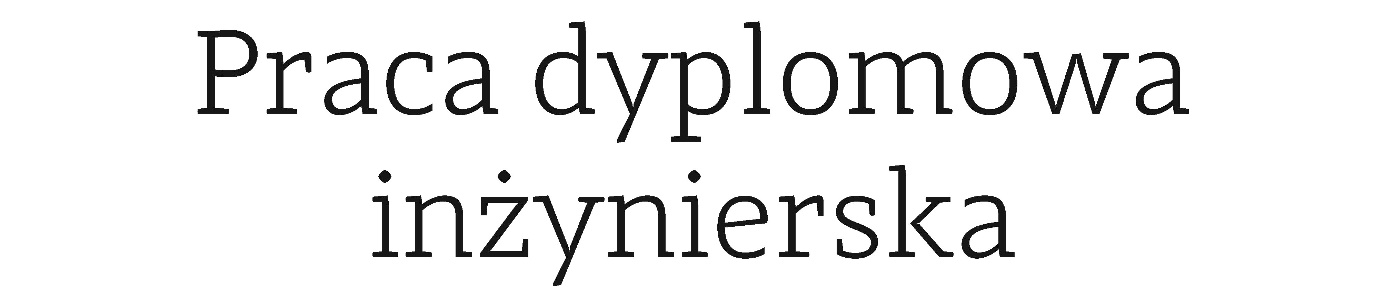


Instytut Systemów Elektronicznych



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

1. **Wstęp**
   1. **Historia gitary**

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. Pierwowzorem chordofonów szarpanych w czasach prehistorycznych była występująca w Afryce Środkowej harfa jamowa, w których drgającym elementem był napięty giętki pręt. Wydobycie dźwięku odbywało się poprzez szarpanie. 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*. W podobnym czasie stworzono również cytrę jamową. Jednym z pierwszych instrumentów był również myśliwski łuk. Wykorzystanie go jako instrumentu znane było głównie w niektórych plemionach Afryki. W czasach starożytności stworzono natomiast pierwszą harfę, która początkowo była łukiem z kilkoma cięciwami. Łuk ten trzymano blisko ust grającego, które pełniły funkcję rezonatora. Dzisiaj w głównej mierze mamy styczność z gitarami, których pierwowzorem jest prawdopodobnie powstała 5000 lat temu na bliskim wschodzie cithara.

Dzięki wielu udoskonaleniom powstałym na przestrzeni lat, takim jak; zwiększenie ilości progów, strun i rozmiaru pudła rezonansowego, dzisiejsza gitara jest instrumentem kompletnym, uniwersalnym. Pomimo malejących trendów związanych z muzyką odgrywaną na instrumentach strunowych na rzecz muzyki elektronicznej, na rynku muzycznym możemy znaleźć tysiące gitar o różnych kształtach i właściwościach. Mowa tu między innymi o gitarach 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. Niezwykłość tych gitar polega na ich możliwościach brzmieniowych wynikających z połączenia akustycznych właściwości instrumentu oraz wykorzystaniu efektów do uwydatnienia jej brzmienia.

* 1. **Gitara trans-akustyczna**
     1. **Właściwości akustyczne**

Gitara trans-akustyczna ma konstrukcję bardzo podobną do gitary elektro-akustycznej. Posiada ona pudło rezonansowe o kształcie zwyczajnej gitary akustycznej. Jednakowa jest również ilość strun. Ich grubość, długość oraz naprężenie odpowiadają za wrażenie wysokości dźwięku. Częstotliwość podstawowa jest zależna od materiału, z którego struna została wykonana,  
jej przekroju, długości oraz napięcia:

,

gdzie ***g*** = 981 cm, ***s*** – długość struny, ***r*** – promień w przekroju [cm], ***P*** – napięcie w gramach,  
***d*** – gęstość materiału.

Z powyższej 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 harmoniczne szarpiąc strunę w odpowiednim miejscu. Uderzenie w długości struny spowoduje usunięcie n-tej harmonicznej.

Istotnym elementem akustycznej drogi dźwiękowej jest pudło rezonansowe. Dzięki obecności pudła energia kinetyczna jest szybciej odbierana ze struny, a co za tym idzie, w ciągu jednostki czasu zwiększona jest ilość emitowanej energii. W wyniku tego, drgania trwają krócej, ale głośność instrumentu znacząco wzrasta. Pudło zazwyczaj wykonane jest 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.

Równie istotnym 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.

* + 1. **Technologia w gitarze**

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 przedwzmacniacza wbudowanego w gitarę, dostarczając sygnał na wyjście liniowe. Takie rozwiązanie pozwala na łatwe nagłośnienie instrumentu z wykorzystaniem miksera bez dodatkowego wzmocnienia. W gitarze trans-akustycznej również umieszczony jest przetwornik piezoelektryczny i przedwzmacniacz, 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. System ten zasilany jest dwiema bateriami – AA 1,5 V, dzięki czemu korzystanie z instrumentu nie wymaga dodatkowego zasilania. 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.

1. **Efekt pogłosu**
   1. **Badanie pogłosu pomieszczeń.**

Efekt pogłosu powstaje podczas różnicy w czasie docierania do ludzkiego ucha fali dźwiękowej bezpośrednio z jego źródła oraz fal odbitych od powierzchni docierających z opóźnieniem. Do jego uzyskania w warunkach naturalnych potrzebne są powierzchnie, które w wysokim stopniu odbijają fale akustyczne, np. twarde ściany i podłogi.

**2.1.1. Metoda badania**

Do zbadania pogłosów pomieszczeń potrzebne były krótkie impulsy dźwiękowe. Do tych celów wykorzystać można np. szum przerywanylub 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 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.

1. **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.

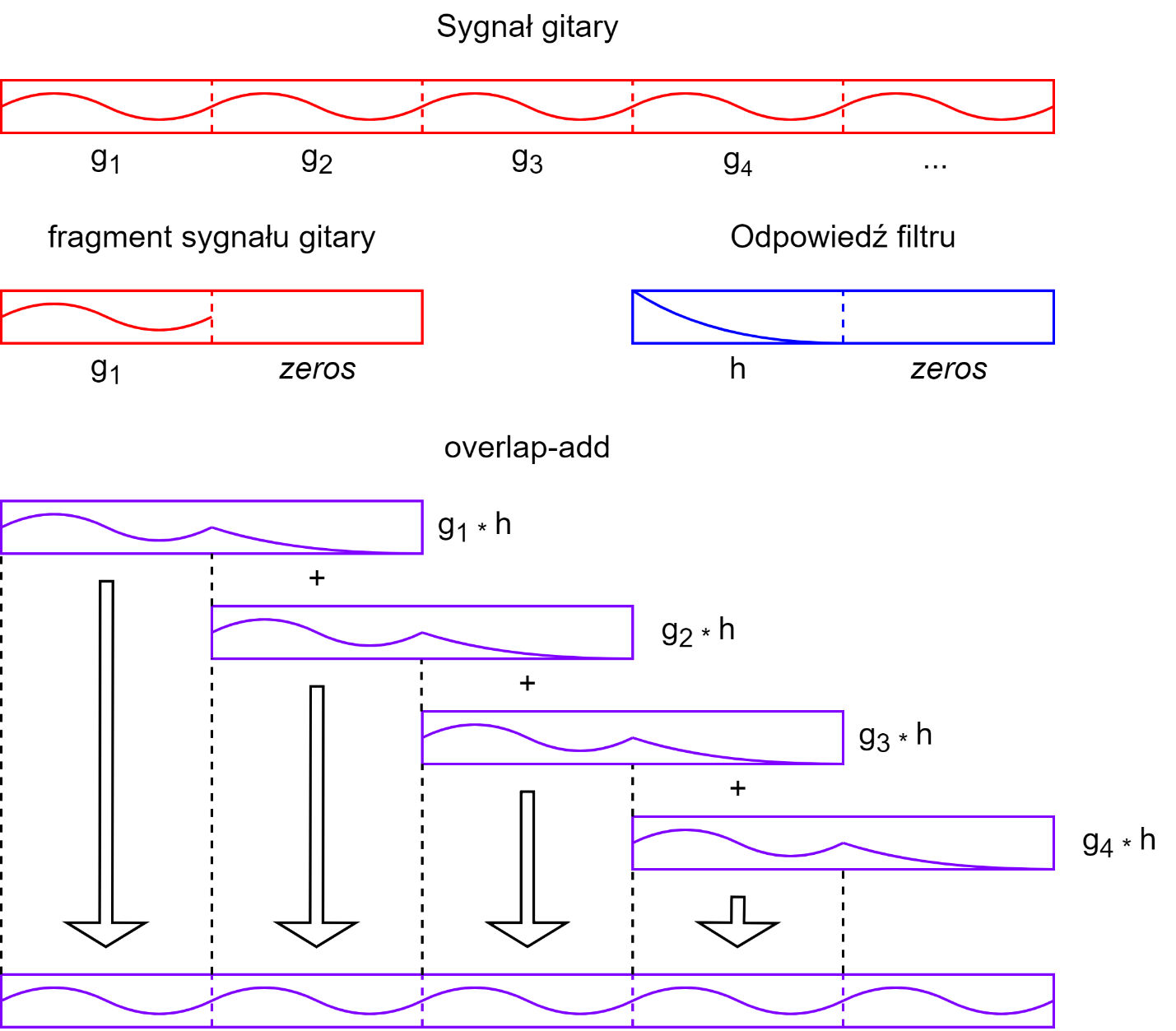
Ekstrakcja odpowiedzi impulsowej pogłosu pomieszczenia wymaga posiadania nagranej próbki kontrolnej z krótkim impulsem o jak najszerszym widmie w warunkach bezpogłosowych oraz drugie nagranie wykonane w pomieszczeniu, z którego wyekstrahowany zostanie pogłos, przy użyciu tego samego sygnału. W tym celu 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.

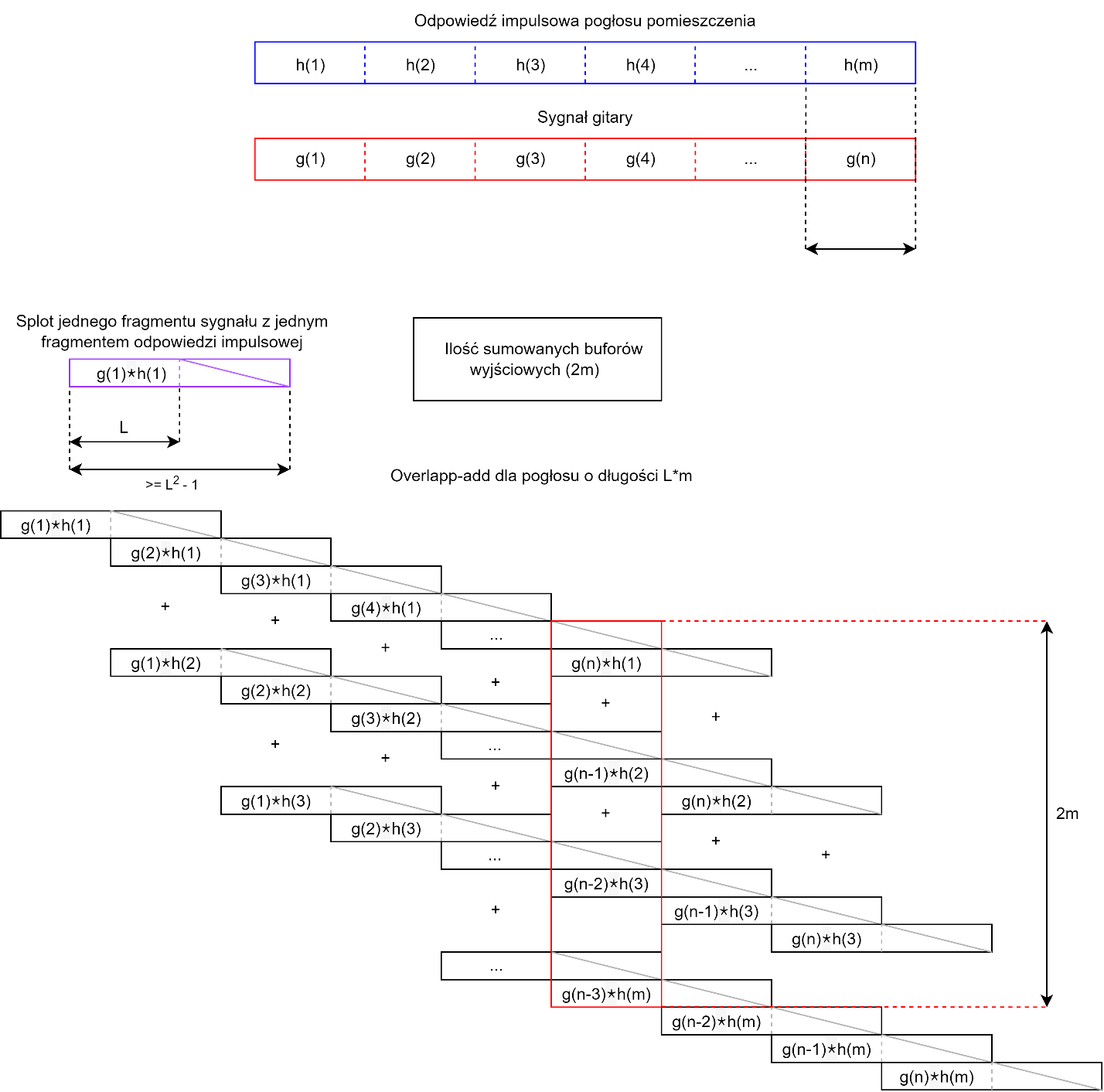
Aby ograniczyć zużycie procesowa można zastosować jeden z algorytmów sekcjonowanego szybkiego splotu sygnałów dyskretnych tj. *Overlap-add*. Pierwszy krok algorytmu to podzielenie sygnału wejściowego na fragmenty o długości i operowaniu na skończonym buforze składającym się z próbek. Konieczne jest uzupełnienie 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.



1. **Pogłos cyfrowy**
   1. **Metoda działania**

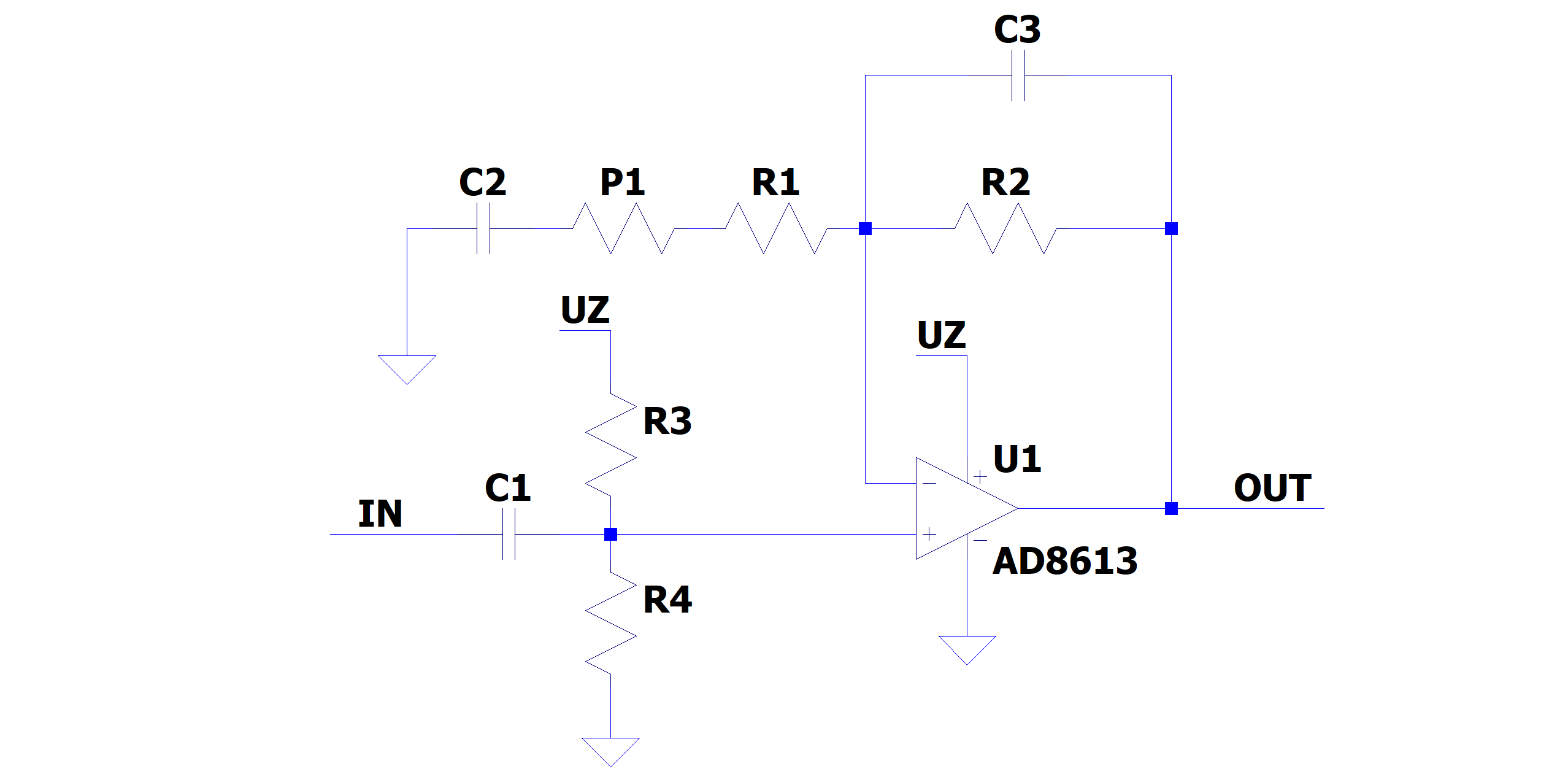
Zasoby potrzebne do realizacji pogłosu przy pomocy splotu wymagają dużej pamięci. Możemy zatem wytworzyć pogłos sztucznie oszczędzając przy tym zasoby oferowane przez procesor. Cyfrowy pogłos powinien naśladować pogłos rzeczywisty. W tym celu należałoby zasymulować odbicia fali akustycznej od powierzchni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

1. **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 [ ]).

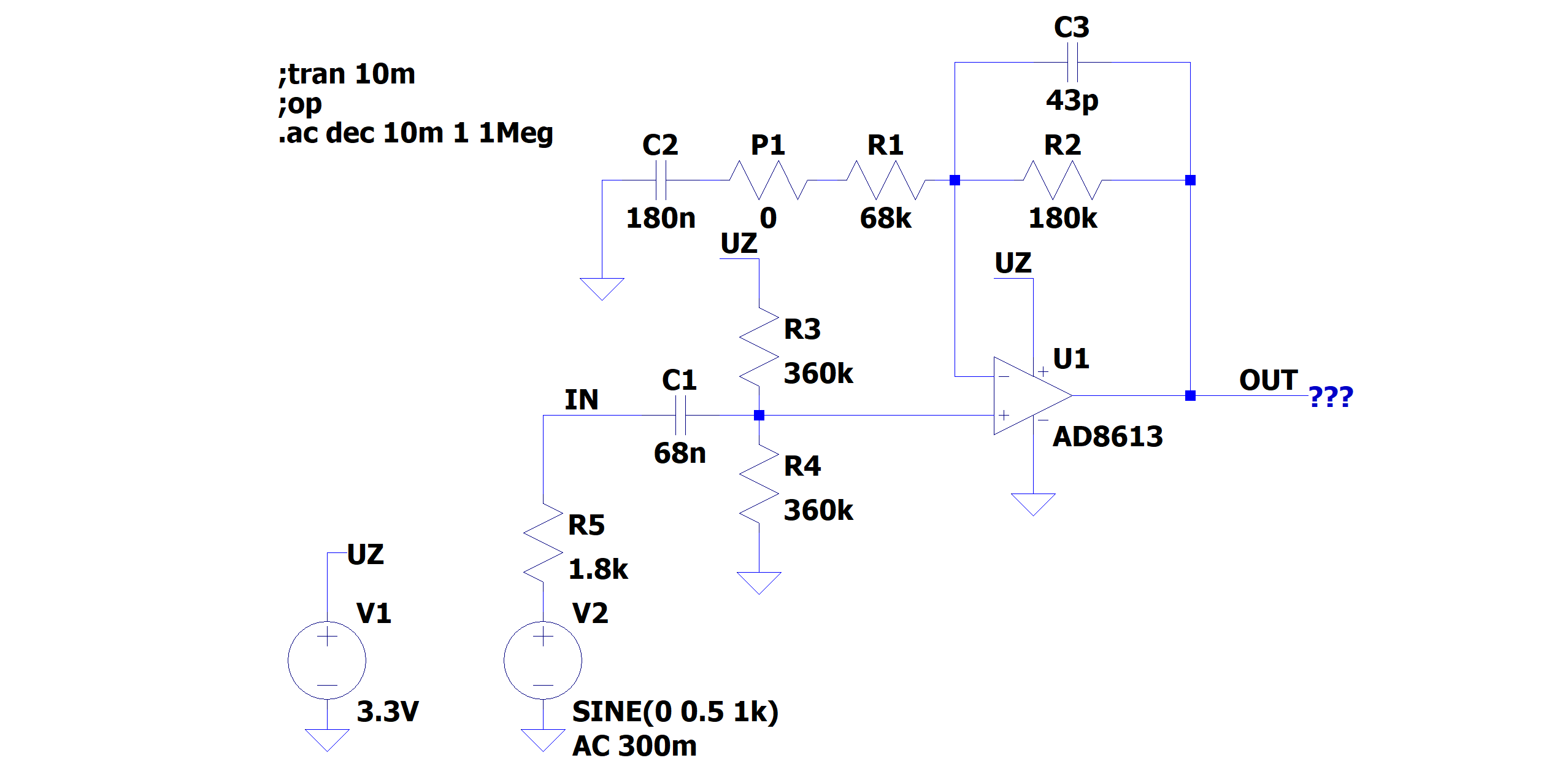
Kondensator wykorzystujemy do odcięcia składowej stałej z sygnału, natomiast odcina pętlę sprzężenia zwrotnego od masy dla napięcia stałego. Dzięki takiemu zabiegowi wzmacniacz operacyjny dla napięcia stałego staje się wtórnikiem. Oba kondensatory stworzą filtry górnoprzepustowe, dlatego istotne jest 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

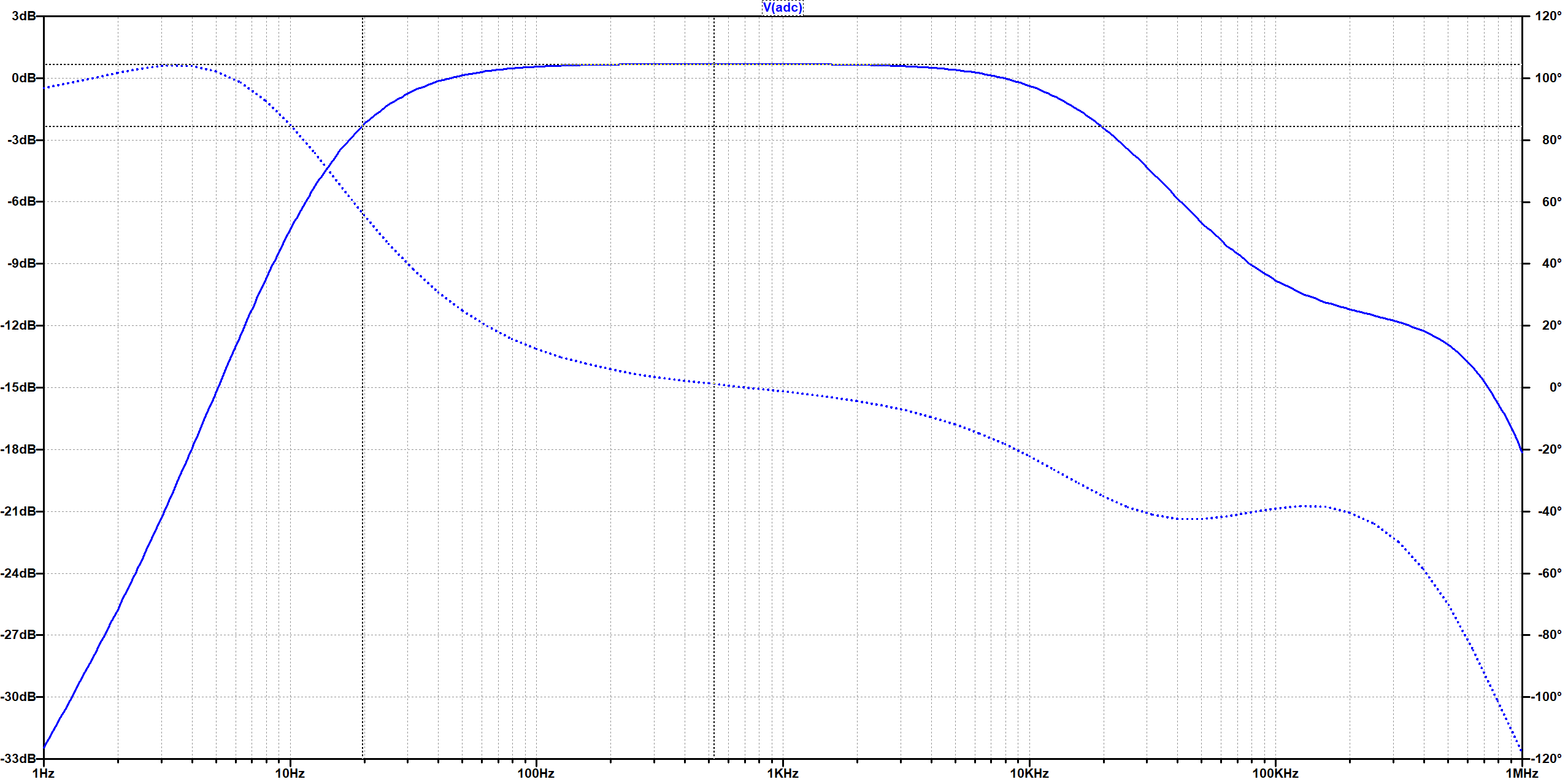
Można przyjąć założenie, że , zatem

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

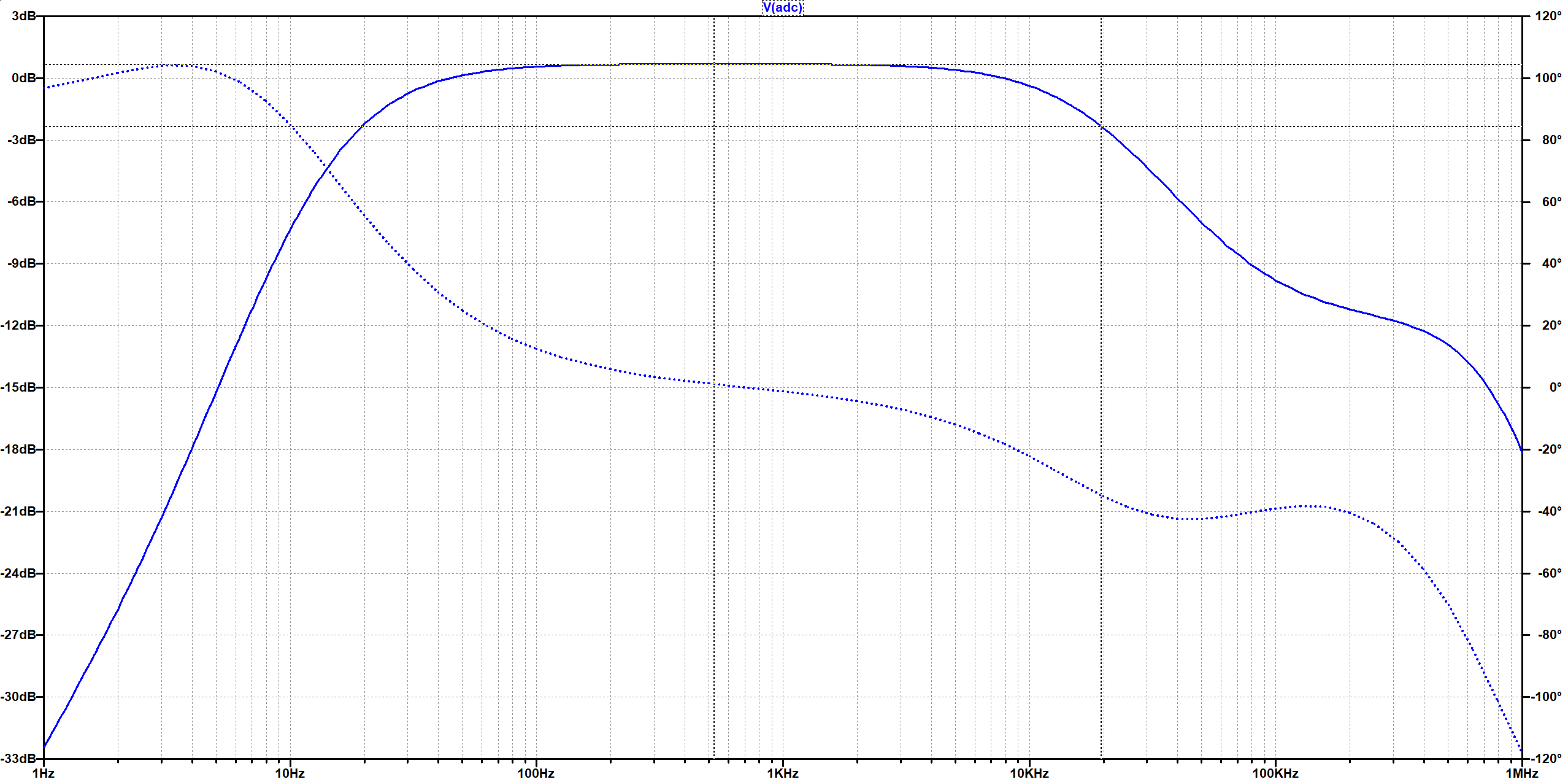
Aby uniknąć szumów wynikających ze wzmacniania częstotliwości powyżej zakresy słyszalnego należy zastosować filtr dolnoprzepustowy. Ograniczenie pasma wzmocnienia można uzyskać poprzez zastosowanie kondensatora o odpowiedniej pojemności. Pasmo należy ograniczyć do częstotliwości granicznej górnej zakresu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

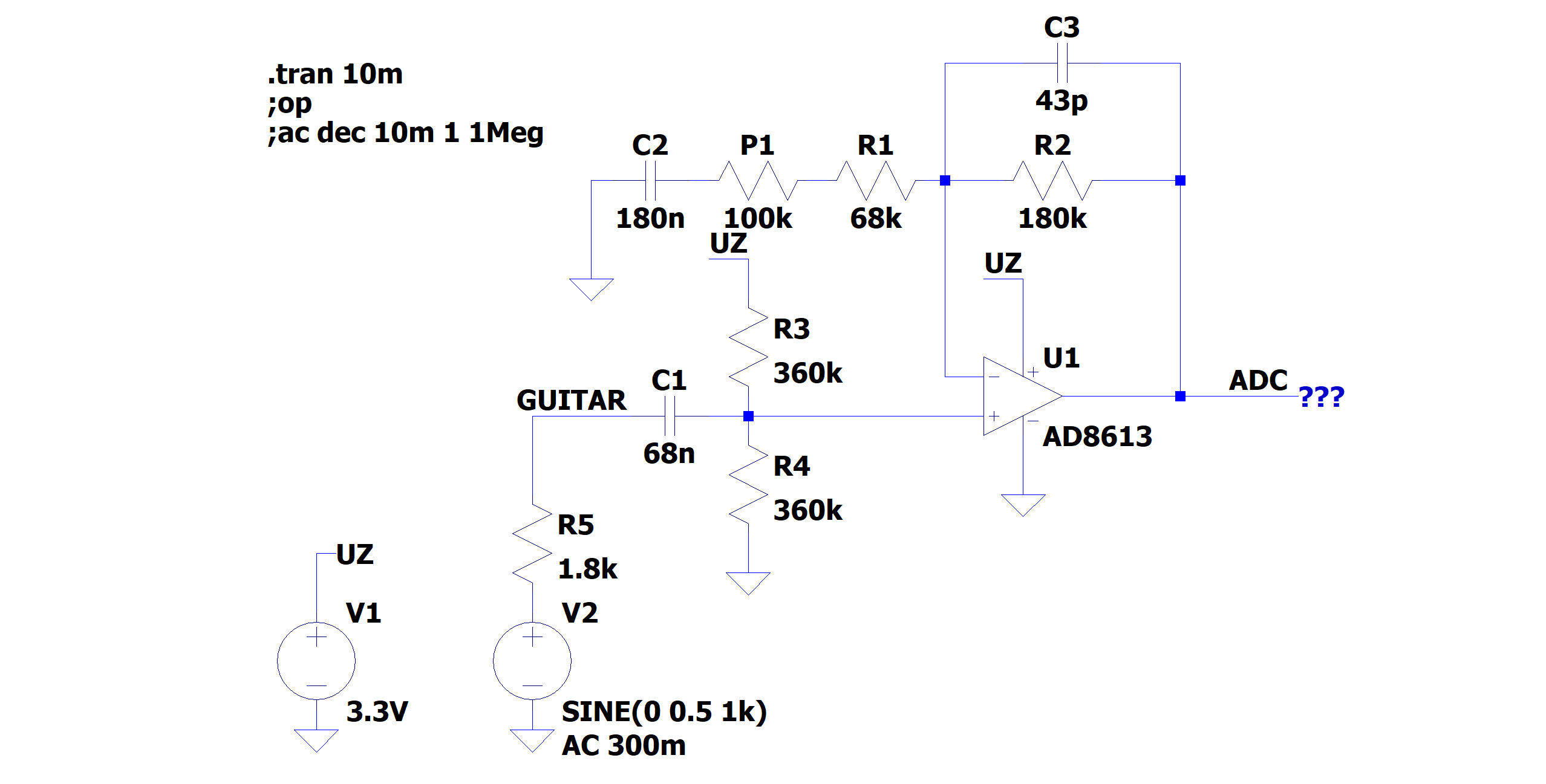


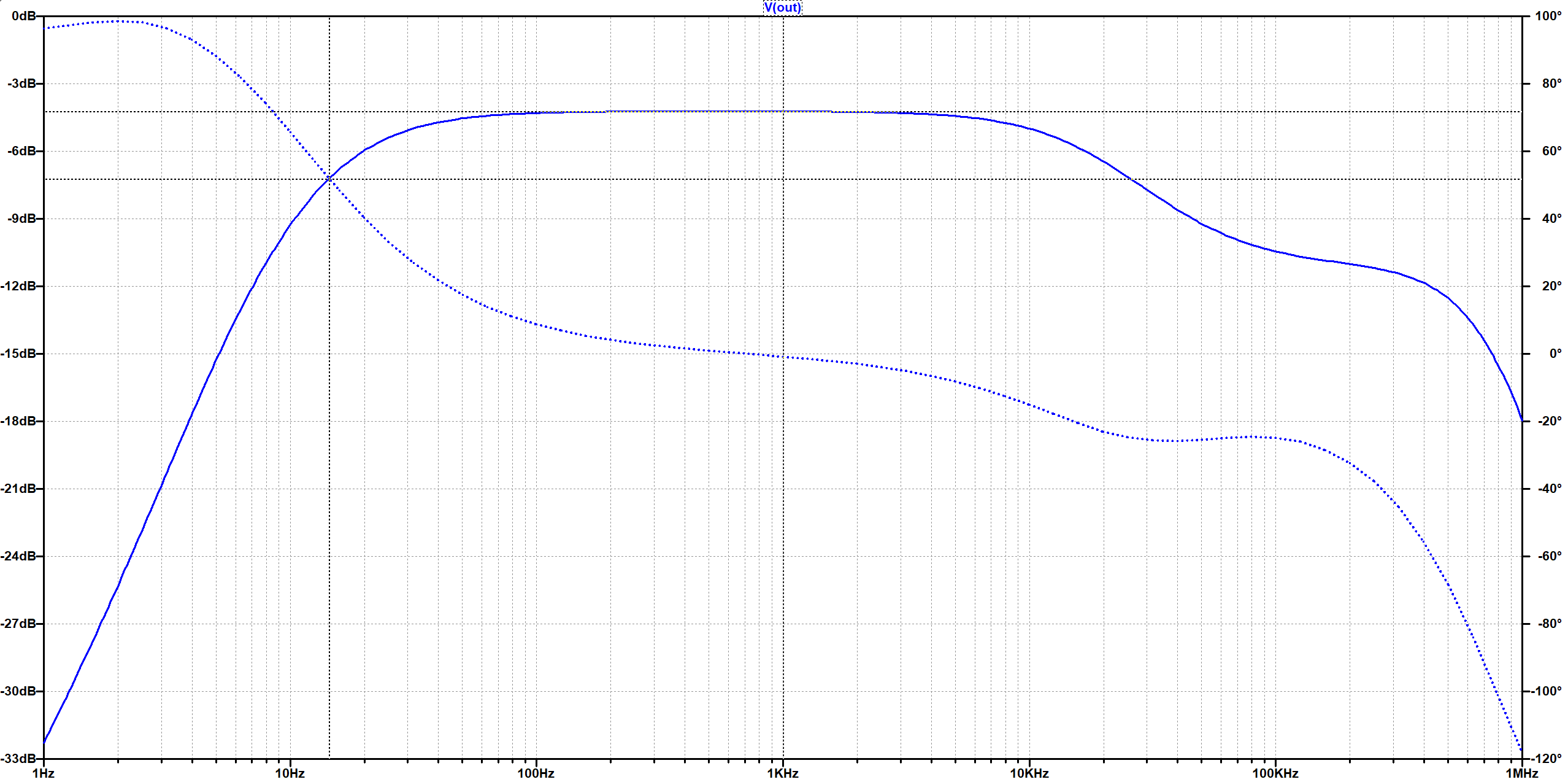


|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Kursor 1** | **Kursor 2** |  |
|  | 19,593688 | 523,20538 | 503,61169 |
|  | -2,3230188 | 0,68787814m | 3,0108969 |

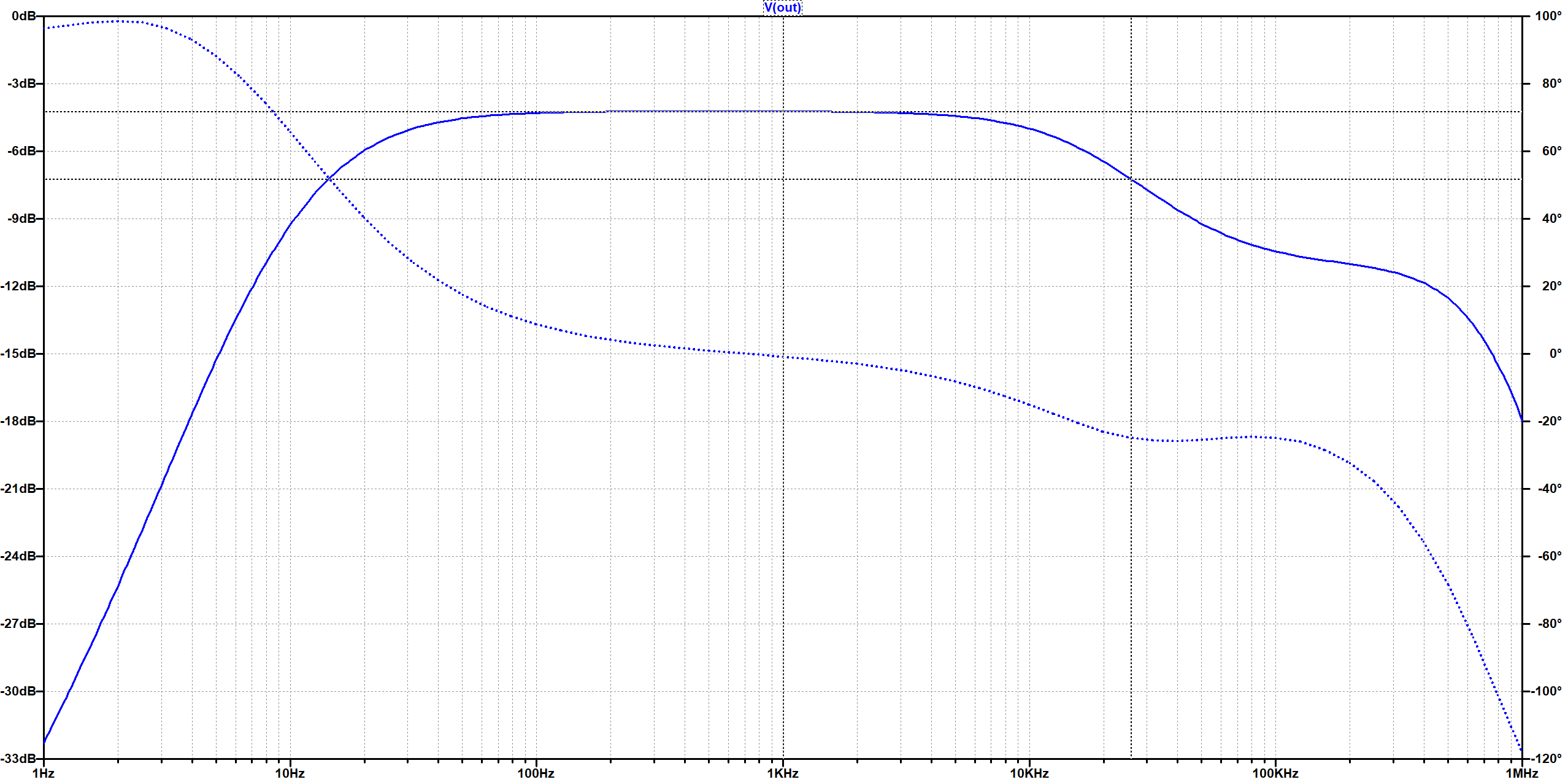


|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Kursor 1 | Kursor 2 |  |
|  | 19481,687 | 523,20538 | 18,958481 |
|  | -2,3248681 | 0,68787814 | 3,0127462 |





|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 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 |