosi 48 kHz, filtr będzie składać się z $K = 48000$ próbek. Problematiczna może okazać się złożoność obliczeniowa procesu splotu bezpośredniego sygnału i odpowiedzi impulsowej. Do wykonania splotu trwającego sekundę sygnału, czyli $L = 48000$ próbek metodą bezpośrednią potrzebne będzie $K \cdot L \approx 2,3 \cdot 10^9$ mnożeń rzeczywistych oraz $(K - 1) \cdot L \approx 2,3 \cdot 10^9$ dodawań rzeczywistych. Według tabeli [...] wykonanie takiego zadania zajęłoby to $4,6 \cdot 10^9$ cykli zegara w procesorze STM32, zatem minimalna częstotliwość taktowania procesora musi wynosić 4,6 GHz. Należy jednak doliczyć cykle potrzebne na wczytywanie i odczytywanie danych z pamięci.

Aby ograniczyć zużycie procesora można zastosować jeden z algorytmów sekcjonowanego szybkiego splotu sygnałów dyskretnych tj. *Overlap-add*. Pierwszy krok algorytmu to podzielenie sygnału wejściowego na fragmenty o długości L i operowaniu na skończonym buforze składającym się z L próbek. Konieczne jest uzupełnienie zerami odpowiedzi impulsowej oraz bufora sygnału wejściowego do długości $L + K - 1$, aby po wykonaniu splotu nie utracić tzw. „ogona” każdej próbki. Następnie należy przekształcić każdy taki fragment sygnału transformatą Fouriera (FFT) na dziedzinę częstotliwości i pomnożyć z odpowiedzią impulsową pogłosu pomieszczenia również w dziedzinie częstotliwości. W wyniku takiego działania uzyskany zostanie spłot sygnału z pogłosem. Następnie odwrotną transformatą Fouriera należy przekształcić otrzymany fragment do dziedziny czasu. Kolejne fragmenty po całej operacji należy dodać do sygnału wyjściowego jak przedstawiono na rysunku [...].

Instrukcja	Opis	Ilość cykli
VABS.F32	Wartość bezwzględna	1
VADD.F32	Dodawanie	1
VSUB.F32	Odejmowanie	1
VMUL.F32	Mnożenie	1
VDIV.F32	Dzielenie	14
VCVT.F32	Konwersja do/z liczby stałoprzecinkowej	1
VSQRT.F32	Pierwiastek kwadratowy	14



$$4 \cdot \left(\frac{L}{2}\right) \log_2(L) = 4 \cdot \left(\frac{K}{2}\right) \log_2(K) = 4 \cdot \left(\frac{48000}{2}\right) \log_2 48000 \approx 1492872 \approx 1,5 \cdot 10^6$$

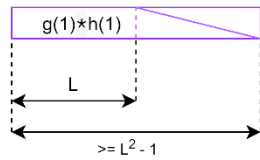
Fragmenty sygnału należy złożyć w całość. Ogony poprzednich fragmentów nachodzą na następne. Algorytm ten nazywa się *Overlap-add*. Metoda ta w swojej podstawowej wersji zakłada wykorzystanie pogłosu, krótszego niż długość spletanego fragmentu sygnału.

W przypadku gdy pogłos jest dłuższy niż fragment sygnału, należy podzielić go na fragmenty o takiej samej długości co fragment sygnału.

Odpowiedź impulsowa pogłosu pomieszczenia

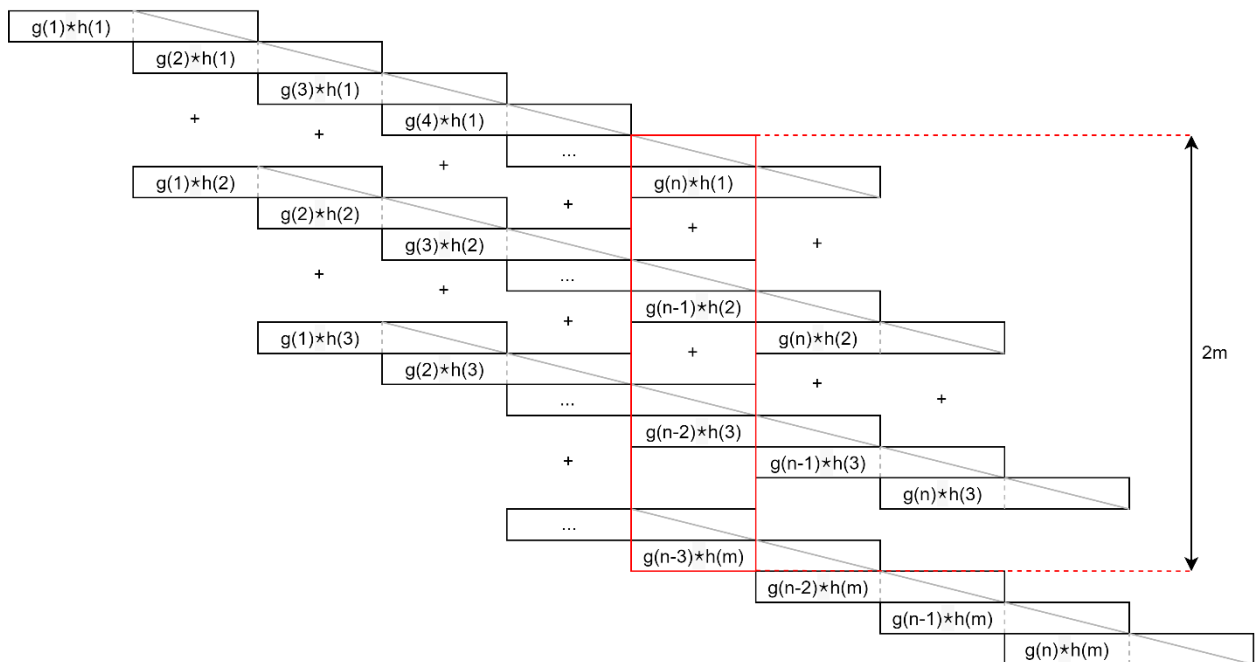


Splot jednego fragmentu sygnału z jednym fragmentem odpowiedzi impulsowej



Ilość sumowanych buforów wyjściowych (2m)

Overlap-add dla pogłosu o długości $L*m$



3. Pogłos cyfrowy

3.1. Metoda działania

Zasoby potrzebne do realizacji pogłosu przy pomocy splotu wymagają dużej pamięci. Możemy zatem wytworzyć pogłos sztucznie oszczędzając przy tym zasoby oferowane przez procesor. Cyfrowy pogłos powinien naśladować pogłos rzeczywisty. W tym celu należałoby zasymulować odbicia fali akustycznej od powierzchni pomieszczeń. Nie jest niestety możliwe odwzorowanie pogłosu pomieszczenia w stopniu idealnym, ze względu na nieskończenie dużą ilość odbić i nie dyskretny charakter kierunków rozchodzenia się fali akustycznej. Jednakże, aby osiągnąć zbliżone wrażenia psychoakustyczne, można zastosować uproszczenia w postaci kilku odbić.

4. Fizyczny prototyp

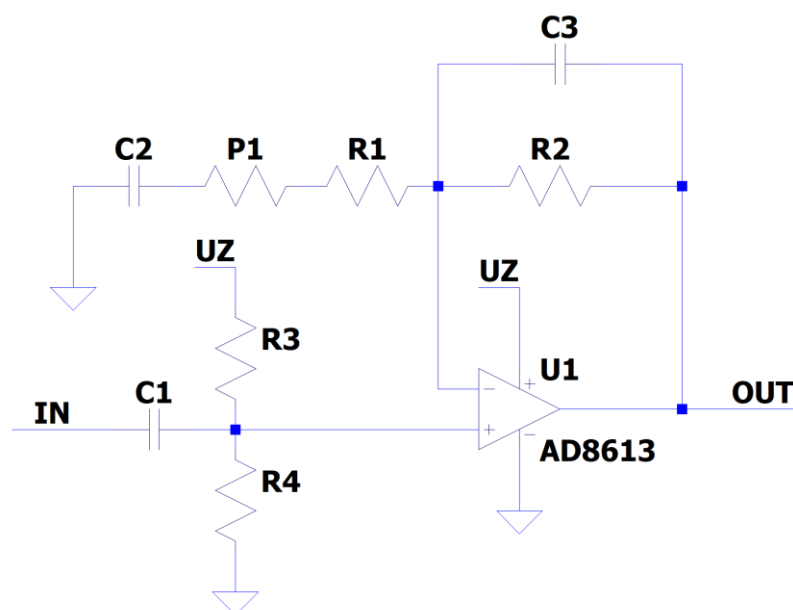
4.1.

5.2. Część cyfrowa

Do wykonania działającego prototypu wykorzystany został mikrokontroler Nucleo STM32 L476RG. Ograniczając ilość dodatkowych elementów do wykonania urządzenia, zastosowane zostały wbudowane w mikrokontroler przetworniki analogowo-cyfrowy (ADC) oraz cyfrowo-analogowy (DAC). Ich rozdzielczość wynosiła zaledwie 12 bitów, co jak na standardy audio wynoszące 24-bit znacząco ogranicza jakość dźwięku, jednakże na potrzeby projektu jest to wystarczające rozwiązanie. Aby jednak jakość dźwięku była jak najwyższa, amplituda sygnału wejściowego ADC powinna być zbliżona do maksymalnej amplitudy napięcia wejściowego obsługiwanego przez ten przetwornik. ADC i DAC działają w zakresie 0 – 3,3 V, zatem maksymalna amplituda napięcia wejściowego powinna wynosić:

$$\frac{\Delta V}{2} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} = \frac{3,3 - 0}{2} = 1,65 [V]$$

W celu dopasowania poziomów napięcia należało zaprojektować układ podnoszący składową stałą oraz odpowiednio wzmacniający sygnał wyjściowy. Wykonany on został z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego układzie nieodwracającym o niesymetrycznym zasilaniu. Schemat ideowy przedstawiony został na rysunku [].



Aby ustalić amplitudę wyjściową gitary, jej gniazdo zostało podłączone do oscyloskopu. Zmierzona amplituda była bliska 1 V_{pp}. Wymagane wzmocnienie powinno wynosić zatem:

$$k_u = \frac{A_{wy}}{A_{we}} = \frac{3,3}{1} = 3,3 \left[\frac{V}{V} \right]$$

Do wykonania układu wykorzystany został wzmacniacz operacyjny typu Rail-to-rail, z minimalnym drop outem. Istotną rzeczą podczas projektowania jest duża rezystancja wejściowa układu. Założona rezystancja wejściowa układu wynosić będzie $R_2 = 180 \text{ k}\Omega$. Napięcie na

rezystorze R_4 powinno wynosić połowę napięcia zasilania. Korzystając zatem z wzorów [] oraz [] można policzyć rezystancję R_3 oraz R_4 .

$$R_2 = R_3 || R_4$$

$$U_{R4} = U_Z \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \Rightarrow \frac{U_Z}{2} = U_Z \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \Rightarrow R_3 = R_4$$

$$R_3 = R_4 = 2 \cdot R_2 = 360 \text{ k}\Omega$$

Dobór rezystora R_1 jest ściśle powiązany ze wzmocnieniem układu. Aby zostawić sobie możliwość dopasowania wzmocnienia do układu został dołączony potencjometr P_1 . Aby ustalić wartość rezystancji R_1 do maksymalnego wzmocnienia, należy skorzystać ze wzoru [].

$$k_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{k_u - 1} = \frac{180 \cdot 10^3}{3,3 - 1} \approx 78 \text{ k}\Omega$$

Wybierając rezystor R_1 z szeregu E_{24} , rezystancja wyniesie $68 \text{ k}\Omega$. Zostawiony został dolny zapas w postaci mniejszej o $10 \text{ k}\Omega$ rezystancji oraz góry zapas w postaci potencjometru P_1 . Jego rezystancja wynosić będzie $100 \text{ k}\Omega$. Minimalne wzmocnienie wyniesie zatem $2,07 \frac{V}{V}$ (wzór []), a maksymalne $3,65 \frac{V}{V}$ (wzór []).

$$k_{umin} = 1 + \frac{R_2}{R_1 + P_1} = 1 + \frac{180 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} \approx 2,07 \left[\frac{V}{V} \right]$$

$$k_{umax} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{180 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3} \approx 3,65 \left[\frac{V}{V} \right]$$

Kondensator C_1 wykorzystujemy do odcięcia składowej stałej z sygnału, natomiast C_2 odcina pętlę sprzężenia zwrotnego od masy dla napięcia stałego. Dzięki takiemu zabiegowi wzmacniacz operacyjny dla napięcia stałego staje się wtórnikiem. Oba kondensatory stworzą filtry górnoprzepustowe, dlatego istotne jest odpowiednie dobranie ich wartości by nie wyciąć częstotliwości z zakresu słyszalnego. Częstotliwość dolna graniczna wyniesie zatem $f_d = 20 \text{ Hz}$. Do wyliczenia τ_2 wykorzystamy tylko rezystancję rezystora R_1 , ponieważ zwiększając rezystancję potencjometrem P_1 zwiększy się τ_2 , w wyniku czego zmaleje f_{d2} oraz f_d . Mniejsza częstotliwość dolna graniczna zadziała na korzyść układu

$$f_{d1} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_1}, \quad \tau_1 = C_1 \cdot R_3 || R_4$$

$$f_{d2} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_2}, \quad \tau_2 = C_2 \cdot R_1$$

$$f_d = \sqrt{f_{d1}^2 + f_{d2}^2}$$

Można przyjąć założenie, że $f_{d1} = f_{d2}$, zatem $f_d = \sqrt{2f_{d1}^2} \Rightarrow f_d = f_{d1} \cdot \sqrt{2}$

$$f_d = 20 \text{ Hz}$$

$$f_{d1} = f_{d2} = \frac{f_d}{\sqrt{2}} = \frac{20}{\sqrt{2}} \approx 14,1 \text{ Hz}$$

$$f_{d1} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_2} \Rightarrow C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot f_{d1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 180 \cdot 10^3 \cdot 14,1} \approx 63 \text{ [pF]}$$

$$f_{d2} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 \cdot R_1} \Rightarrow C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot f_{d2}} = \frac{1}{2\pi \cdot 68 \cdot 10^3 \cdot 14,1} \approx 166 \text{ [pF]}$$

Dobierając pojemności kondensatorów C_1 oraz C_2 wykorzystamy większe od wyliczonych wartości, liczby z szeregu E₂₄. Zatem $C_1 = 68 \text{ nF}$ oraz $C_2 = 180 \text{ nF}$. Teraz można sprawdzić częstotliwość graniczną.

$$f_{d1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 68 \cdot 10^{-9} \cdot 180 \cdot 10^3} = 13 \text{ [Hz]}$$

$$f_{d2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 \cdot R_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 180 \cdot 10^{-9} \cdot 68 \cdot 10^3} = 13 \text{ [Hz]}$$

$$f_d = \sqrt{f_{d1}^2 + f_{d2}^2} = \sqrt{13^2 + 13^2} \approx 18,4 \text{ [Hz]}$$

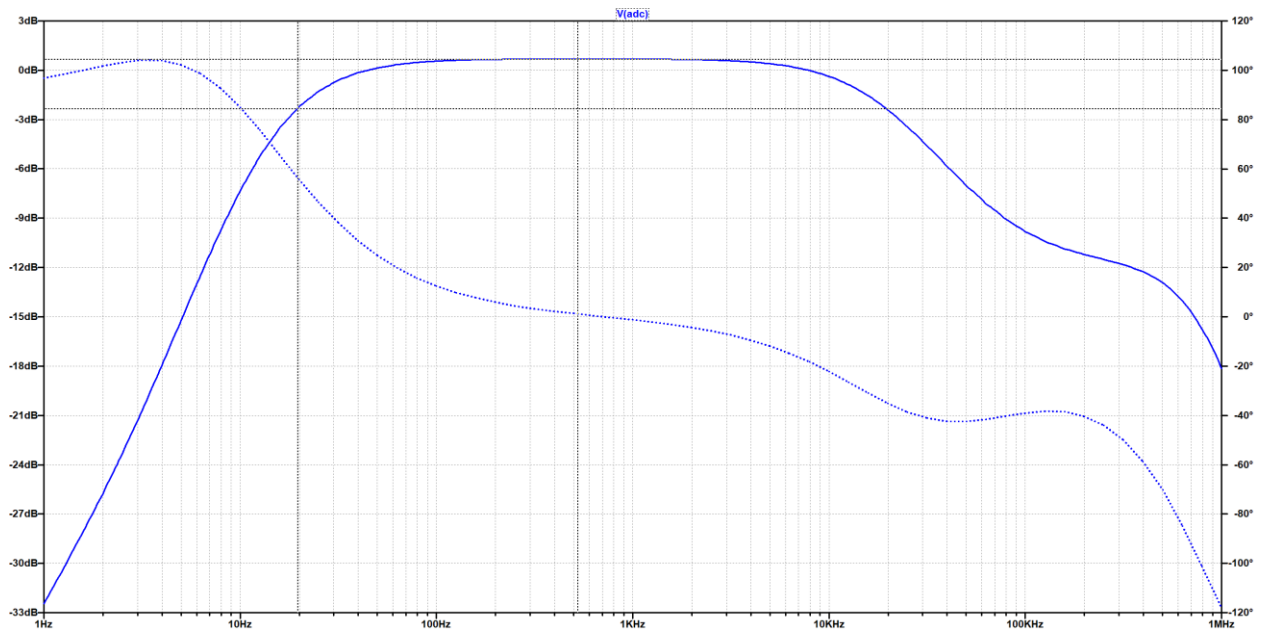
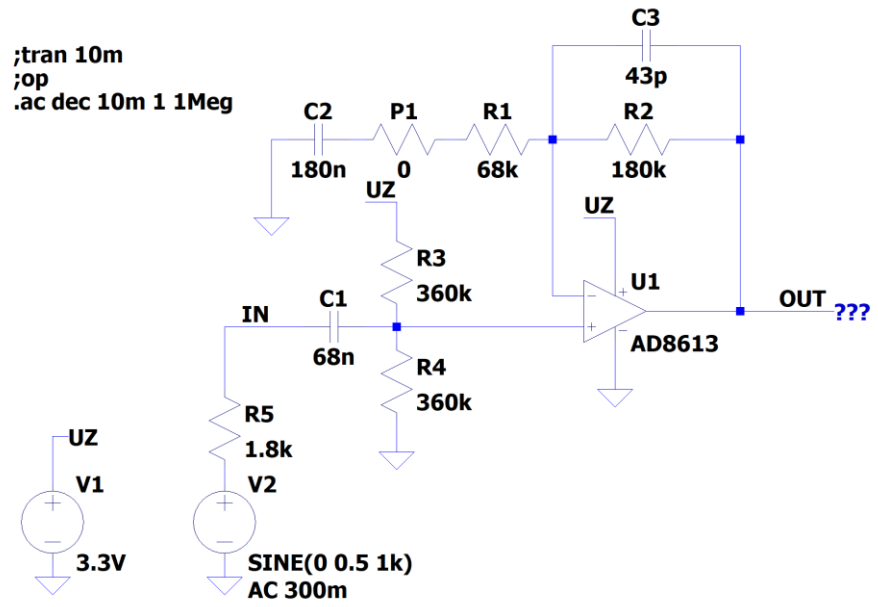
Aby uniknąć szumów wynikających ze wzmacniania częstotliwości powyżej zakresu słyszalnego należy zastosować filtr dolnoprzepustowy. Ograniczenie pasma wzmocnienia można uzyskać poprzez zastosowanie kondensatora C_3 o odpowiedniej pojemności. Pasma należy ograniczyć do częstotliwości granicznej górnej zakresu słyszalnego. Będzie to zatem $f_g = 20 \text{ kHz}$.

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_3}, \quad \tau_3 = C_3 \cdot R_2$$

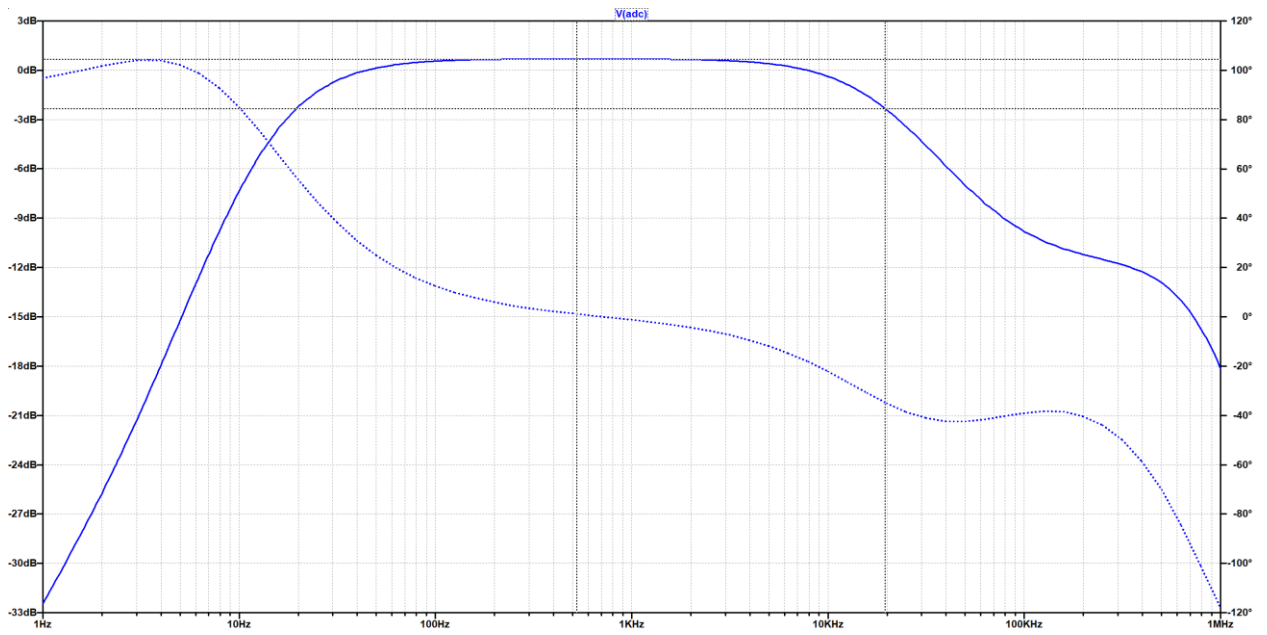
$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot C_3 \cdot R_2} \Rightarrow C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot f_g \cdot R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 180 \cdot 10^3} \approx 44 \text{ [pF]}$$

Wartość pojemności kondensatora C_3 należy dobrać z szeregu E₂₄ zaokrąglając w dół. Mniejsza pojemność zwiększy częstotliwość f_g , natomiast w tym przypadku margines błędu jest większy ze względu to, że zakres słyszalności dźwięku dla ludzkiego ucha bardzo rzadko osiąga częstotliwość zbliżoną do 20 kHz . Można zatem wybrać kondensator C_3 o pojemności 43 pF .

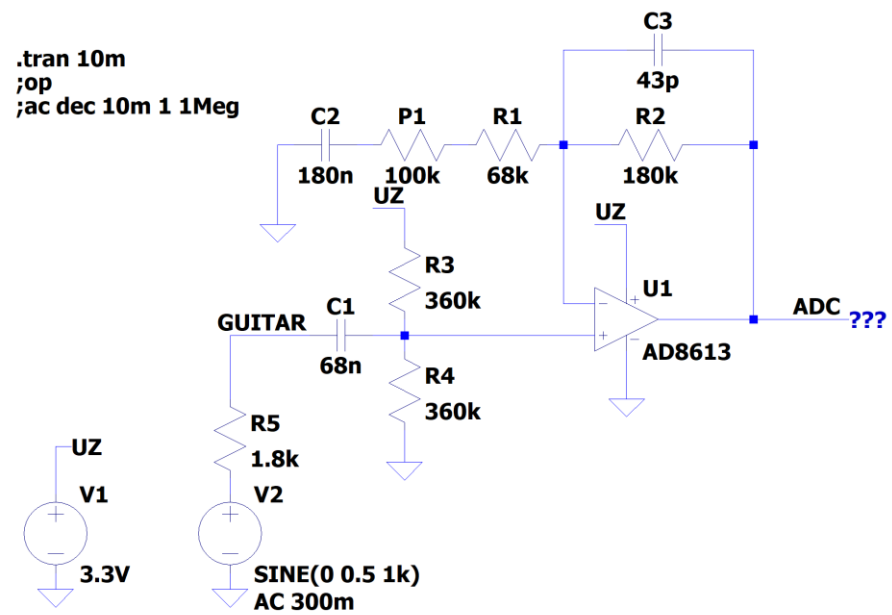
$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot C_3 \cdot R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 43 \cdot 10^{-12} \cdot 180 \cdot 10^3} \approx 20,6 \text{ [kHz]}$$

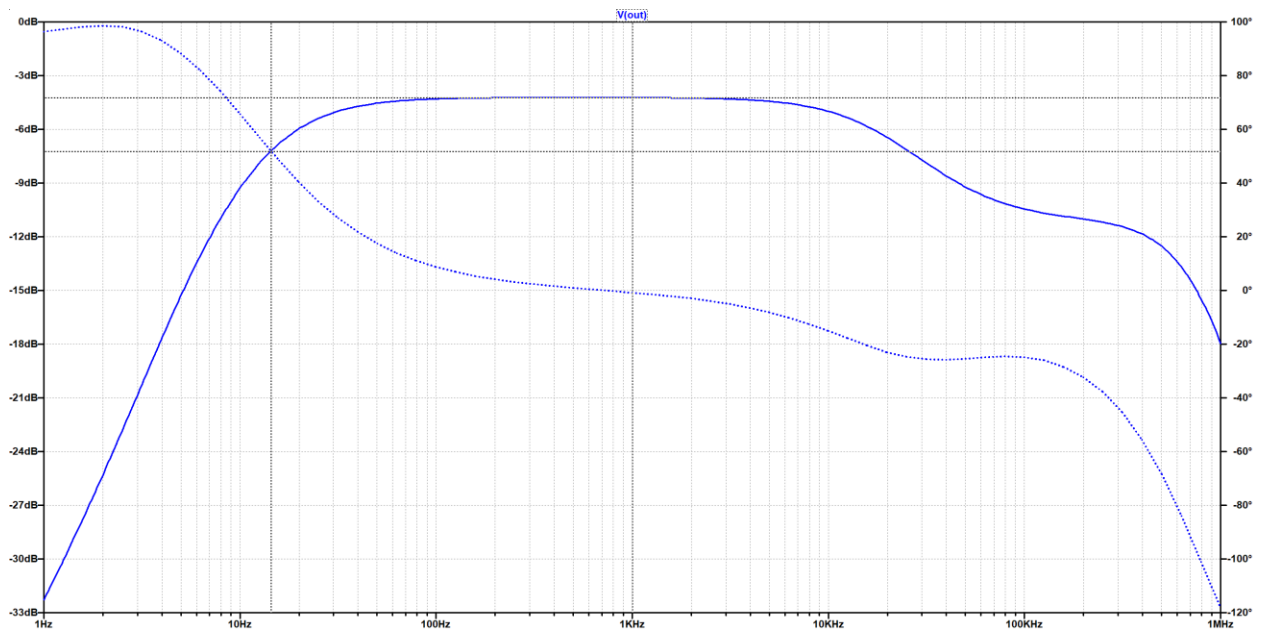


	Kursor 1	Kursor 2	Δ
f [Hz]	19,593688	523,20538	503,61169
V_{OUT} [dB]	-2,3230188	0,68787814m	3,0108969

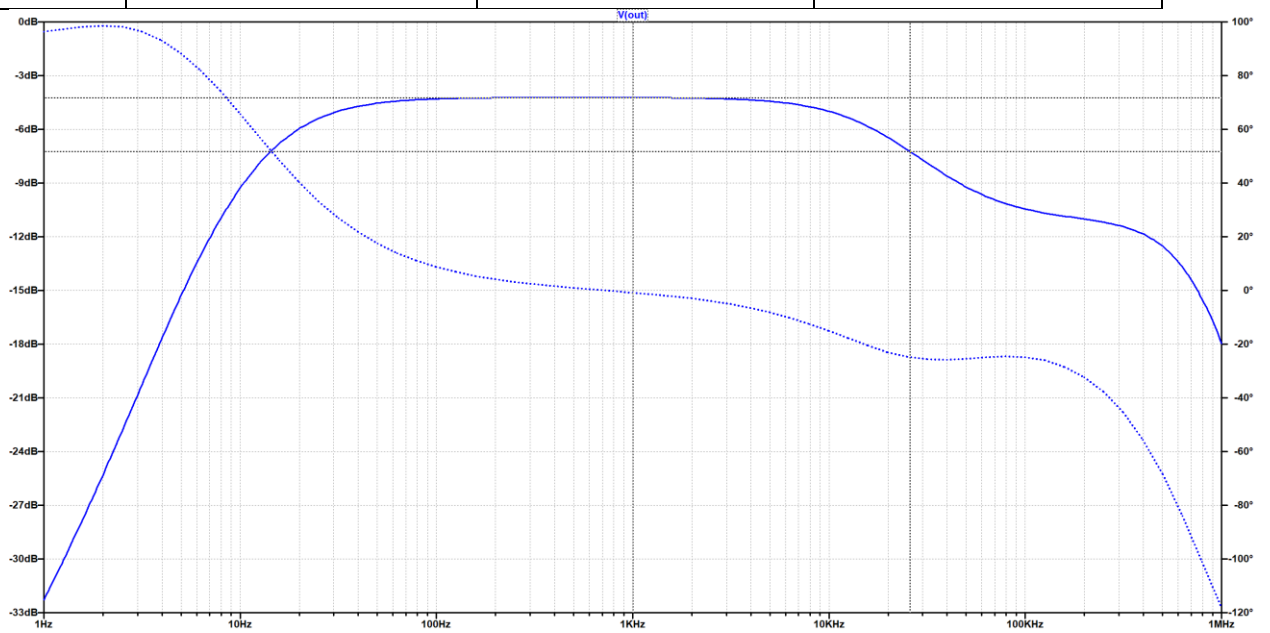


	Kursor 1	Kursor 2	Δ
f [Hz]	19481,687	523,20538	18,958481
V_{OUT} [dB]	-2,3248681	0,68787814	3,0127462





	Kursor 1	Kursor 2	Δ
f [Hz]	14,377267Hz	1000	985,62273
V_{OUT} [dB]	-7,2380058	-4,2277698dB	3,010236dB



	Kursor 1	Kursor 2	Δ
f [Hz]	25799,914	1000	24799,914
V_{OUT} [dB]	-7,2336009	-4,2277698	3,0058311

6. Bibliografia

- [1] Andrzej Góralski, *Gitara akustyczna*, GS Media, Poznań, 1996.
- [2] Rafał Demkowicz-Dobrzański, *Po co gitarze pudło rezonansowe*, Delta, 2003
- [3] Łuk muzyczny, Dostęp zdalny (05.05.2022): https://berimbaushop.com/wp-content/uploads/2019/10/IMG_20200501_160016-scaled.jpg
- [4] Małgorzata Przedpełska-Bieniek, *Dźwięk i instrumenty muzyczne. Nauka o instrumentach*, 2011
- [5] *Harfa jamowa*, Dostęp zdalny (05.05.2022): https://etnobazar.pl/pol_pl_HARFA-LEGA-SZTUKA-AFRYKANSKA-AFRYKA-15974_1.jpg
- [6] *Instrukcja obsługi gitary transakustycznej*, Dostęp zdalny: https://pl.yamaha.com/files/download/other_assets/0/818240/system70_om_en_vsz2861_b0r1.pdf
- [7] Bogdan Bogacz, *Badanie roli pudła rezonansowego za pomocą konsoli pomiarowej CoachLab II*, Foton, 2007
- [8] *Actuator w gitarze trans-akustycznej*, Dostęp zdalny (05.05.2022): <https://hub.yamaha.com/wp-content/uploads/2016/09/9-8TATechFeature.jpg>
- [9] *Actuator w gitarze trans-akustycznej*, Dostęp zdalny (05.05.2022): https://hub.yamaha.com/wp-content/uploads/2018/02/L-TA_actuator800.jpg
- [10] Krzysztof Niżnik, *Muzyka w przestrzeni akustycznie ekstremalnie aktywnej*, Audiosfera, 2016
- [11] Ignacy Malecki, *Teoria fal i układów akustycznych*, 1964
- [12] Marek Ochocki, *Fale akustyczne*, 2004

7. Spis rysunków

1.1. Łuk muzyczny. [3]	4
------------------------------	---