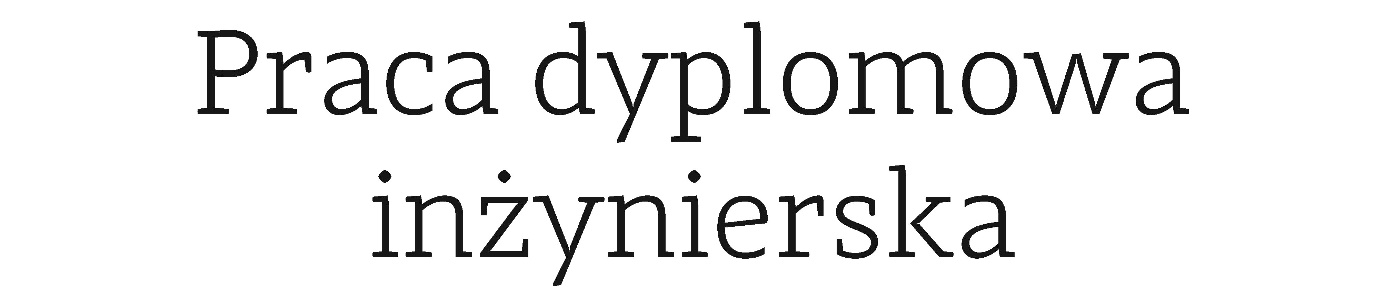


Instytut Systemów Elektronicznych



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

# Wstęp

## Pochodzenie gitary

Dzięki naturalnemu rozwojowi ludzkości i pojawieniu się potrzeby ekspresji emocjonalnej, ludzkość zaczęła tworzyć instrumenty, a za ich pomocą muzykę od najprostszych kilkudźwiękowych 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 środku ekspresji szacuje się na 7000 lat przed naszą erą [2].



Rysunek .. Łuk muzyczny [3].

Jednymi z najstarszych instrumentów znanych w historii są Środkowo Afrykańskie harfy jamowe, w których drgającym elementem był napięty giętki pręt. Wydobycie 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 jękliwym 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 .. Harfa jamowa [5].

## 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 wykonywanie 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 harmonicznych szarpiąc strunę w odpowiednim miejscu. Uderzenie w długości struny spowoduje usunięcie n-tej harmonicznej. Wartym 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.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (.) |

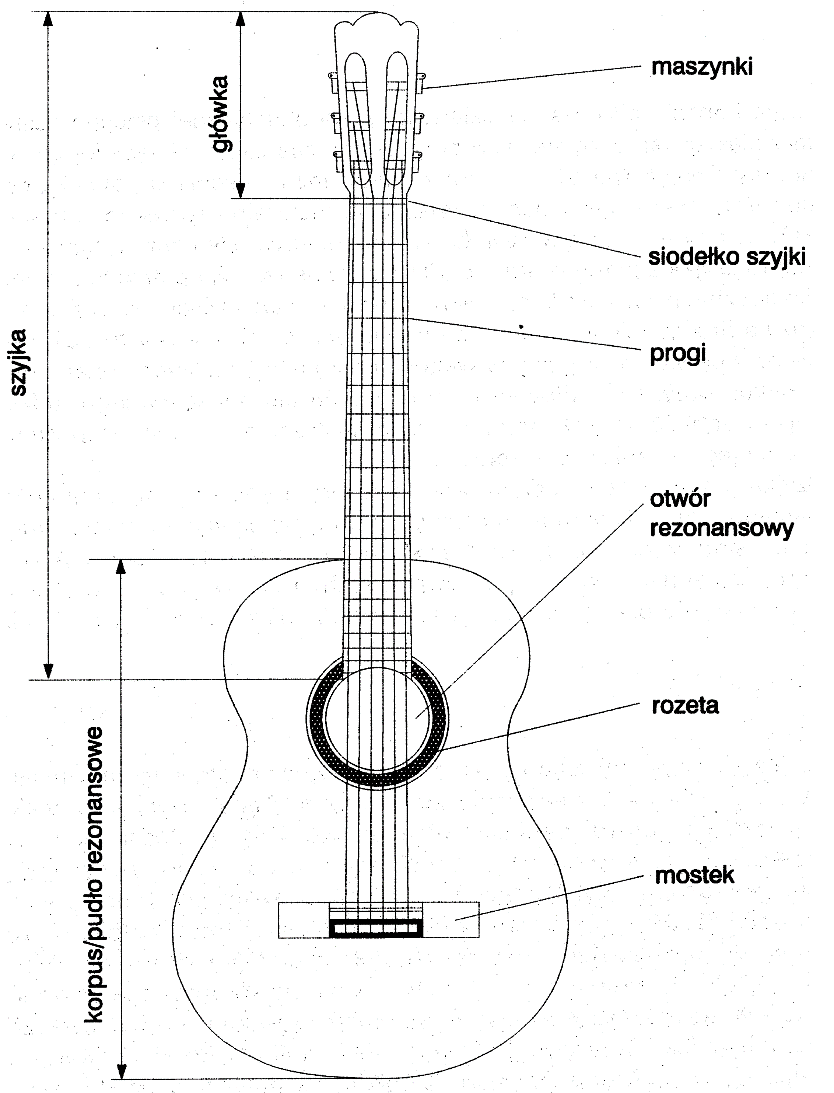
Gdzie:

17,817 – stała określająca teoretyczną proporcję rozstawu progów  
 – menzura instrumentu (czynna akcja strun od mostka do siodełka)  
 – numer poprzedniego progu  
 – odległość -tego progu od -go

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1.2) |

Gdzie:

***g*** = 981 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. Ta druga 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 harmonicznych, 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 szklistego brzmienia. Dodatkowo, szyjka gitary została odchudzona, a w jej wnętrzu pod podstrunnicą umieszony 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, kończąc na 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] .

## 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 odnosi wrażenie jakby był to naturalny dźwięk instrumentu [6].

|  |
| --- |
| Obraz zawierający muzyka, gitara, mandolina, materiały budowlane  Opis wygenerowany automatycznie |
| **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 dorowadziła do wysokich cen tych instrumentów. Najtańszy model Yamahy FS-TA na dzień 5 maja 2022 kosztuje 4350 złotych.

## Cel i założenia pracy

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

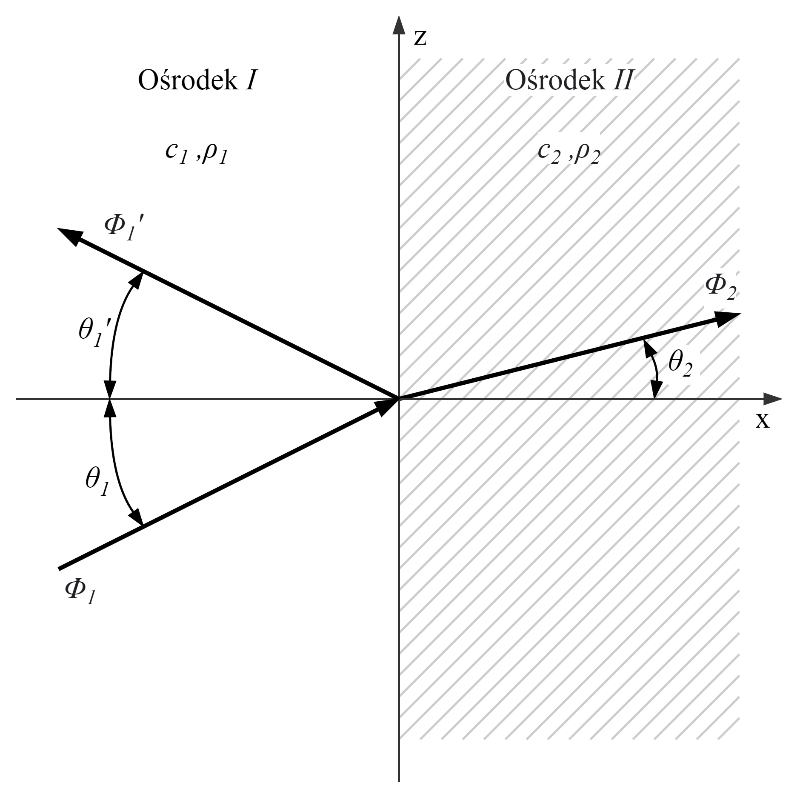
* gitara powinna symulować co najmniej jeden efekt dźwiękowy,
* przetworzony dźwięk powinien wydobywać się z pudła rezonansowego,
* jak najniższe koszty powinny być uwzględnione przy doborze komponentów,
* układ przetwarzania sygnału oraz zasilanie powinny umożliwić mobilne korzystanie z gitary.

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.

# 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 stają się przeszkodą na drodze fal akustycznych [10] . W momencie, gdy fala akustyczna trafia na granicę dwóch ośrodków może w zależności od impedancji ośrodków zostać odbita, częściowo odbita lub pochłonięta [11]. Warunki brzegowe w przypadku fali akustycznej padające na granicę dwóch ośrodków zgodne są ze wzorami (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) [12].



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.1) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.2) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.3) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.4) |

Gdzie:

– gęstość ośrodka  
 – wypadkowy potencjał akustyczny w ośrodku 1,  
 – wypadkowy potencjał akustyczny w ośrodku 2,  
 – kierunek prostopadły do granicy ośrodków,  
 – kąt padania fali na granicę dwóch ośrodków,  
 - kąt odbicia,  
 – kąt załamania,   
 – prędkość fazowa fali padającej  
 – prędkość fazowa fali załamanej

Pogłos jest sumą fali bezpośredniej oraz fal odbitych. Jako pierwsza do ucha dociera fala bezpośrednia ze względu na najmniejszą odległość potrzebną do przebycia przez falę dźwiękową od źródła dźwięku do słuchacza. Każde kolejne odbicie będzie potrzebowało coraz to dłużej drogi do przebycia i dłuższego czasu na dotarcie do odbiorcy. Taka właściwość pozwala na analizę pogłosu pod względem odległości każdego odbicia. Na przebiegu czasowym nagrania dźwięku wyemitowanego w tym samym pomieszczeniu, w którym znajduje się mikrofon możemy zauważyć piki będące kolejnymi odbiciami. Znając, odległość mikrofonu od balonu, prędkość dźwięku w powietrzu w temperaturze wynoszącą [13] oraz różnicę czasu między dźwiękiem bezpośrednim i interesującym nas pikiem możemy określić odległość przebytą przez falę dźwiękową. Znajomość parametrów takich jak; spadek ciśnienia akustycznego wraz ze wzrostem odległości, wzrost stosunku energii fali bezpośredniej do fal odbitych przy zmniejszeniu odległości, zwiększona ilość składowych o wysokiej częstotliwości przy zmniejszeniu odległości pozwala na skuteczną lokalizację obiektów znajdujących się w pomieszczeniu.

Obraz zawierający sylwetka, rozmycie, nocne niebo

Opis wygenerowany automatycznie

## Metody badania czasu pogłosu i odpowiedzi impulsowych pomieszczeń.

Badanie czasu trwania pogłosu polega na zmierzeniu czasu potrzebnego do spadku natężenia dźwięku od momentu zatrzymania jego emisji do momentu zmniejszenia do poziomu szumów tła. Niektóre źródła podają typowy spadek natężenia o 60 dB względem progu słyszalności [14], natomiast według normy PN-EN ISO 3382-2:2010 wartość czasu pogłosu wyznacza się metodą T30, czyli w 30 decybelowym spadku [16].

Badanie pogłosu pomieszczenia, a w szczególności jego czasu może być zrealizowane kilkoma metodami. Jedna z nich to metoda polegająca na subiektywnej ocenie długości odcinka czasu potrzebnego na wygaszenie dźwięku. W tym przypadku wykorzystywany jest stoper, którym mierzy się czas od usłyszenia dźwięku, aż do momentu spadku jego natężenia do poziomu szumów tła [15]. Metoda obarczona jest dużym błędem ze względu na czas reakcji potrzebny na odebranie bodźca dźwiękowego, przetworzeniu go przez mózg, włączenie stopera oraz ze względu na indywidualną ocenę konkretnego słuchacza [14].

Dużo lepszą metodą jest wykonanie nagrania dźwięku i jego analiza komputerowa. Nagranie dźwięku można zrealizować przy pomocy mikrofonu najlepiej o charakterystyce wszechkierunkowej, w celu zarejestrowania odbić z każdego kierunku. Analiza w programie typu MATLAB pozwoli na wykonanie wykresu czasowego w skali decybelowej co pozwoli określić graficznie długość wykresu lub metodą obliczeniową znaleźć odpowiedni punkt, w którym natężenie dźwięku spadnie do poziomu tła. Ponadto możliwe będzie wykonanie analizy częstotliwościowej takiego sygnału.

Bardzo istotną kwestią jest dobór źródła dźwięku, na podstawie którego badana będzie odpowiedź impulsowa pomieszczenia. Jako sygnał wejściowy można wykorzystać, szum przerywany, wystał z pistoletu lub przebijany balon, sinus zmieniający w czasie swoją częstotliwość. Według zaleceń międzynarodowej konferencji akustyków pomiar czasu pogłosu powinien być wykonany dla 125, 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz. W przypadku dźwięków ciągłych takich jak szumy, czas pogłosu mierzony jest od momentu przerwania emisji dźwięku z jego źródła [14]. Warto też, aby źródło dźwięku było wszechkierunkowe dla lepszego odwzorowania rzeczywistości w pomiarze pogłosu [16].

Metoda pomiarowa z wykorzystaniem wybuchów takich jak wystrzał z pistoletu, czy też przebicie balona wypełnionego powietrzem nie jest tak dokładna jak metoda wykorzystująca sinusa o przestawnej częstotliwości. Wystrzały zawierają drgania o szerokim zakresie częstotliwości [14]. Natomiast pomiary z wykorzystaniem szumu przerywanego bardzo dobrze nadają się zmierzenia czasu pogłosu, natomiast do wyznaczani odpowiedzi impulsowej pomieszczenia stosuje się metodę MLS [16].

Metoda MLS (*ang. Maximum Length Sequence)* polega na całkowaniu kwadratu odpowiedzi częstotliwościowej w wyniku czego otrzymana zostanie krzywa zaniku. Do wykonania tej metody za źródło powinien służyć krótki impuls, jak strzał z pistoletu czy przebijany balon, posiadający szeroki zakres widma. Źródło powinno być w stanie wytworzyć maksymalny poziom ciśnienia akustycznego większy o co najmniej 45 dB od poziomu szumów tła [16].

Co do rozmieszczenia źródeł dźwięku oraz mikrofonów istnieją trzy metody o różnej dokładności. Pierwsza z nich – metoda precyzyjna zakłada dwa położenia źródła dźwięku oraz 6 położeń dla każdego ustawienia źródła. Druga to metoda techniczna, w której źródło dźwięku ustawiane jest w dwóch pozycjach, a mikrofon ustawiany jest w trzech różnych miejscach dla każdego położenia źródła. Ostatnia z nich to metoda przybliżona zakładająca wykorzystanie jednego położenia źródła oraz dwóch położeń mikrofonu [16].

## Pomiar czasu pogłosu i odpowiedzi impulsowej pomieszczeń

Badanie pogłosów pomieszczeń odbywały się w budynku Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych (WEiTI) oraz w gmachu głównym Politechniki Warszawskiej. Celem badania było nagranie dźwięku i jego analiza pod względem długości pogłosu oraz odpowiedzi impulsowej pomieszczeń. Jako źródło dźwięku posłużył krótki impuls w postaci przekłuwanego balonu z powietrzem. Do rejestracji dźwięku ich przebicia wykorzystany został mikrofon pojemnościowy Novox NC-1 o charakterystyce kardioidalnej. Jego charakterystyka częstotliwościowa według zapewnień producenta oraz recenzji użytkowników jest płaska w większości zakresu co pozwoliło uzyskać dużą miarodajność. Badania jednak zostały wykonane przed wcześniejszym zapoznaniem się z literaturą związaną z metodologią ich poprawnego wykonania. Wyniki zatem nie były mniej miarodajne niż gdyby zostały przeprowadzone zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 3382-2:2010. Jednakże uzyskane z badań nagrania posłużyły jako źródło subiektywnego doboru parametrów pogłosu w projekcie pod względem długości trwania pogłosu oraz potencjalnego źródła pogłosu w realizacji efektu metodą splotową. Program wykorzystania do nagrania dźwięku to Audacity, którego łatwość obsługi, możliwości obróbki czasowej i nagrywania wielokanałowego pozwoliły na sprawną realizację nagrań. Czasowa i częstotliwościowa analiza nagrań wykonana została z pomocą autorskiego kodu napisanego w środowisku MATLAB.

Na początku pomiarów wykonano próbę kontrolną w warunkach bezpogłosowych. Posłużyła ona jako nagranie referencyjne do analizy nagranych wybuchów w pomieszczeniach. Nagranie użyte zostało w dalszej części projektu do ekstrakcji odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczeń. Miejscem badania był otwarty teren znajdujący się bezpośrednio przed budynkiem WEiTI. Otwartość terenu pozwoliła uniknąć pozwoliła uniknąć odbić fali akustycznej, co było kluczowym założeniem tego pomiaru. Podczas wykonywania próby kontrolnej balon znajdował się w odległości 3 m od mikrofonu w chwili przebijania. Wysokość balonu nad ziemią wynosiła  
1 m. Przebieg czasowy próby kontrolnej widoczny jest na wykresie (), natomiast jego charakterystyka widmowa na wykresie ().

2.1.2. Wykonanie pomiarów

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 umieszony 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 przebieg eksperymentu, ponieważ pomimo dużego rozmiaru Sali wykładowej pogłos był najkrótszy. Balon przebijany był w odległości 680 cm od mikrofonu.

# 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.

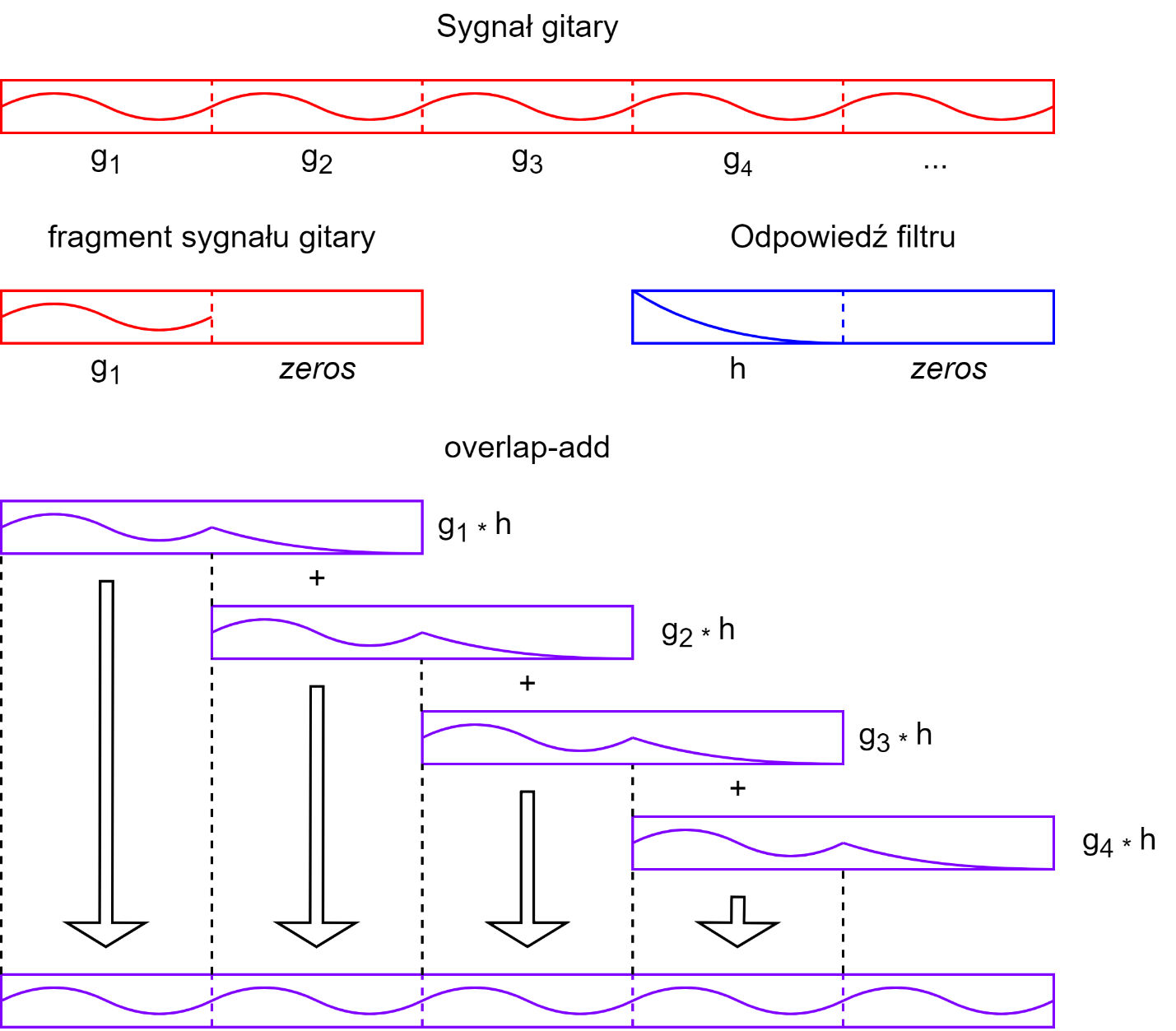
Ekstrakcja odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia wymaga posiadania nagranej próbki kontrolnej z krótkim impulsem o jak najszerszym widmie w warunkach bezpogłosowych oraz drugie nagranie wykonane w pomieszczeniu, z którego wyekstrahowany zostanie pogłos, przy użyciu tego samego sygnału. W tym celu 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 – widmo przebijanego balonu w pomieszczeniu, z którego ekstrahowany jest pogłos, – widmo próbki kontrolnej oraz – widmo odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia. W dziedzinie częstotliwości operacja odwrotna do splotu będzie dzieleniem. Nie można jednak podzielić widm przez siebie posiada wartości ujemne oraz zerowe. Aby prawidłowo wykonać obliczenia należy licznik i mianownik pomnożyć przez , dzięki czemu pozbędziemy się wartości ujemnych z mianownika. Pozostają jeszcze zera w mianowniku, które można wyeliminować dodając pewną stałą . Stosując się do tych założeń otrzymujemy widmo odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia.

Posiadając odpowiedź impulsową pogłosu pomieszczenia możemy wykonać splot 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 próbek. Problematyczna może okazać się złożoność obliczeniowa procesu splotu bezpośredniego sygnału i odpowiedzi impulsowej. Do wykonania splotu trwającego sekundę sygnału, czyli próbek metodą bezpośrednią potrzebne będzie mnożeń rzeczywistych oraz dodawań rzeczywistych. Według tabeli […] wykonanie takiego zadania zajęłoby to 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.

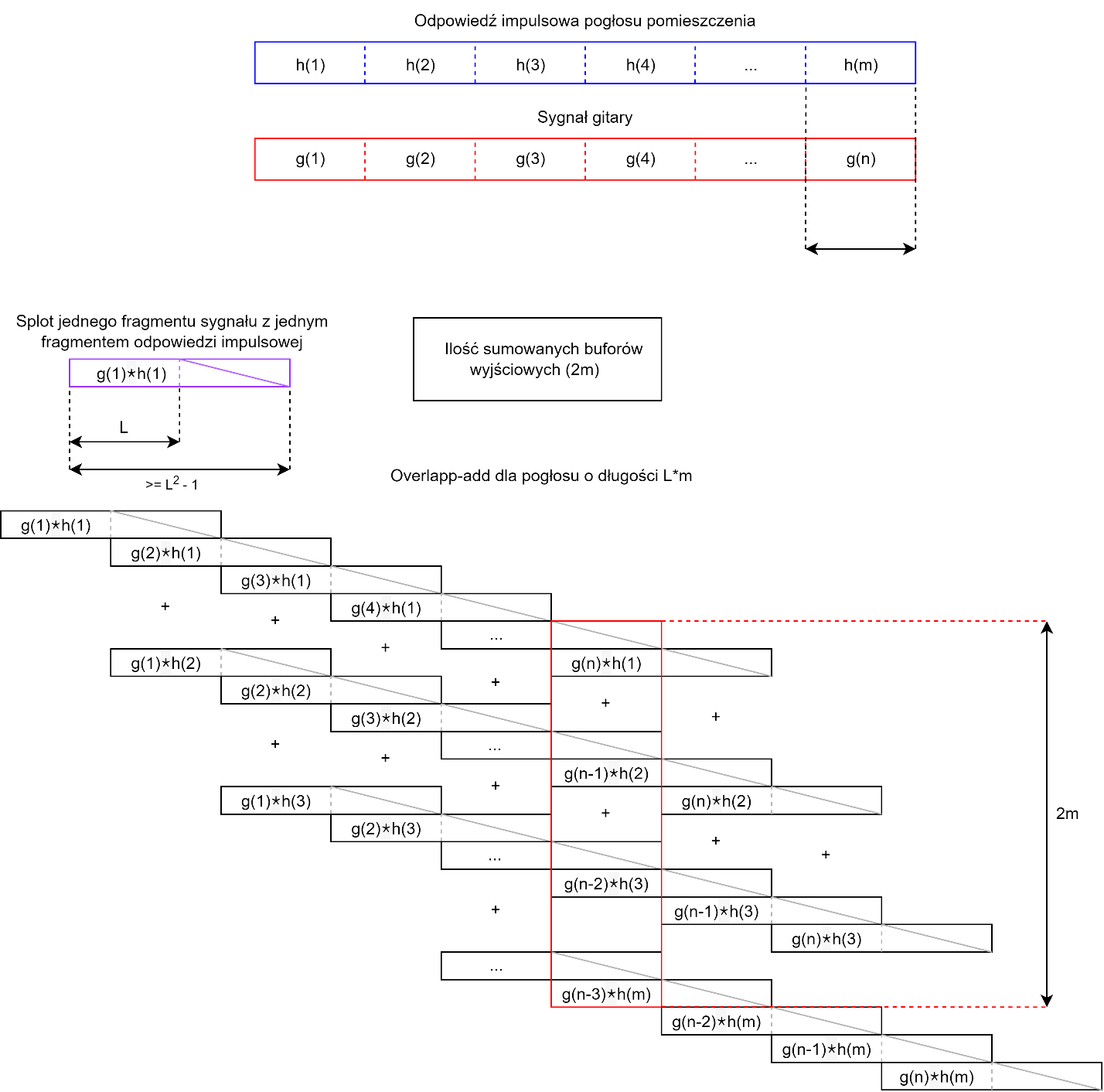
Aby ograniczyć zużycie procesowa można zastosować jeden z algorytmów sekcjonowanego szybkiego splotu sygnałów dyskretnych tj. *Overlap-add*. Pierwszy krok algorytmu to podzielenie sygnału wejściowego na fragmenty o długości i operowaniu na skończonym buforze składającym się z próbek. Konieczne jest uzupełnienie zerami odpowiedzi impulsowej oraz bufora sygnału wejściowego do długości , 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 splot 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 | Dzielnie | 14 |
| VCVT.F32 | Konwersja do/z liczby stałoprzecinkowej | 1 |
| VSQRT.F32 | Pierwiastek kwadratowy | 14 |



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

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



# Pogłos cyfrowy

## Metoda działania

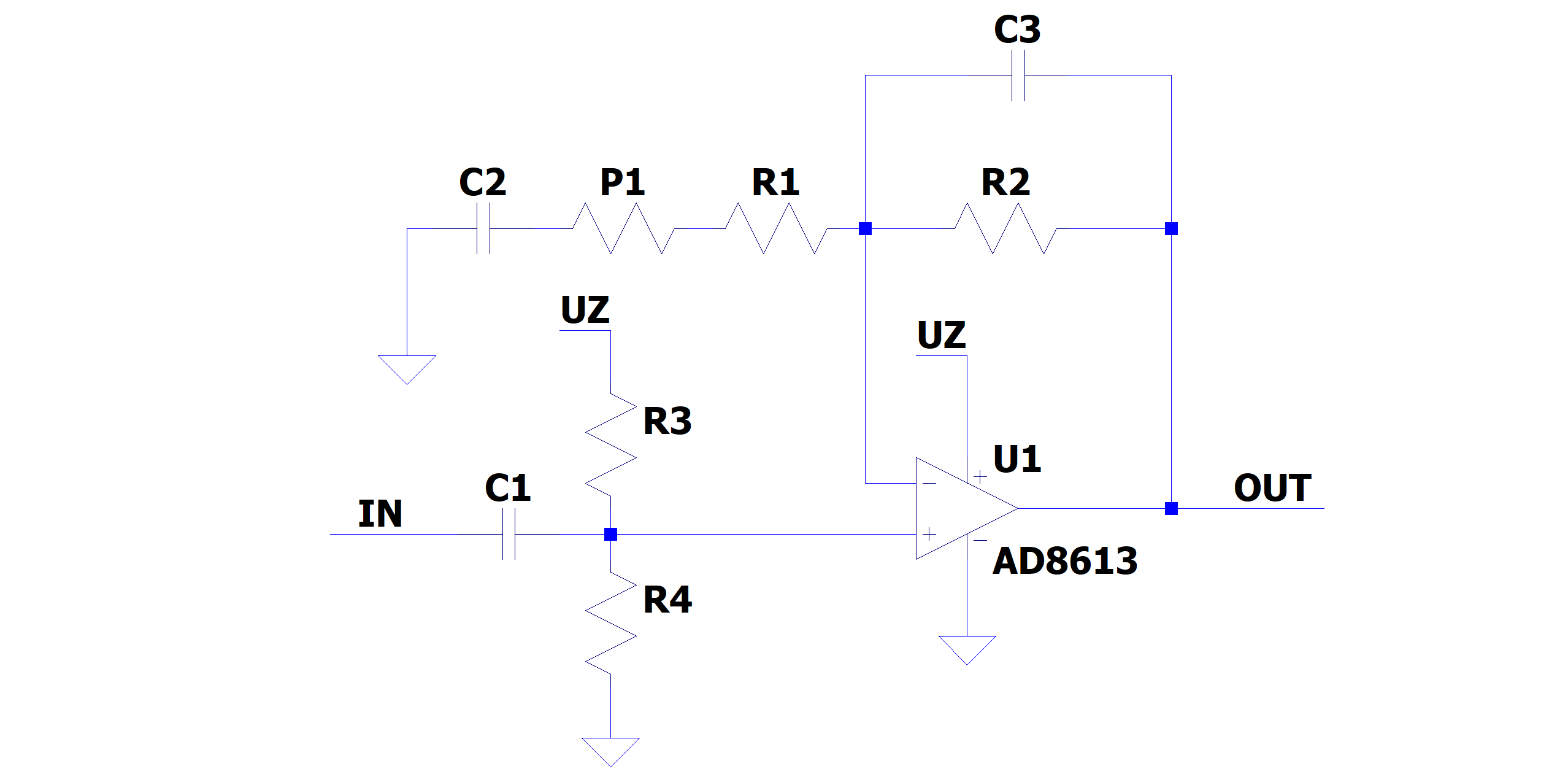
Zasoby potrzebne do realizacji pogłosu przy pomocy splotu wymagają dużej pamięci. Możemy zatem wytworzyć pogłos sztucznie oszczędzając przy tym zasoby oferowane przez procesor. Cyfrowy pogłos powinien naśladować pogłos rzeczywisty. W tym celu należałoby zasymulować odbicia fali akustycznej od powierzchni 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 psycho-akustyczne, można zastosować uproszczenia w postaci kilku odbić.

# Fizyczny prototyp

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:

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 przestawiony został na rysunku [ ].



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

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

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

Wybierając rezystor z szeregu , rezystancja wyniesie 68 . Zostawiony został dolny zapas w postaci mniejszej o rezystancji oraz góry zapas w postaci potencjometru . Jego rezystancja wynosić będzie . Minimalne wzmocnienie wyniesie zatem (wzór [ ]), a maksymalne (wzór [ ]).

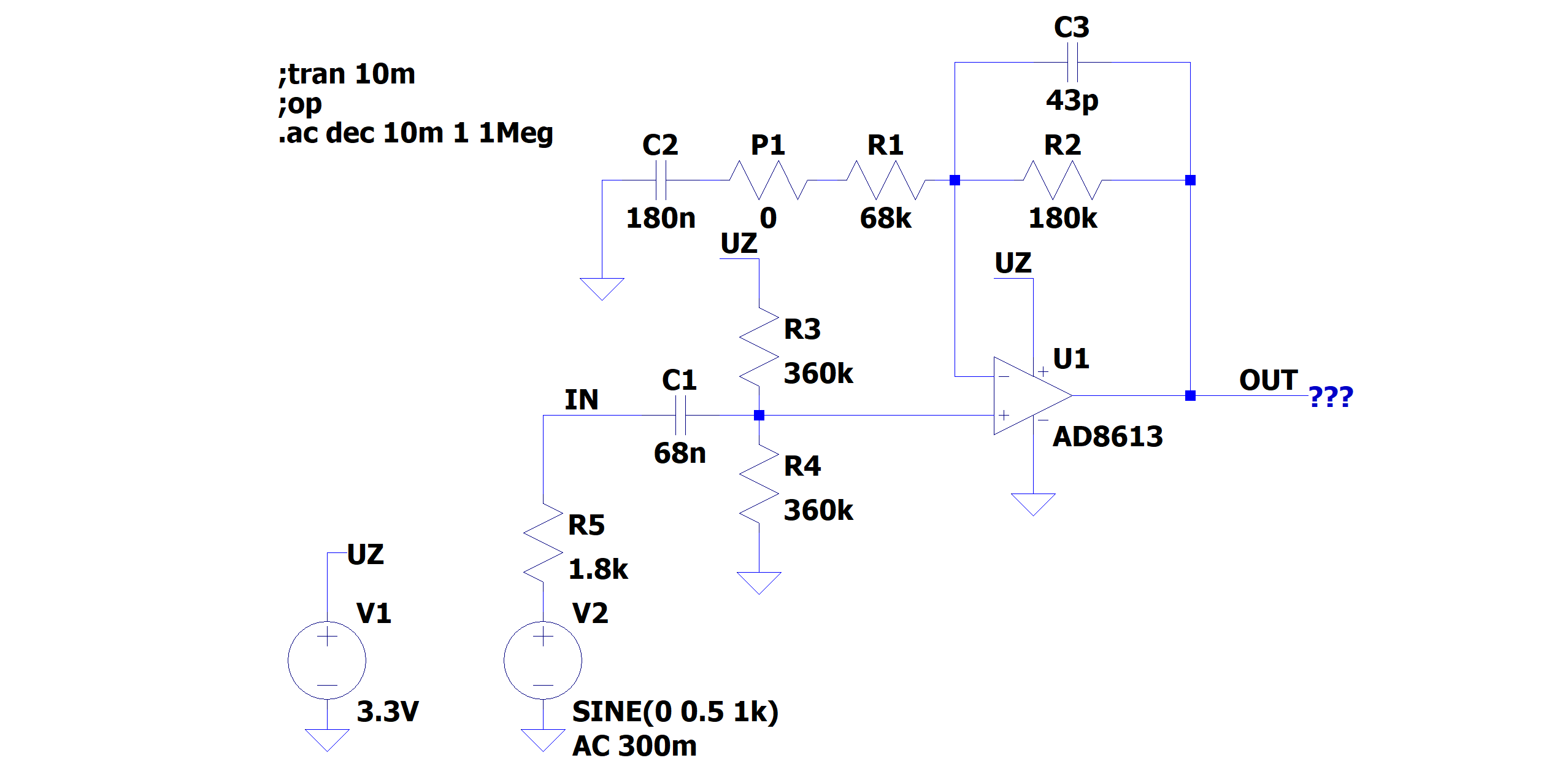
Kondensator wykorzystujemy do odcięcia składowej stałej z sygnału, natomiast odcina pętlę sprzężenia zwrotnego od masy dla napięcia stałego. Dzięki takiemu zabiegowi wzmacniacz operacyjny dla napięcia stałego staje się wtórnikiem. Oba kondensatory stworzą filtry górnoprzepustowe, dlatego istotne jest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

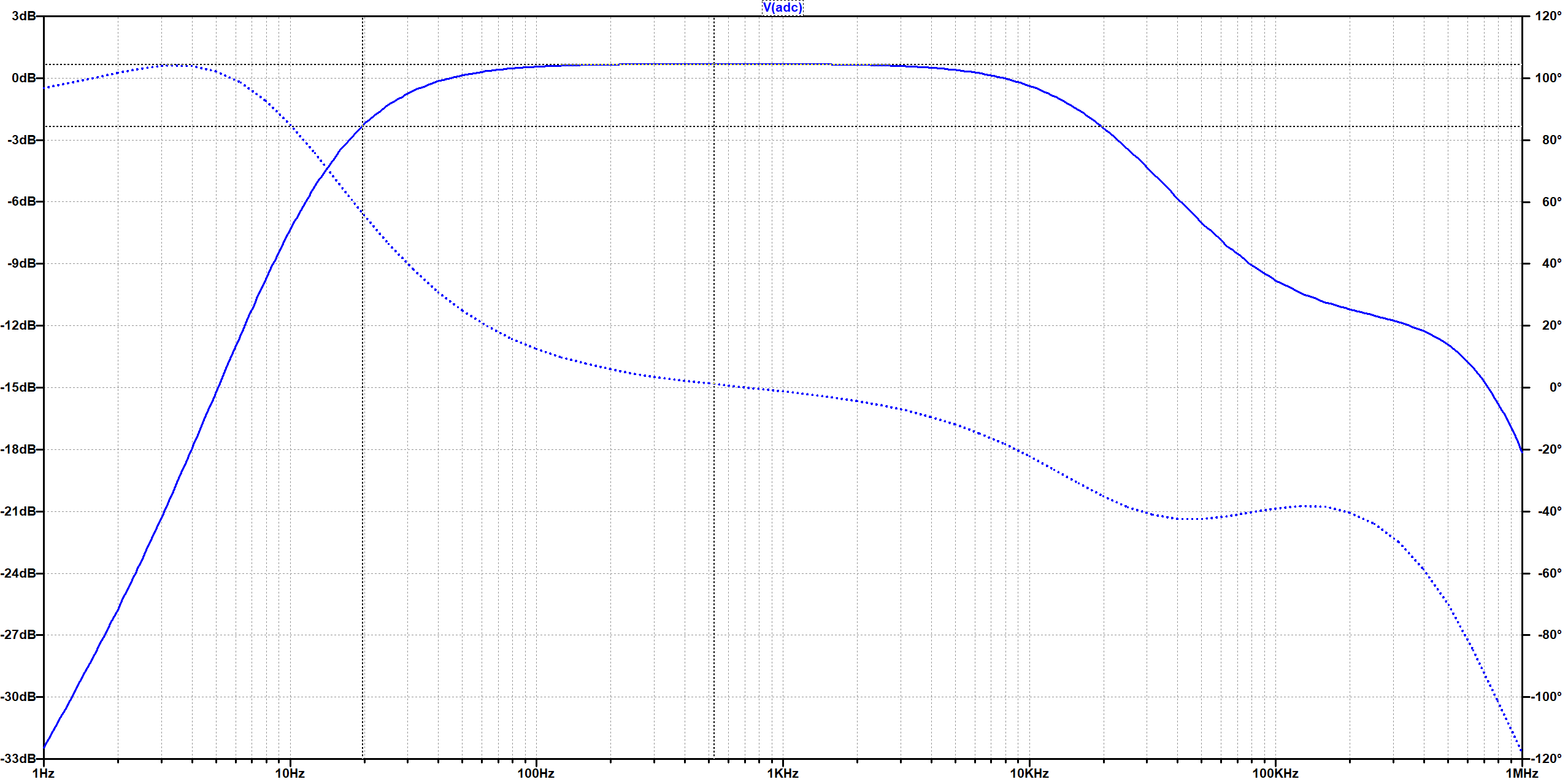
Można przyjąć założenie, że , zatem

Dobierając pojemności kondensatorów oraz wykorzystamy większe od wyliczonych wartości, liczby z szeregu E24­. Zatem oraz . Teraz można sprawdzić częstotliwość graniczą.

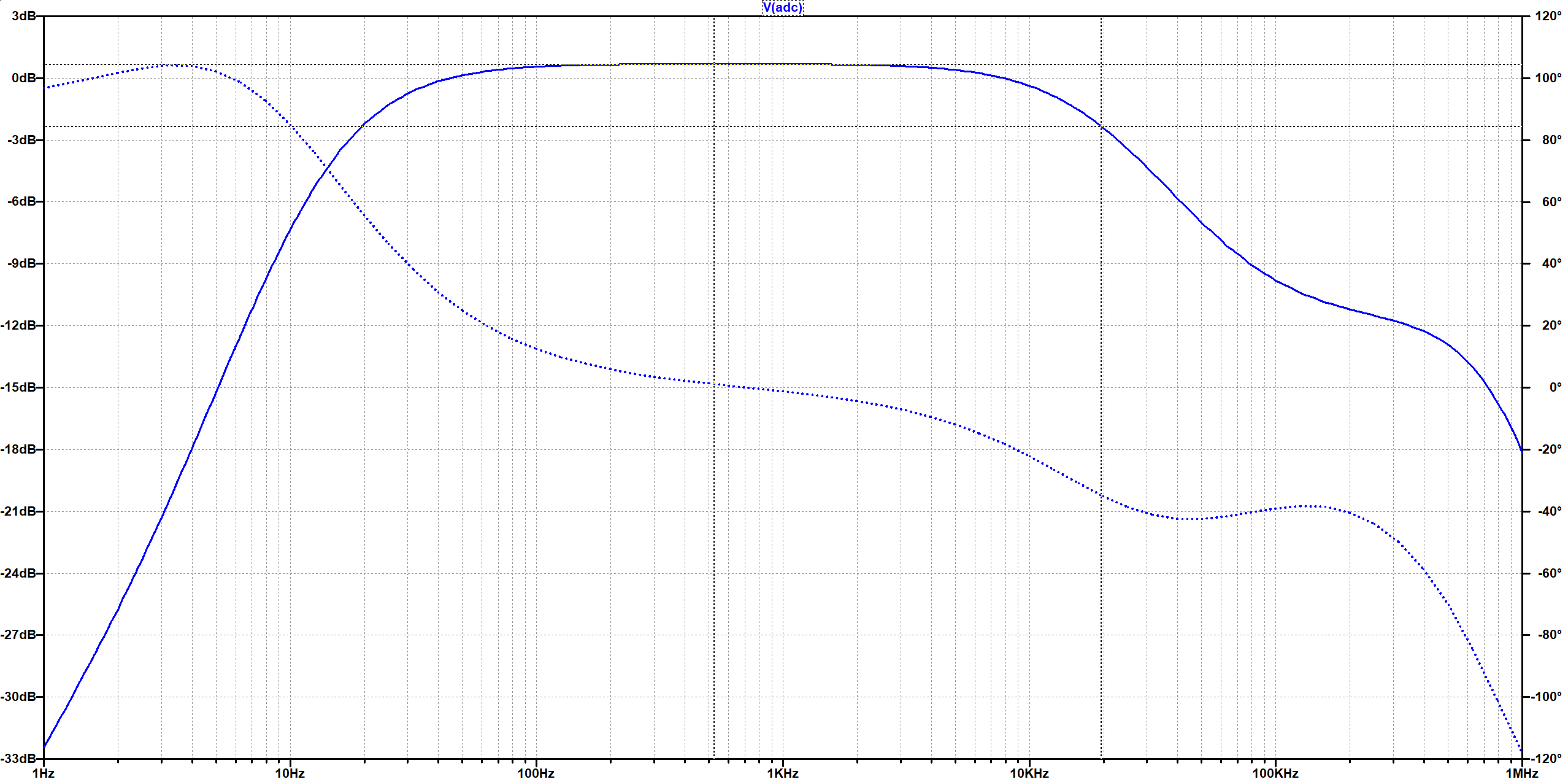
Aby uniknąć szumów wynikających ze wzmacniania częstotliwości powyżej zakresy słyszalnego należy zastosować filtr dolnoprzepustowy. Ograniczenie pasma wzmocnienia można uzyskać poprzez zastosowanie kondensatora o odpowiedniej pojemności. Pasmo należy ograniczyć do częstotliwości granicznej górnej zakresu słyszalnego. Będzie to zatem   
.

Wartość pojemności kondensatora C3 należy dobrać z szeregu E­24 zaokrąglając w dół. Mniejsza pojemność zwiększy częstotliwość , natomiast w tym przypadku margines błędu jest większy ze względu to, że zakres słyszalności dźwięku dla ludzkiego ucha bardzo rzadko osiąga częstotliwość zbliżoną do . Można zatem wybrać kondensator o pojemności .

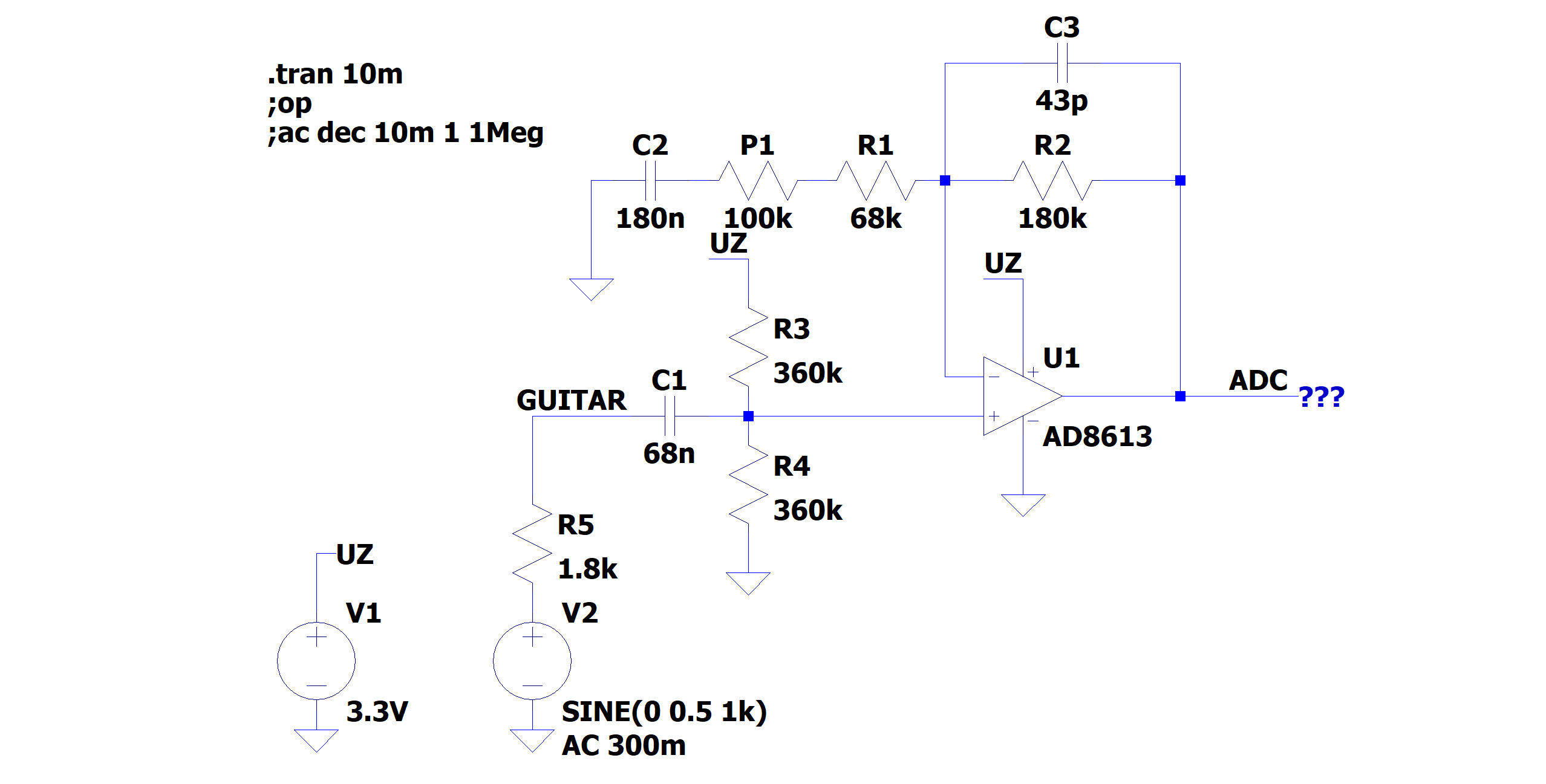


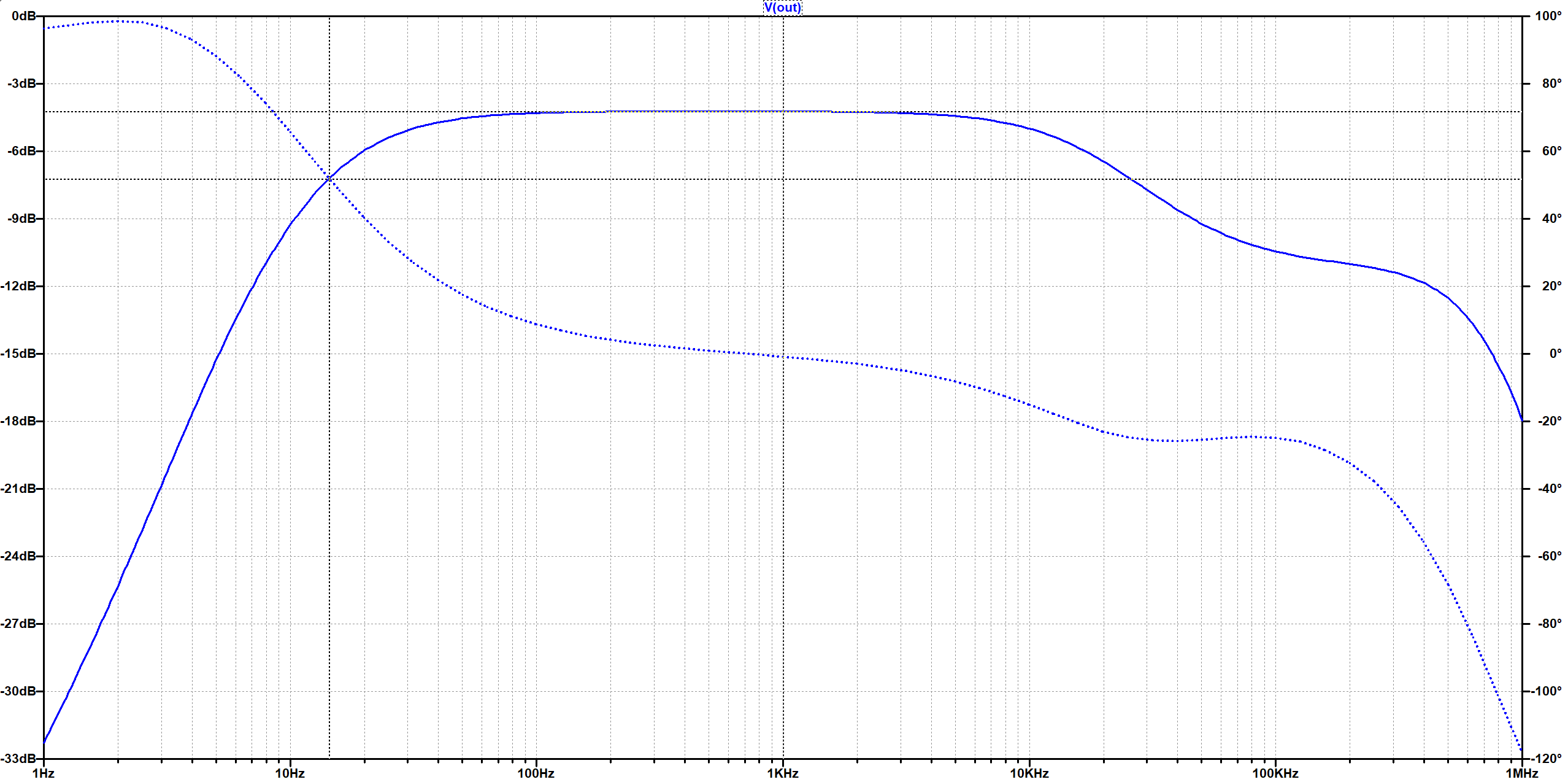


|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Kursor 1 | Kursor 2 |  |
|  | 19,593688 | 523,20538 | 503,61169 |
|  | -2,3230188 | 0,68787814m | 3,0108969 |

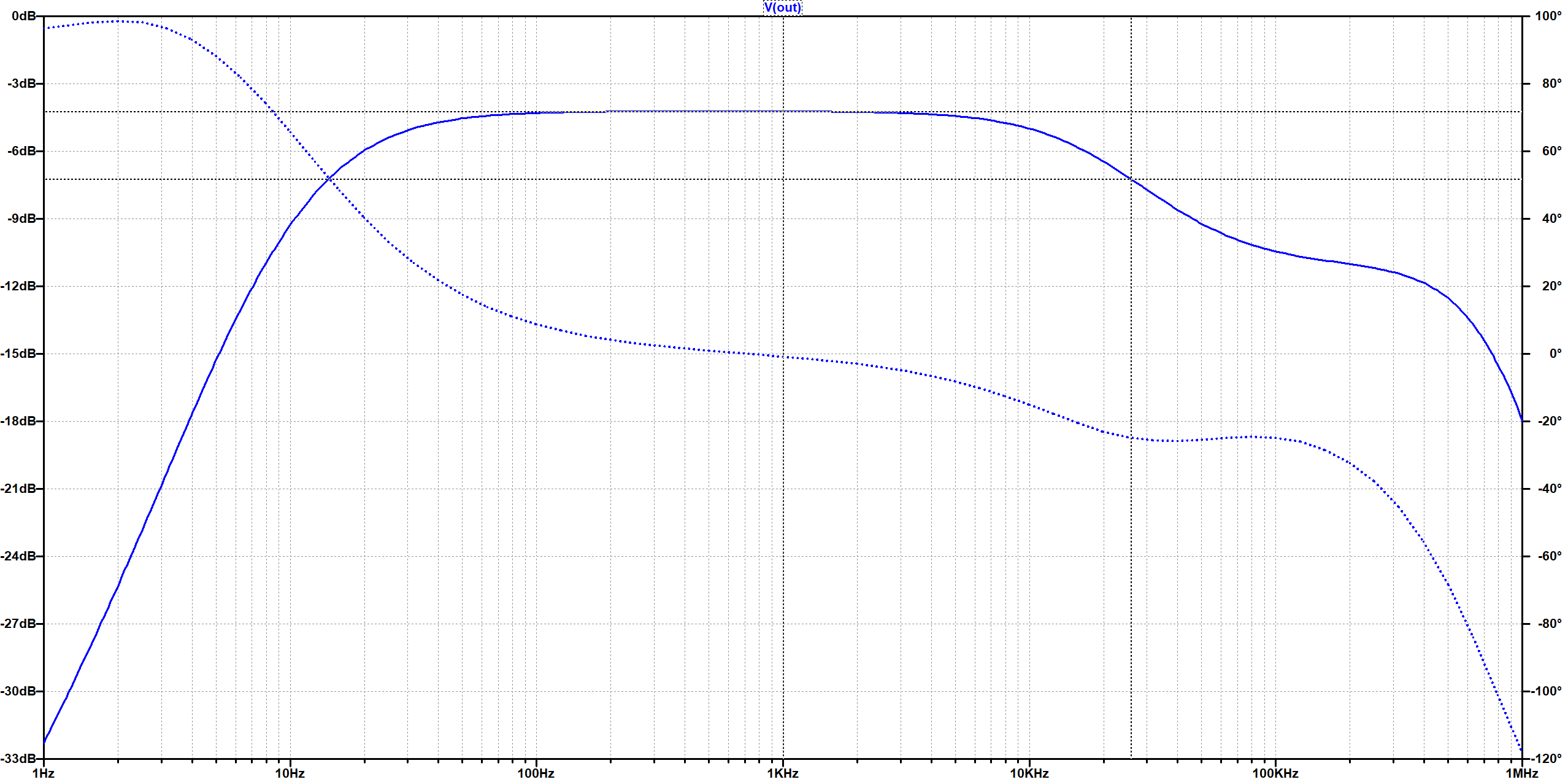


|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Kursor 1 | Kursor 2 |  |
|  | 19481,687 | 523,20538 | 18,958481 |
|  | -2,3248681 | 0,68787814 | 3,0127462 |





|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Kursor 1 | Kursor 2 |  |
|  | 14,377267Hz | 1000 | 985,62273 |
|  | -7,2380058 | -4,2277698dB | 3,010236dB |



|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Kursor 1 | Kursor 2 |  |
|  | 25799,914 | 1000 | 24799,914 |
|  | -7,2336009 | -4,2277698 | 3,0058311 |

# Bibliografia

1. Andrzej Góralski, *Gitara akustyczna,* GS Media, Poznań, 1996.
2. Rafał Demkowicz-Dobrzański, *Po co gitarze pudlo 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_vez2861_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
13. Stanisław Golachowski, Mieczysław Drobner, *Akustyka muzyczna*, Polskie Wydawnictwo Muzyczne, Kraków 1953
14. Jerzy Sadowski, Lech Wodziński, *Akustyka Pomieszczeń*, Warszawa, 1959
15. Paweł Tomczyk, *Zastosowanie metod mls i swept sine do pomiarów akustycznych w warunkach wysokiego tła akustycznego*, Prace Instytutu Techniki Budowlanej - Kwartlanik nr 4 (156) 2010
16. Witold Mikulski, Izabela Warmiak, *Parametry i metody ich pomiaru charakteryzujące propagację dźwięku i warunki akustyczne w pomieszczeniach do pracy wymagającej koncentracji uwagi*, 2015

# Spis rysunków

[1.1. Łuk muzyczny. [3] 4](#_Toc102659720)