

Dokumentacja techniczna projektu

Niskoszumny wzmacniacz szumu stabilizatora napięcia



Autorzy:

Mateusz Mróz
Filip Imiela

Kierunek:

Elektronika i Telekomunikacja, stopień 2, rok 2

Prowadzący:

dr hab. inż. Łukasz Śliwczyński
dr hab. inż. Przemysław Krehlik

Spis treści

1. Cel projektu	3
2. Opis głównych komponentów	3
2.1. Stabilizator napięcia ADP121-AUJZ33R7	3
2.2. Wzmacniacz niskoszumny LTC6227HMS8E#PBF	4
2.3. Tranzystor bipolarny BC847CLT1G	6
3. Założenia projektowe	7
4. Symulacje LTspice	8
4.1. Weryfikacja szumu modelu wzmacniacza	8
4.2. Wzmocnienie układu	8
4.3. Szum zaprojektowanego wzmacniacza	9
4.4. Układ do badania PSRR	10
5. Projekt schematu i PCB	11
5.1. Schemat	11
5.2. Layout PCB	13
6. Montaż PCB	14
7. Pomiary	16
7.1. Pomiar referencyjny	16
7.2. Wzmocnienie układu	17
7.3. Pomiar szumów stabilizatora	18
7.4. Pomiar wartości skutecznej szumu	19
7.5. Pomiar parametru PSRR	20
8. Wnioski i podsumowanie	25

1. Cel projektu

Zadaniem zespołu było zaprojektowanie niskoszumnego wzmacniacza pozwalającego na pomiar szumu stabilizatora napięcia. Proces projektowy składał się z: wybrania odpowiednich podzespołów, przeprowadzenia symulacji układu, który spełniał założenia projektowe, wykonanie schematu oraz płyty PCB (*Printed Circuit Board*), montaż, a następnie przeprowadzenie pomiarów, porównanie ich z wynikami symulacji oraz wyciągnięcie wniosków. Dodatkowym celem było opracowanie fragmentu układu, który wraz z zaprojektowanym wzmacniaczem umożliwił zbadanie wartości współczynnika PSRR (*Power Supply Rejection Ratio*) stabilizatora.

2. Opis głównych komponentów

Poniżej przedstawione zostały główne komponenty wykorzystane w projekcie.

2.1. Stabilizator napięcia ADP121-AUJZ33R7

Zdecydowano się na wybór stabilizatora napięcia ADP121-AUJZ33R7 firmy *Analog Devices*. Głównymi argumentami przemawiającymi za wyborem tego układu były:

- duża dostępność na rynku
- dostępny model symulacyjny w środowisku *LTspice*
- napięcie wejściowe = +5.0[V] oraz wyjściowe = +3.3[V] (najpopularniejsze napięcia zasilania w systemach cyfrowych)
- wygodna do lutowania obudowa TSOT-5
- szum układu = 65[μVrms] w zakresie 10[Hz] – 100[kHz]

Z perspektywy projektowania układu, kluczowe były parametry szumowe wybranego stabilizatora oraz parametr PSRR. Poniżej zamieszczono stosowne wykresy tych wielkości, które zaczerpnięto z noty katalogowej.

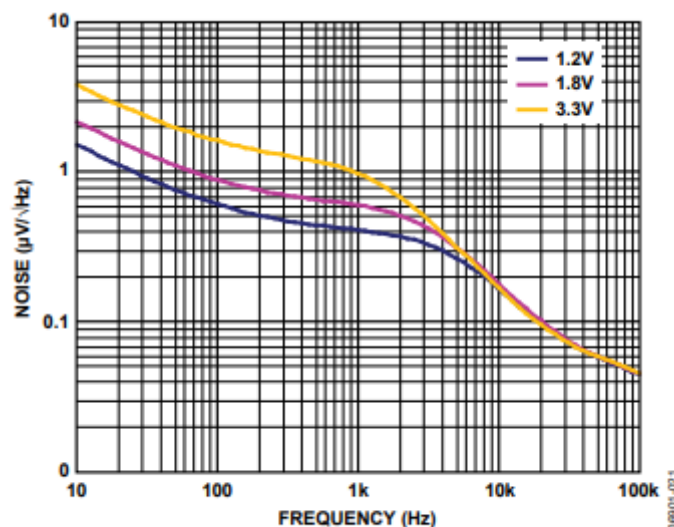


Figure 21. Output Noise Spectrum, $V_{IN} = 5\text{ V}$, $I_{LOAD} = 10\text{ mA}$, $C_{OUT} = 1\text{ }\mu\text{F}$

Rys. 1 Wykres zależności gęstości szumu od częstotliwości dla trzech napięć wyjściowych przy napięciu wejściowym = 5[V], prądzie obciążenia = 10[mA] oraz pojemności wyjściowej = 1[μF]

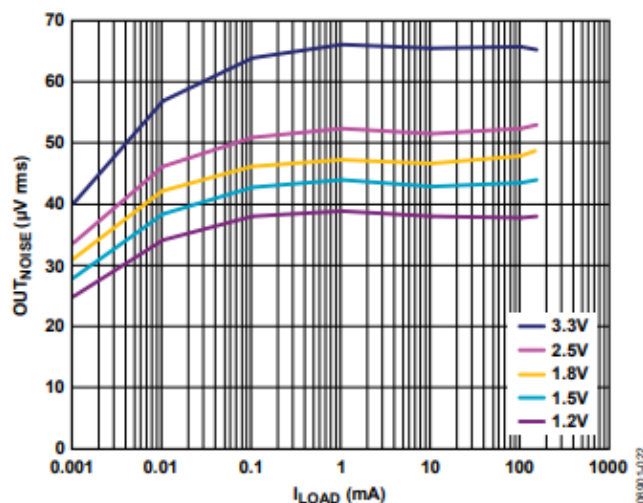


Figure 22. Output Noise vs. Load Current and Output Voltage, $V_{IN} = 5V$, $C_{OUT} = 1\mu F$

Rys. 2 Wykres zależności wartości skutecznej szumu stabilizatora w zależności od prądu obciążenia dla różnych napięć wyjściowych

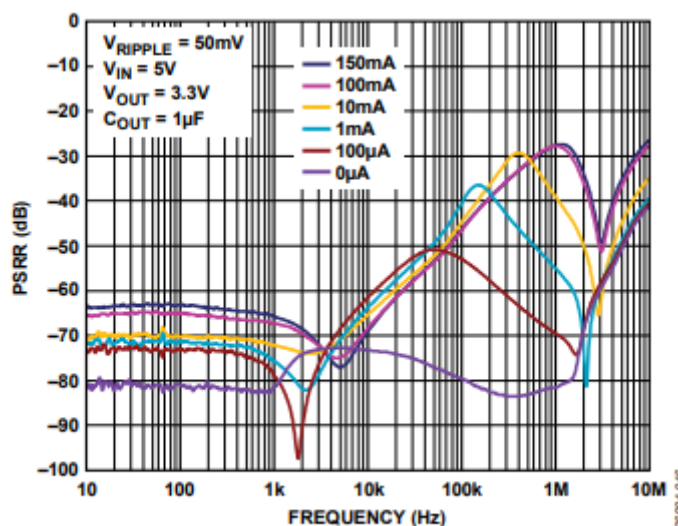


Figure 19. Power Supply Rejection Ratio vs. Frequency

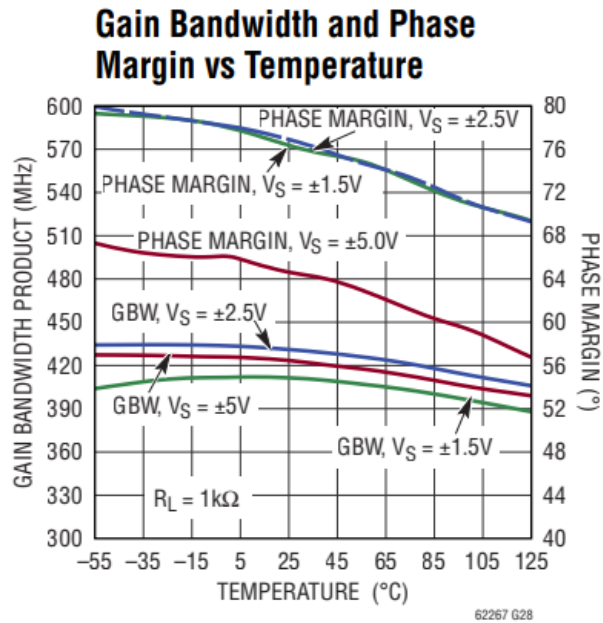
Rys. 3 Wykres zależności parametru PSRR (Power Supply Rejection Ratio) w zależności od częstotliwości dla różnego prądu obciążenia oraz napięcia wyjściowego = 3.3[V] oraz pojemności wyjściowej = 1[μF]

2.2. Wzmacniacz niskoszumny LTC6227HMS8E#PBF

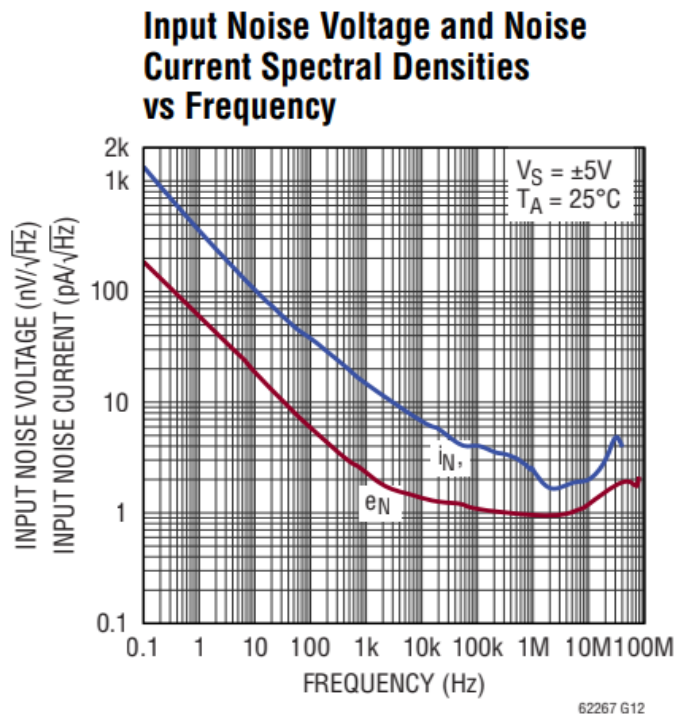
Do tak wybranego stabilizatora zdecydowano się na zakup niskoszumnego wzmacniacza LTC6227HMS8E#PBF firmy Analog Devices. Kluczowe z perspektywy projektowanego układu były:

- dwa wzmacniacze w obudowie (mniejsze parametry pasożytnicze oraz łatwiejszy w wykonaniu *layout* płyty PCB)
- duża dostępność
- dostępny model symulacyjny w środowisku *LTspice*
- GBW (*Gain Bandwidth Product*) = 420[MHz]
- bipolarne napięcie zasilania $\pm 5.0[V]$
- niski poziom gęstości szumu wzmacniacza = $1 \left[\frac{nV}{\sqrt{Hz}} \right]$

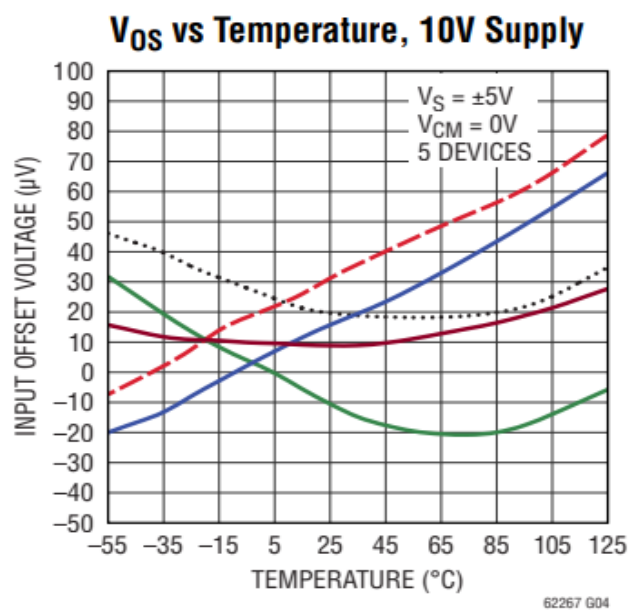
- maksymalne wejściowe napięcie niezrównoważenia = 95[μ V]
- prąd polaryzujący = -8.4[μ A]



Rys. 4 Wykres zależności parametru GBW oraz marginesu fazy w zależności od temperatury dla różnych poziomów napięć zasilania przy obciążeniu = 1[k Ω]



Rys. 5 Wykres zależności gęstości szumu napięciowego i prądowego w zależności od częstotliwości dla zasilania +/-5.0[V]



Rys. 6 Wykres zależności napięcia niezrównoważenia w zależności od temperatury pracy $\pm 5.0[V]$

2.3. Tranzystor bipolarny BC847CLT1G

Układ pomocniczy do pomiaru PSRR oparto o bipolarny tranzystor NPN BC847CLT1G ogólnego przeznaczenia firmy *Onsemi*. Pomimo tego, że jest to nie idealny wybór, zdecydowano się na zakup z powodu dużej dostępności oraz niskiej ceny (60 gr).

3. Założenia projektowe

Podczas prac projektowych kierowano się ustalonymi wcześniej założeniami:

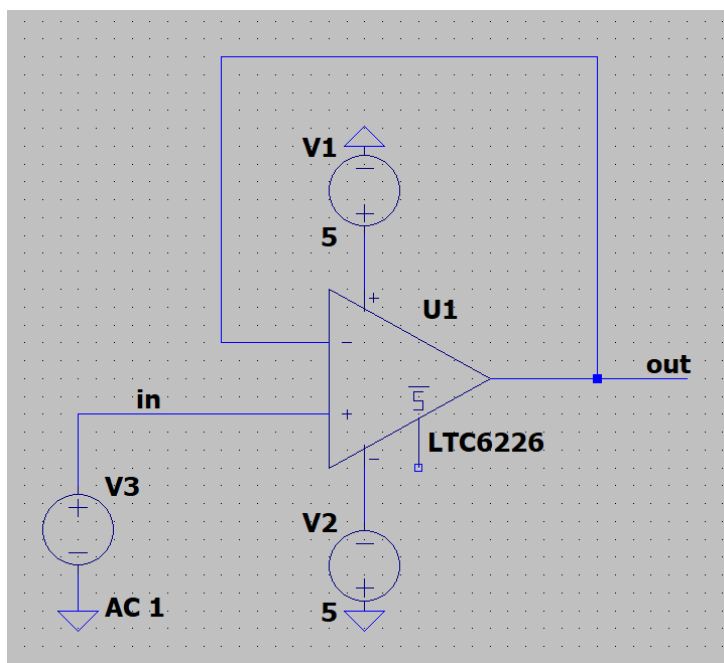
- na płytce ma znajdować się stabilizator napięcia, którego szum będzie badany,
- pasmo, w którym szum będzie badany ma wynosić co najmniej 500[kHz],
- układ wzmacniający tzn. wzmacniacz operacyjny wraz z pasywnymi komponentami muszą mieć szum wejściowy mniejszy od szumu, który będzie badany, co najmniej o 10[dB] mniejszy od szumu LDO w całym paśmie pracy,
- układ zasilany jest z zewnętrznego źródła napięcia $\pm 5.0[V]$,
- układ powinien umożliwiać pomiar współczynnika PSSR

4. Symulacje LTspice

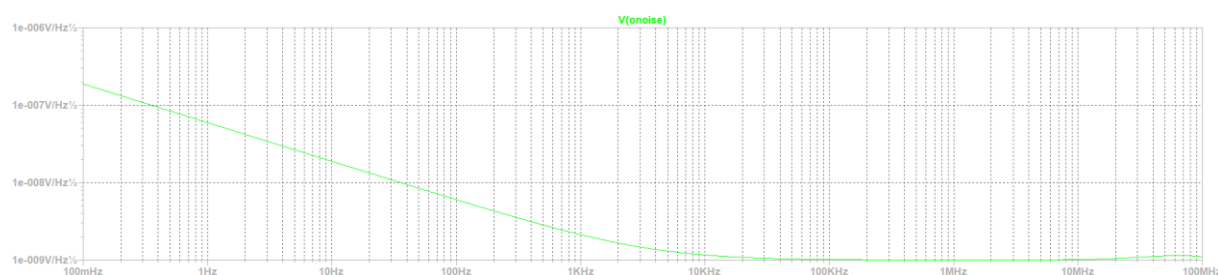
W celu oszacowania parametrów projektowanego układu, wykonano szereg symulacji.

4.1. Weryfikacja szumu modelu wzmacniacza

Symulacje rozpoczęto od weryfikacji modelu szumowego wzmacniacza LTC6226 oraz porównania go z notą katalogową. Analizę szumową wykonano w zakresie 0 - 100[MHz].



Rys. 7 Układ symulacyjny do weryfikacji parametrów szumowych modelu wzmacniacza LTC6226

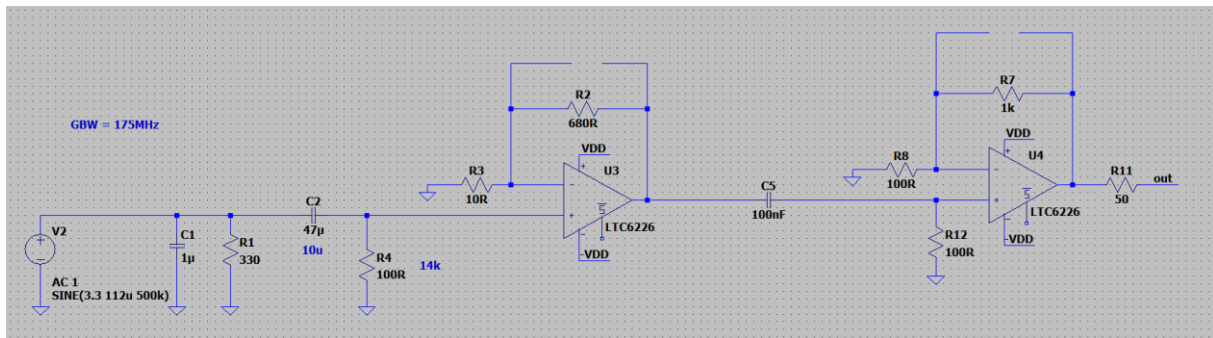


Rys. 8 Charakterystyka szumowa modelu symulacyjnego wzmacniacza LTC6226

Po porównaniu rys. 8 z rys. 5, uznano, że model szumowy wzmacniacza, zgadza się z danymi zawartymi w notce katalogowej.

4.2. Wzmocnienie układu

Zaprojektowano 2 stopnie wzmacniające, pracujące w konfiguracji nieodwracającej. Zadbano, by zgodnie ze sztuką, pierwszy stopień miał znacznie większe wzmocnienie od drugiego. Na wejściu układu dodano filtr górnoprzepustowy, by odciąć składową stałą generowaną przez stabilizator napięcia. Kryteriami wyboru częstotliwości granicznej filtru był szum rezystora wchodzącego w jego skład oraz wartość składowej stałej, która wchodzi na wejście wzmacniacza (wartość dobrana tak, by nie dochodziło do nasycenia się obu stopni).



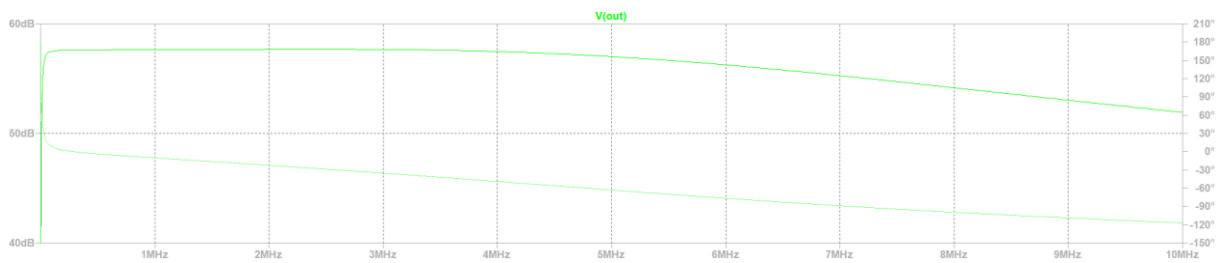
Rys. 9 Symulowany układ dwustopniowego wzmacniacza

Częstotliwość graniczna filtru $f = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} = 33.8[\text{Hz}]$

Wzmocnienie 1 stopnia $g_1 = \frac{680}{10} + 1 = 69 = 20\log_{10}(69) = 36.8[\text{dB}]$

Wzmocnienie 2 stopnia $g_2 = \frac{1000}{100} + 1 = 11 = 20\log_{10}(11) = 20.8[\text{dB}]$

Wzmocnienie układu $g = g_1 g_2 = 69 \cdot 11 = 759 = 57.6[\text{dB}]$

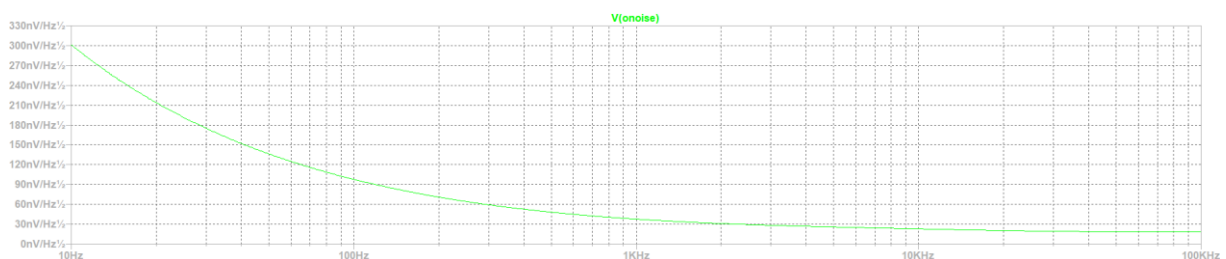


Rys. 10 Charakterystyka częstotliwościowa zaprojektowanego układu wzmacniacza

Na podstawie wykonanej symulacji małosygnałowej, można uznać, że wzmocnienie układu zgadza się z przewidywaniami teoretycznymi. Pasmo jest znacznie większe niż zakładane 500[kHz]. Dodatkowo na charakterystyce widać odcięcie składowej stałej.

4.3. Szum zaprojektowanego wzmacniacza

W celu weryfikacji sensowności zaprojektowanego układu, wykonano symulację szumową wzmacniacza. W celu porównania szumów wzmacniacza z szumami stabilizatora, wybrano zakres analizy do 100[kHz].

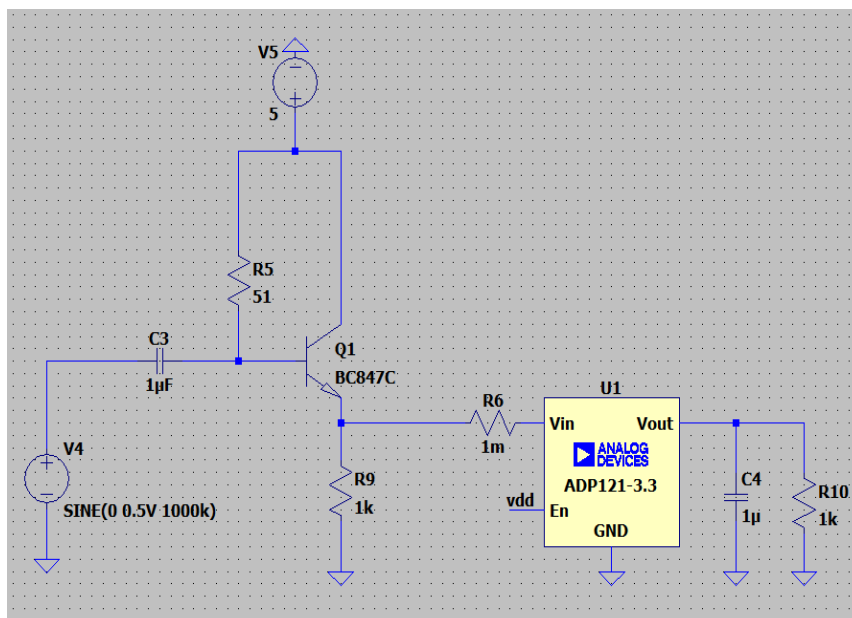


Rys. 11 Charakterystyka szumowa zaprojektowanego układu wzmacniacza

Porównując z wykresem na rys. 1 można uznać, że szum wzmacniacza w paśmie możliwym do porównania jest mniejszy niż szum badanego stabilizatora.

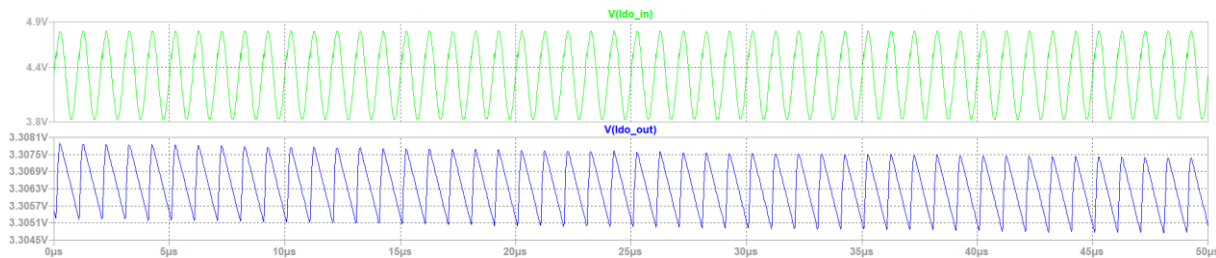
4.4. Układ do badania PSRR

Układ tranzystorowy do pomiaru parametru PSRR stabilizatora oparto o konfigurację wspólnego emitera. Dzięki temu, na wejście LDO można było podać zarówno składową stałą oraz składową zmienną w postaci np. sygnału sinusoidalnego.



Rys. 12 Układ do badania parametru PSRR stabilizatora napięcia

Przeprowadzono symulację potwierdzającą działanie układu wtórnika.



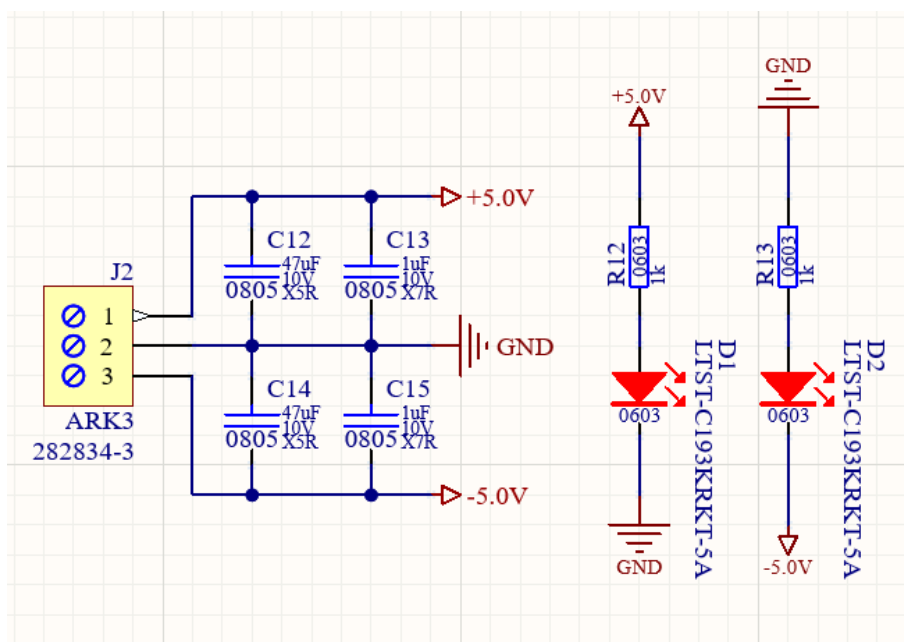
Rys. 13 Przebiegi na wejściu (zielony) oraz na wyjściu (niebieski) stabilizatora napięcia

Widoczny poziom składowej zmiennej na wejściu stabilizatora przekłada się na pewną wartość składowej zmiennej na jego wyjściu.

5. Projekt schematu i PCB

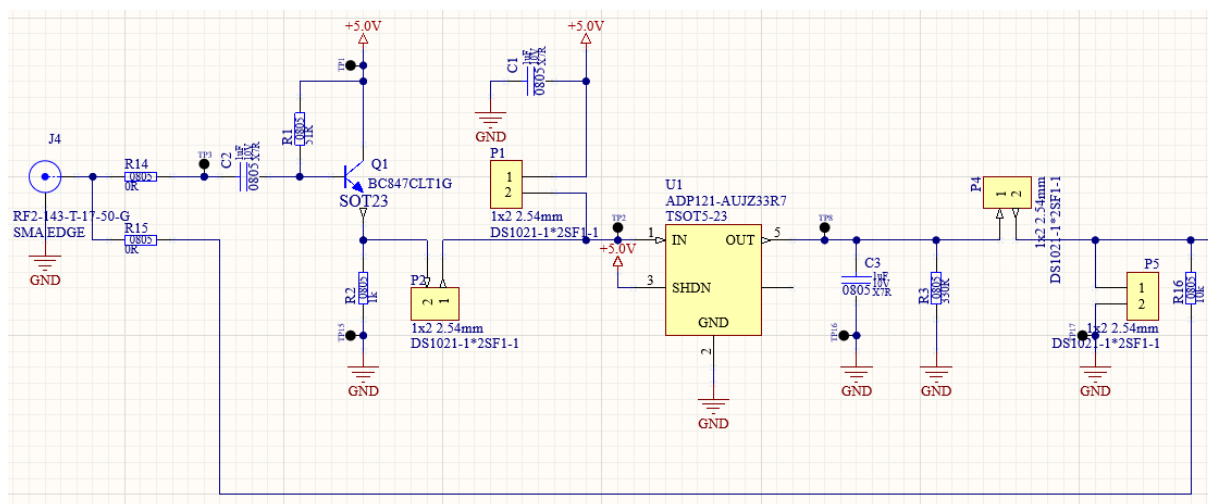
Schemat układu oraz płytę PCB wykonano w środowisku *Altium Designer*.

5.1. Schemat



Rys. 14 Fragment schematu układu zawierający złącze wraz z kondensatorami odsprężającymi oraz diody LED

Na schemacie umieszczono złącze do doprowadzenia zasilania (+5.0V, -5.0V) z zewnętrznego zasilacza. Dodano ceramiczne kondensatory odsprężające o dużych wartościach pojemności. Dodano również diody LED informujące o doprowadzeniu odpowiedniego napięcia do układu.



Rys. 15 Fragment schematu z układem do pomiaru parametry PSRR, stabilizatorem napięcia oraz jego obciążeniem

Za pomocą zwór 0[Ω] umożliwiono doprowadzenie sygnału (poprzez złącze SMA) z zewnętrznego generatora do:

- układu tranzystorowego do badania parametru PSRR
- wejścia filtra górnoprzepustowego a następnie wejścia wzmacniacza przed dzielnik rezystorowy $\frac{1}{100}$

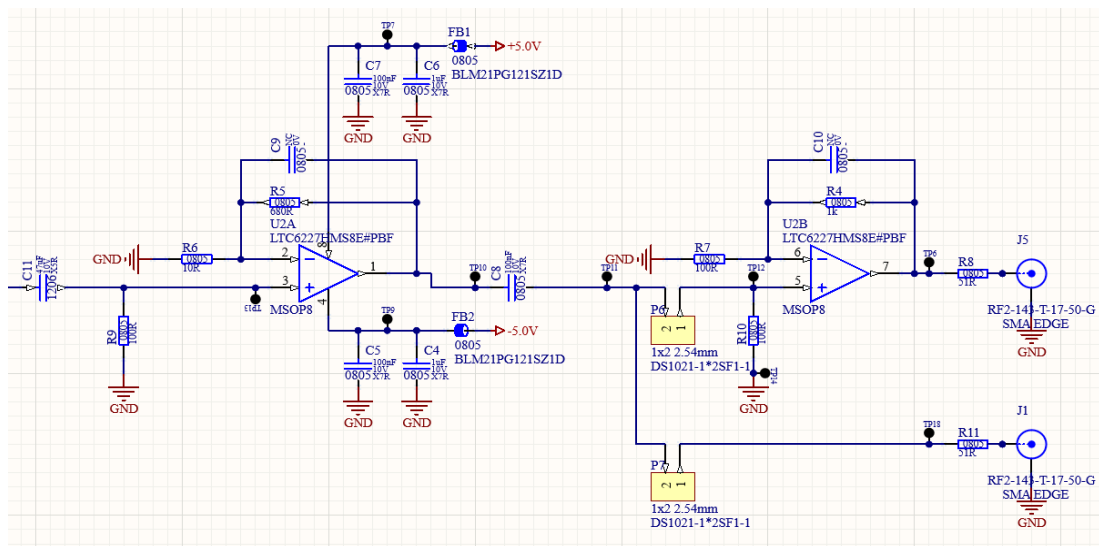
Dzięki złączom typu gold-pin 1x2 2.54mm możliwe było poprzez zworę, doprowadzenie do wejścia stabilizatora:

- sygnału z wyjścia układu tranzystorowego do badania parametru PSRR
- napięcia +5.0V podczas badania jego szumu

Aby móc porównać mierzone parametry z danymi z noty katalogowej, stabilizator obciążono rezystancją 300[Ω] oraz pojemnością 1[uF].

Kolejne dwie zwory pozwalają na:

- bezpośrednie podłączenie wyjścia stabilizatora do wejścia wzmacniacza przez filtr górnoprzepustowy
- zwarcie wejścia wzmacniacza do masy podczas pomiaru szumu własnego wzmacniacza



Rys. 16 Fragment schematu z filtrem górnoprzepustowym oraz dwoma stopniami wzmacniającymi oraz filtrację zasilania układu scalonego

Jak wspomniano, filtr górnoprzepustowy służy do odcięcia składowej stałej generowanej przez stabilizator. Na schemacie, w sprzężeniach zwrotnych kolejnych stopni wzmacniacza umieszczono rezystancje zgodnie z przeprowadzoną symulacją. Dodano kondensatory filtrujące zasilanie oraz koraliki ferrytowe, które tłumią wysokoczęstotliwościowe zakłócenia, które mogłyby pojawić się na liniach zasilających. W sprzężeniach zwrotnych obu wzmacniaczy przewidziano miejsce (*footprint*) na kondensatory do ewentualnego ograniczenia pasma układu.

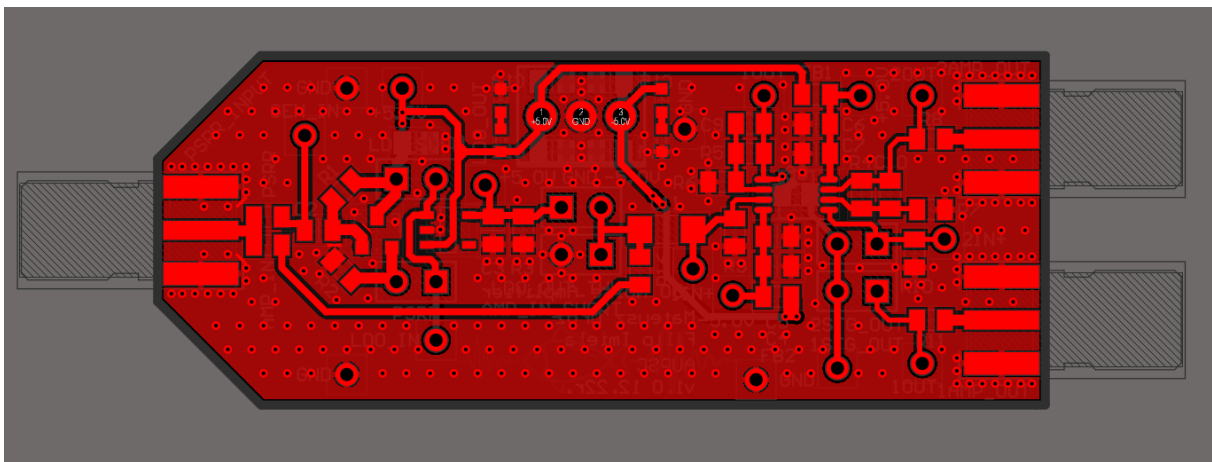
Dzięki kolejnym złączom typu gold-pin oraz zworom, przez złącza SMA możliwy jest pomiar sygnału:

- na wyjściu 1 stopnia
- na wyjściu obu stopni

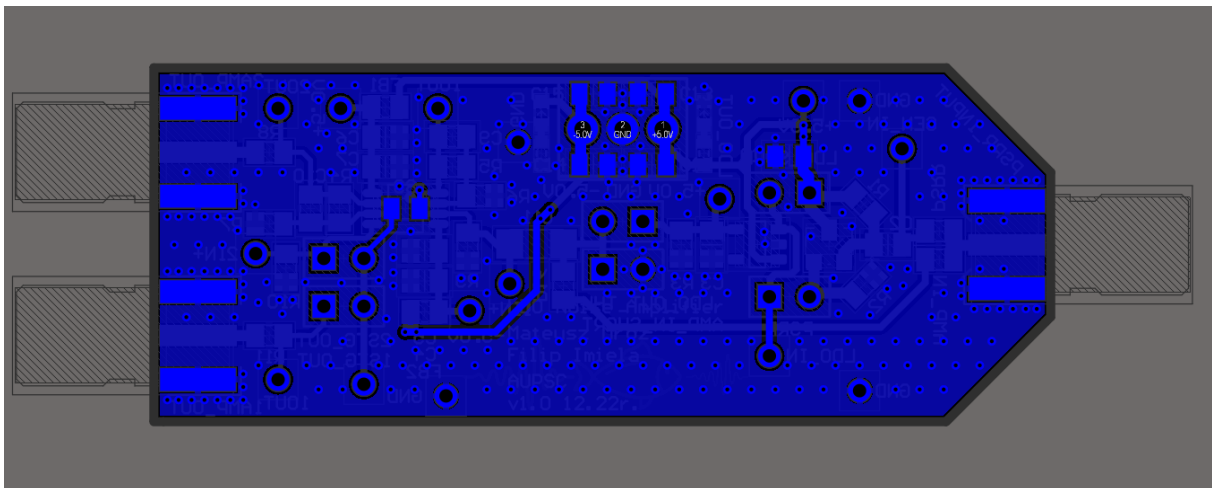
Pomiędzy wyjściami kolejnych stopni, a złączami SMA w celu dopasowania impedancji, wprowadzono szeregowo rezystory o wartościach $51[\Omega]$.

5.2. Layout PCB

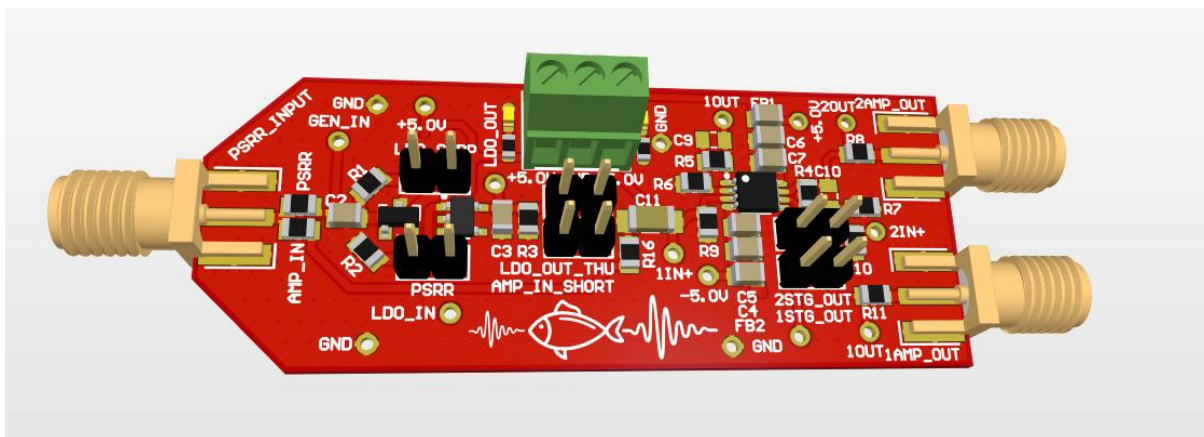
Aby była możliwa produkcja zaprojektowanego układu, zgodnie ze schematem wykonano layout dwuwarstwowej płyty PCB. Znaczna większość komponentów znalazła się na górnej warstwie. W celu wygodnej weryfikacji działania układu, w kluczowych miejscach umieszczono punkty testowe wraz z oznaczeniami. Szczególną uwagę zwrócono na ścieżki w sprzężeniu zwrotnym wzmacniaczy operacyjnych, tak by pojemność węzła skojarzonego z wejściem nieodwracającym była jak najmniejsza. Na obu warstwach wylano płaszczyzny masy oraz połączono je przelotkami (*via stitching*). Ścieżki na dolnej warstwie prowadzono w taki sposób, by w jak najmniejszym stopniu podzielić płaszczyznę masy. Aby zapewnić dobre odsprężanie zasilania, kondensatory filtrujące umieszczono jak najbliżej pinów układów scalonych.



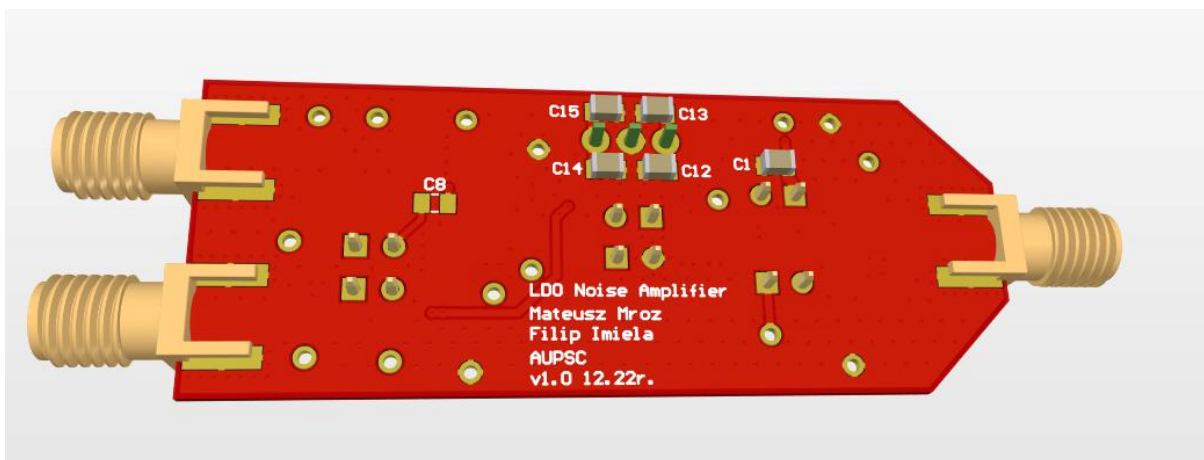
Rys. 17 Górna warstwa zaprojektowanej płyty PCB



Rys. 18 Dolna warstwa zaprojektowanej płyty PCB



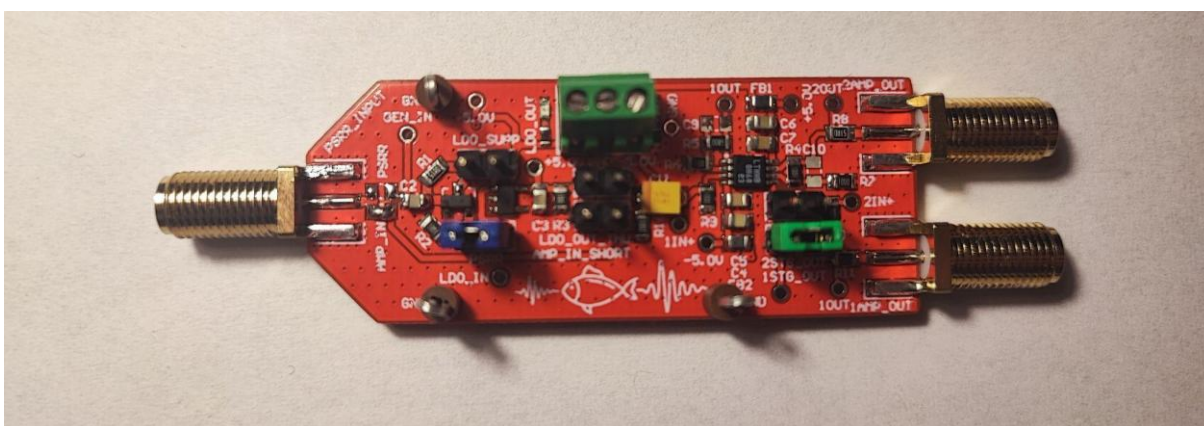
Rys. 19 Widok 3D zaprojektowanego układu z góry



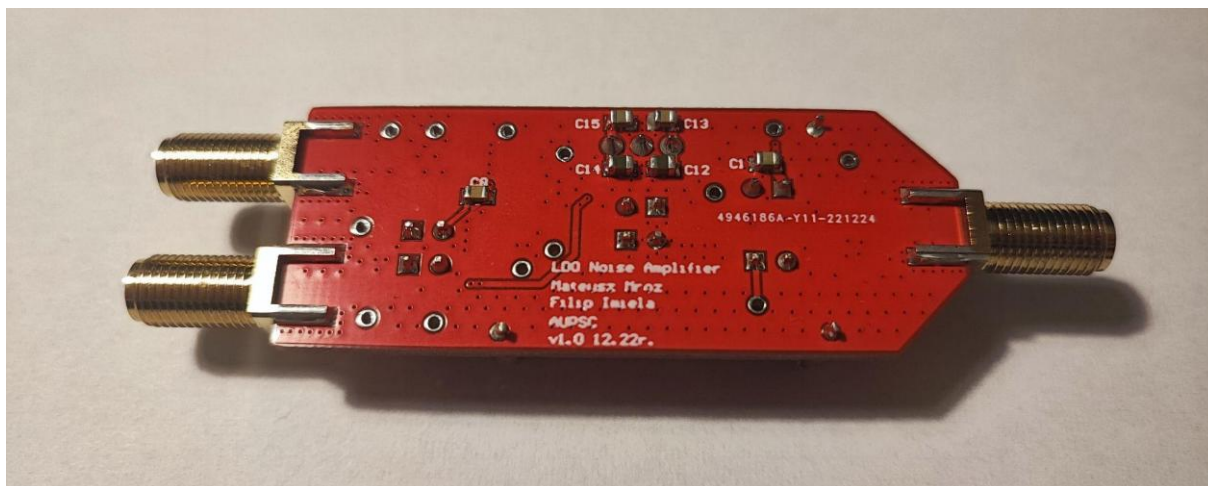
Rys. 20 Widok 3D zaprojektowanego układu z dołu

6. Montaż PCB

Zaprojektowaną płytę wykonano w firmie *JLCPCB*, a następnie zmontowano cały układ.



Rys. 21 Widok z góry zmontowanego układu



Rys. 22 Widok z dołu zmontowanego układu

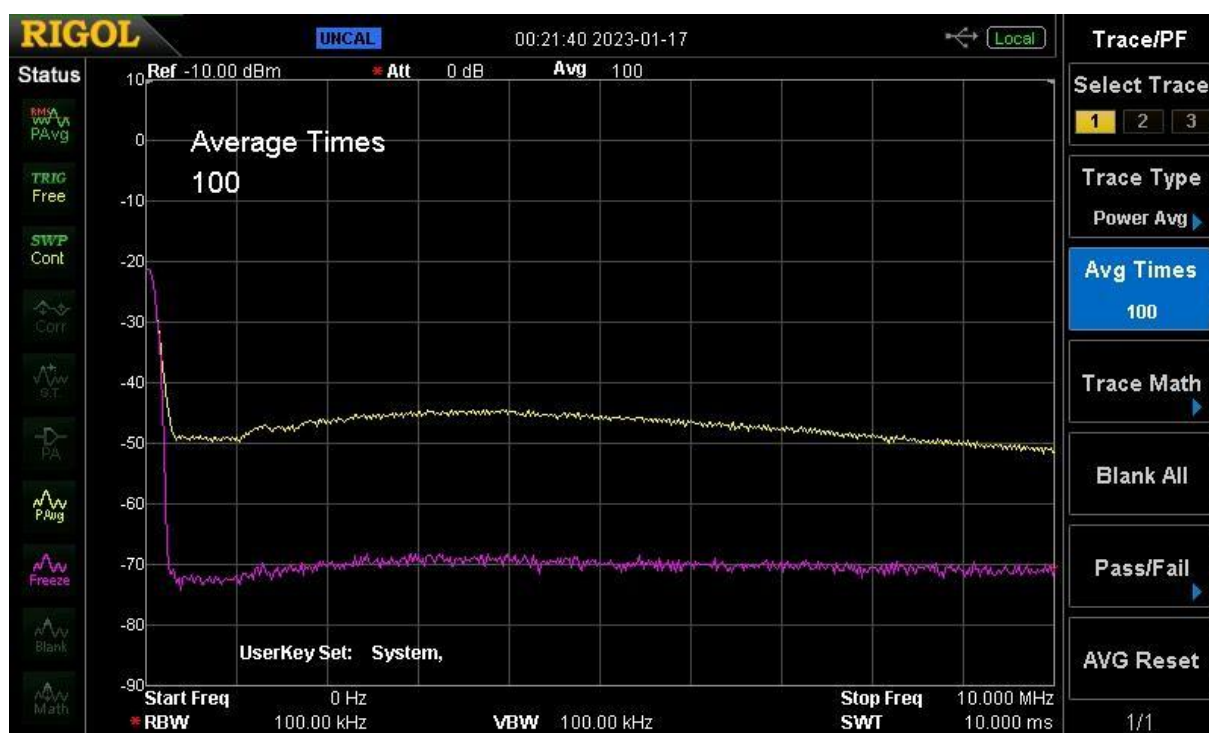
7. Pomiary

Poniżej opisane zostały pomiary wykonane na zaprojektowanym i wykonanym układzie.

Pierwszym krokiem była weryfikacja poprawności montażu układu na płytce drukowanej, poprzez podłączenie do zewnętrznego zasilacza z ograniczeniem prądowym. Dzięki temu można było zapobiec uszkodzeniu się układu w wypadku błędu.

7.1. Pomiar referencyjny

Wykonano pomiary referencyjne, w których skład wchodzi: pomiar szumu wejściowego analizatora widma oraz pomiar szumu własnego wzmacniacza (wejście zwarte do masy). Wyniki tych pomiarów przedstawiono poniżej:

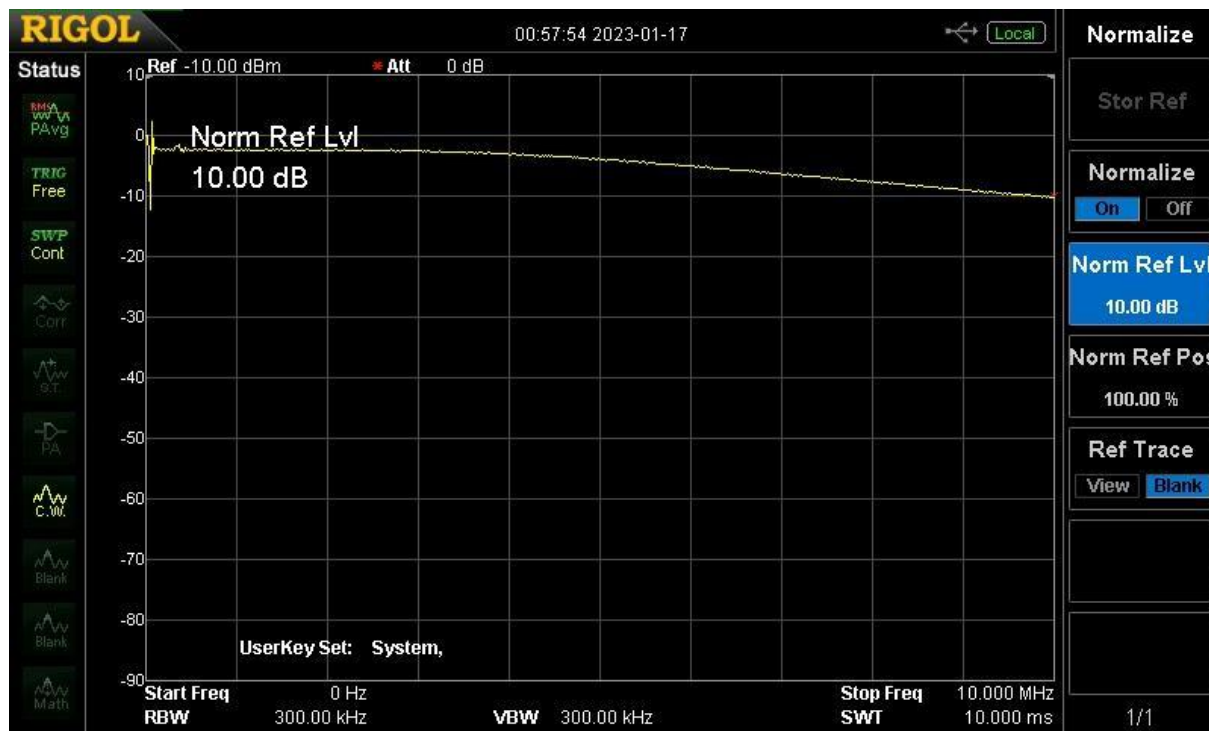


Rys. 23 Widmo szumu wejściowego analizatora widma (fioletowy) oraz szumu własnego wzmacniacza (żółty)

Pomiar wykonano w szerokim paśmie 10[MHz], aby upewnić się, że układ nie wzbudza się. Jak można zauważyć na uzyskanej charakterystyce, nie występują żadne oscylacje.

7.2. Wzmocnienie układu

W celu wykonania pomiaru wzmocnienia układu, połączono wejście wzmacniacza z wyjściem generatora śledzącego przez tłumik 10[dB]. Na wejściu układu znajduje się dzielnik rezystancyjny o tłumieniu 20[dB]. Tak więc, na wejściu wzmacniacza sygnał osiąga moc -30[dBm]. Wynik pomiaru został przedstawiony poniżej:



Rys. 24 Widmo charakterystyki wzmocnienia układu

Teoretyczne wzmocnienie układu to 759[V/V], co jest równe ok. 57.5[dB] lub 28.7[dB] dla mocy. Tak więc sygnał, który spodziewamy się uzyskać na analizatorze widma to ok.:

$$-30[\text{dBm}] + 28.7[\text{dB}] = -1.3[\text{dBm}]$$

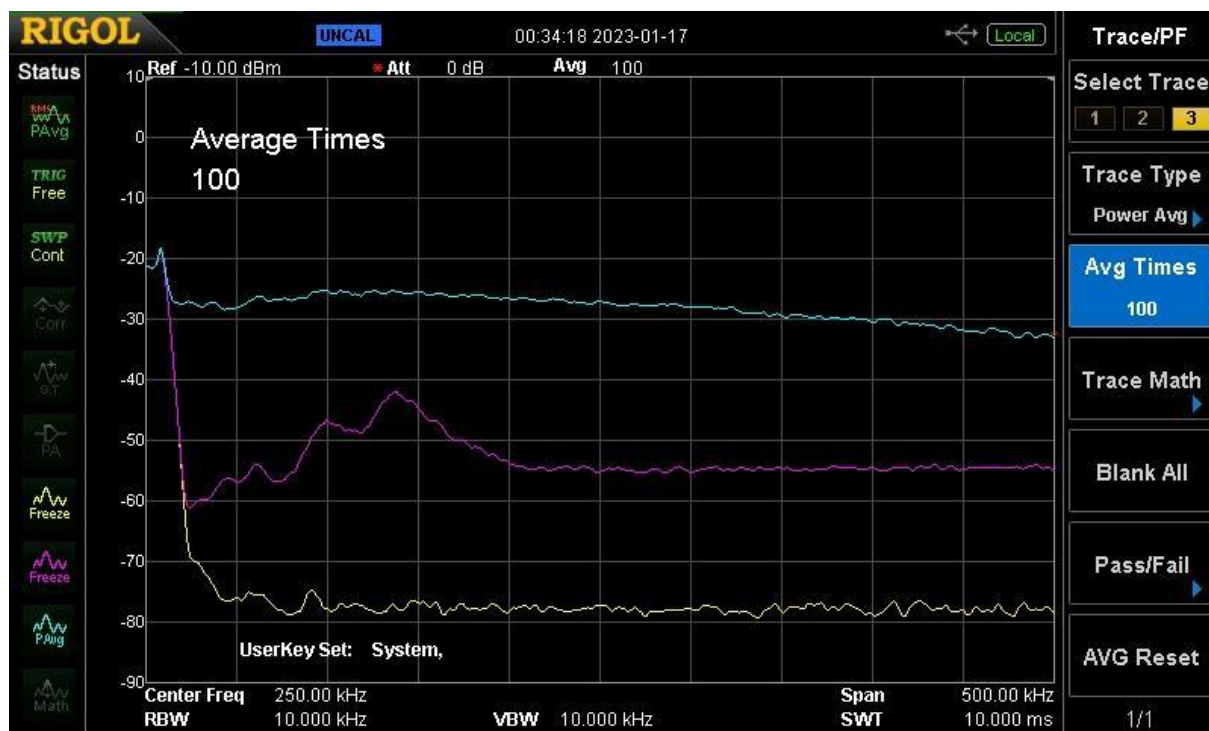
Wynik ten zgadza się z odczytaną z charakterystyki wartością.

Ponadto można zaobserwować, że zmierzony kształt charakterystyki zgadza się z kształtem uzyskanym z symulacji.

7.3. Pomiar szumów stabilizatora

Następnie wykonano zasadniczą część pomiaru, czyli pomiar szumów stabilizatora. Poniższe wykresy przedstawiają:

- referencyjny pomiar szumów analizatora widma (żółty),
- referencyjny pomiar szumów wzmacniacza, z wejściem zwartym do masy (fioletowy),
- pomiar szumów stabilizatora (turkusowy)



Rys. 25 Widmo szumu wejściowego analizatora widma (żółty), szumu własnego wzmacniacza (fioletowy) oraz szumu stabilizatora napięcia (turkusowy)

Należy zauważyć, iż ten pomiar wykonany został w paśmie określonym w założeniach (500[kHz]), a szerokość filtra pasmowego została zmniejszona w porównaniu z poprzednim pomiarem, dlatego też poziomy szumu są niższe.

Jak widać poziom sygnału wyjściowego będącego wzmocnionym szumem stabilizatora jest większy niż sam szum wzmacniacza, co wskazuje na poprawność działania układu. Różnica ta wynosi ponad 10[dB], co potwierdza spełnienie założeń.

7.4. Pomiar wartości skutecznej szumu

Następnie podpięto wyjście układu do oscyloskopu, w celu analizy szumu w dziedzinie czasu. Poniżej przedstawiono oscylogramy szumu własnego wzmacniacza oraz wzmocnionego szumu stabilizatora.



Rys. 26 Sygnał na wyjściu wzmacniacza z wejściem zwartym do masy



Rys. 27 Sygnał wzmocnionego szumu stabilizatora

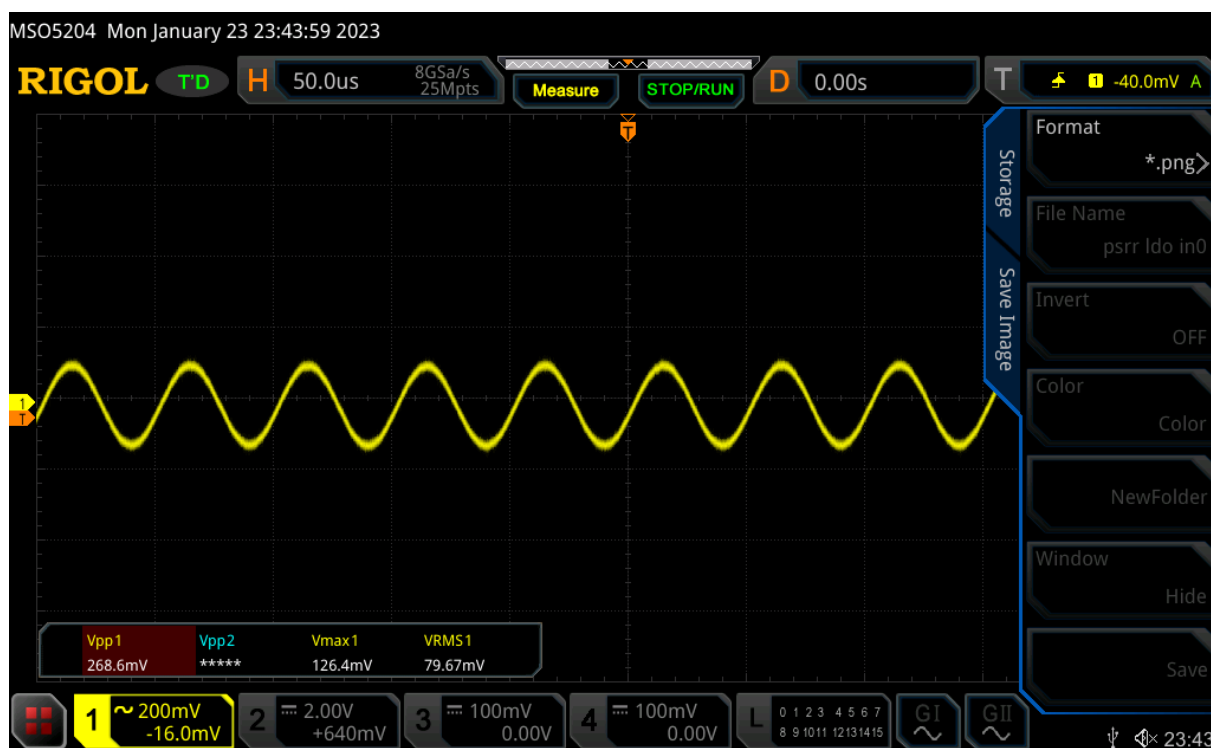
Międzyszczytowy szum stabilizatora z powyższych przebiegów można wyliczyć w następujący sposób:

$$V_{spp} = \frac{20.48[mV] - 2.905[mV]}{759} \approx 23.16[\mu V_{RMS}]$$

Zgadza się co do rzędu wielkości z szumem podanym w karcie katalogowej stabilizatora, który został podany jako $65[\mu V_{RMS}]$ dla obciążenia ok $3.3[mA]$.

7.5. Pomiar parametru PSRR

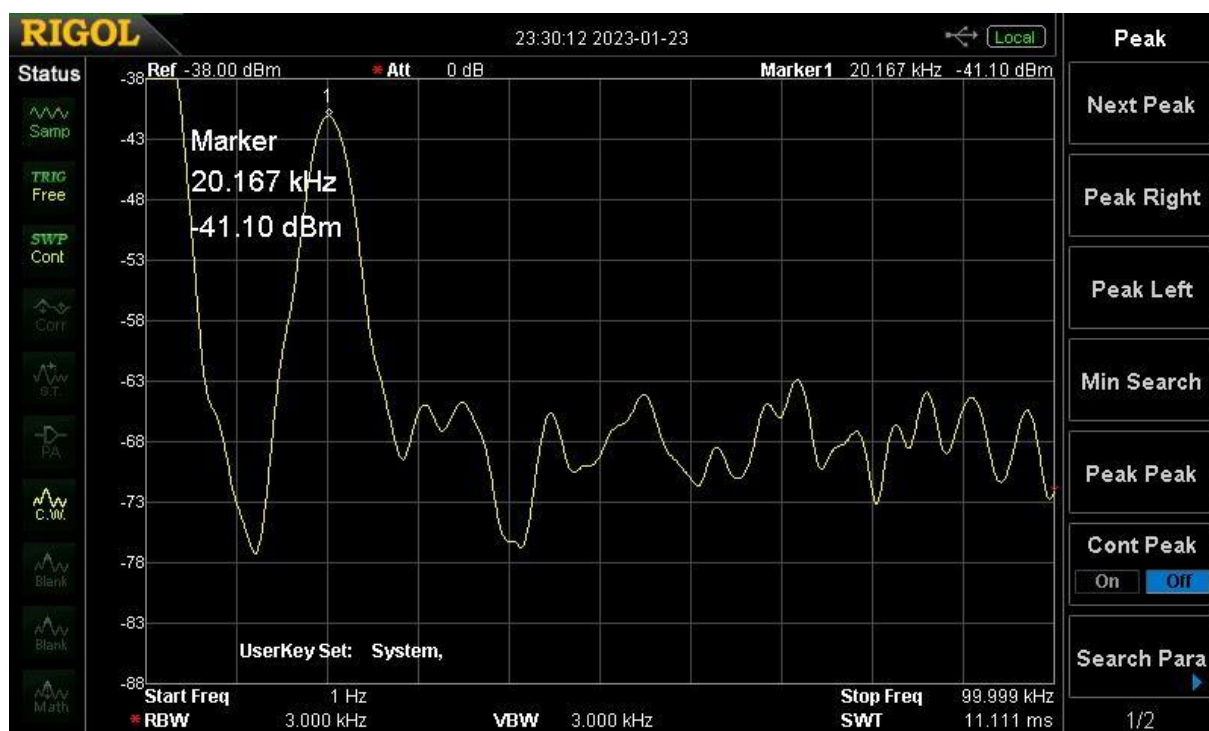
W celu wykonania pomiaru parametru PSRR na wejście opisanego wcześniej układu z wtórnikami emiterowym podano sygnał sinusoidalny z generatora. Poniższy wykres przedstawia sygnał uzyskany na wejściu stabilizatora napięcia, gdy podawany był sygnał o częstotliwości $20[kHz]$ i amplitudzie $80[mV_{RMS}]$:



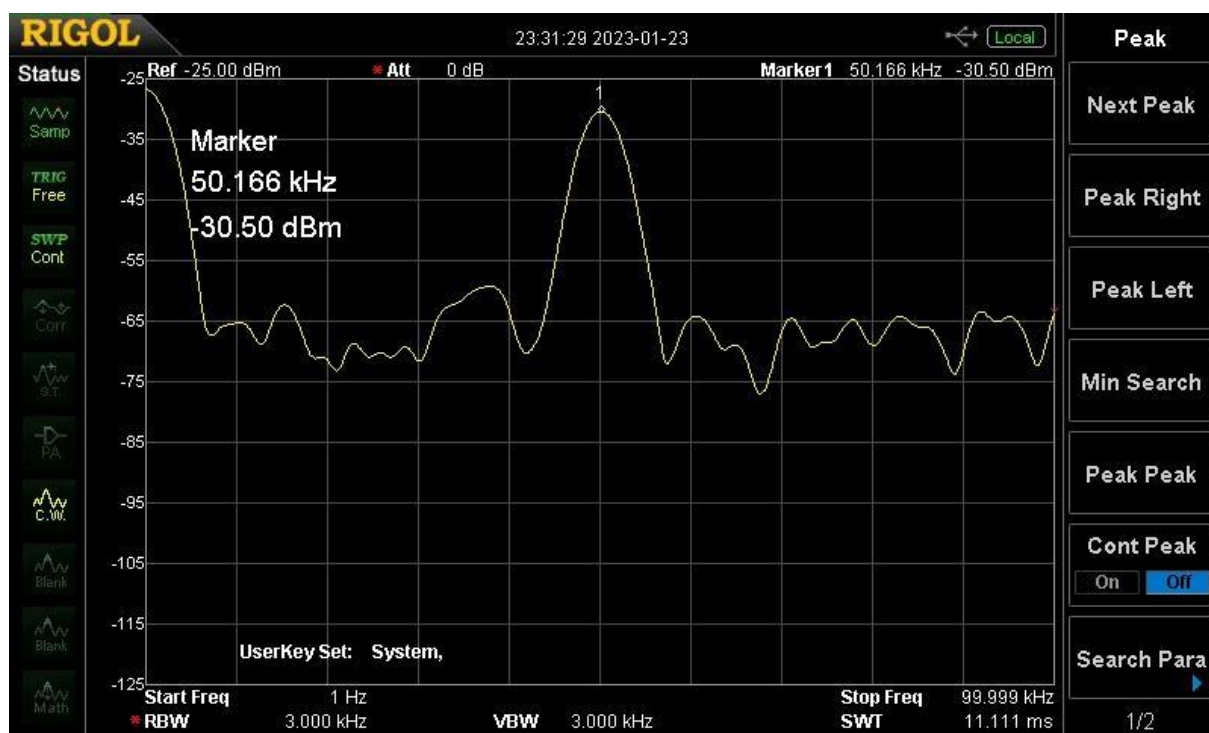
Rys. 28 Sygnał na emiterze tranzystora służącego do badania parametru PSRR

Na przebiegu została odcięta składowa stała. Zaobserwowany sygnał potwierdza prawidłowe działanie układu do wyznaczania parametru PSRR, zgadza się zarówno częstotliwość jak i amplituda sygnału.

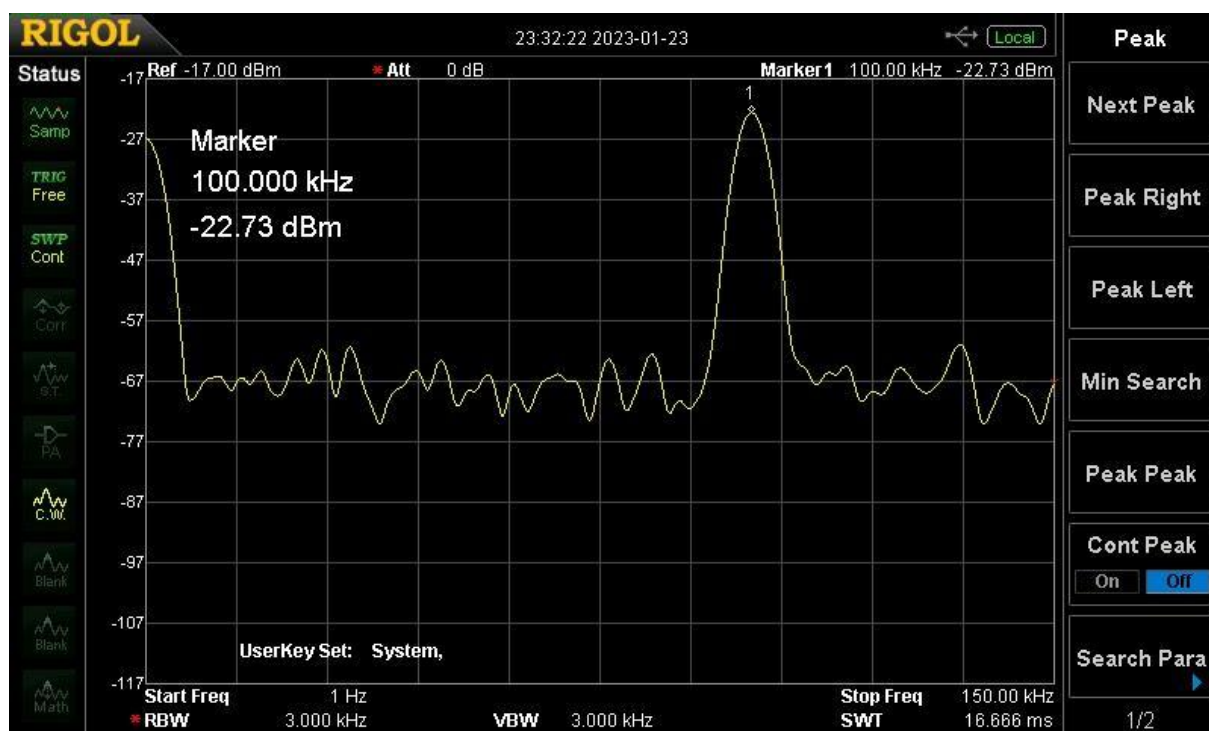
Następnie wykonano szereg pomiarów widma sygnału na wyjściu pierwszego stopnia wzmacniacza dla różnych częstotliwości sygnału sinusoidalnego podawanego na wejście układu. Wyniki te zostały zaprezentowane poniżej:



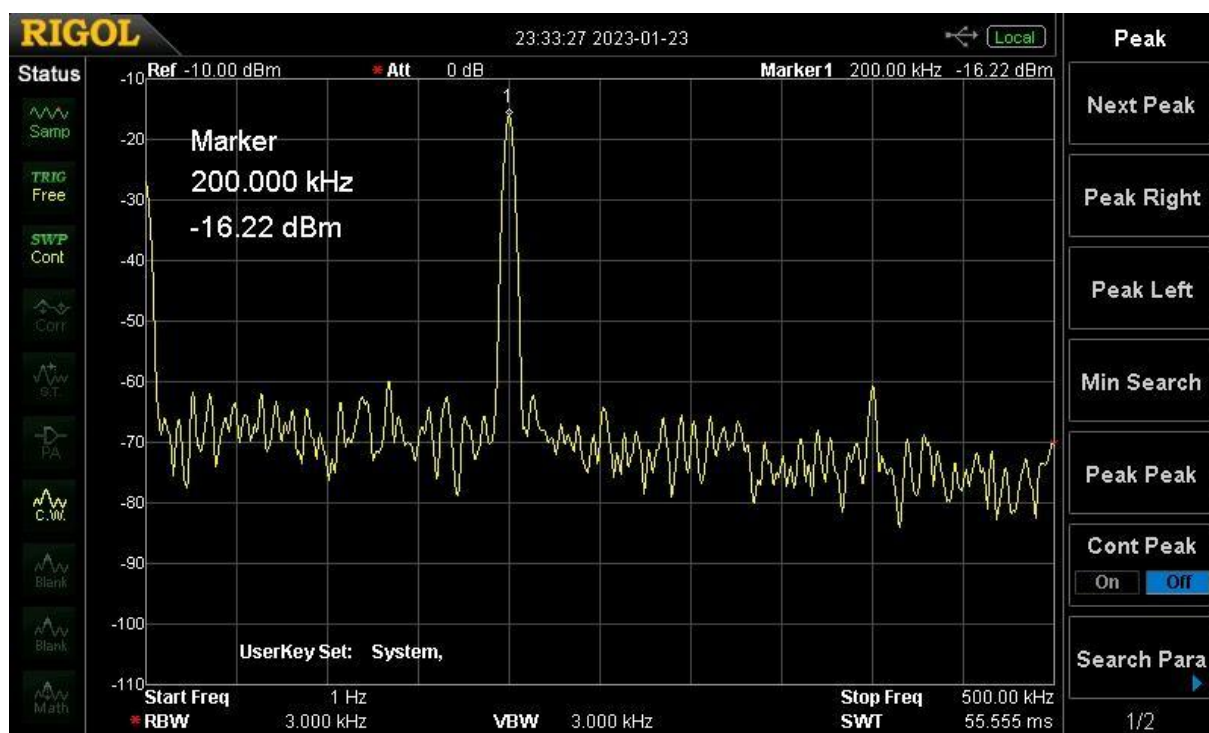
Rys. 29 Widmo wzmocnionego sygnału na wyjściu stabilizatora dla częstotliwości wejściowej 20[kHz]



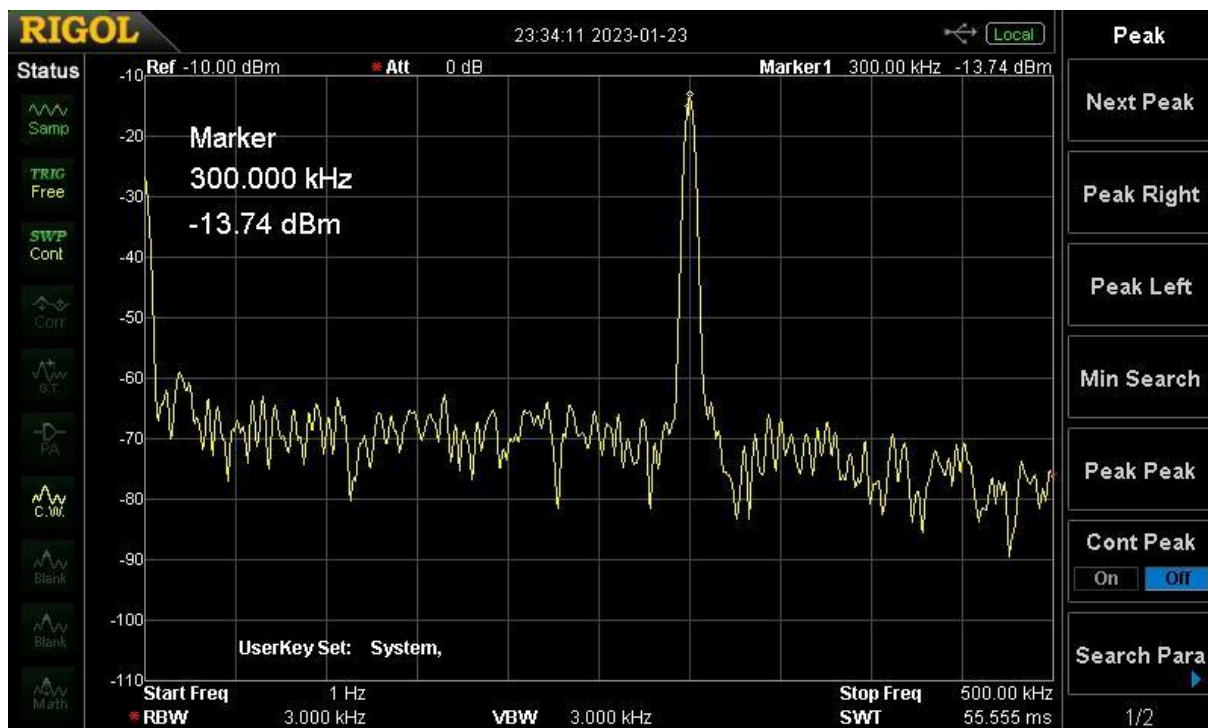
Rys. 30 Widmo wzmocnionego sygnału na wyjściu stabilizatora dla częstotliwości wejściowej 50[kHz]



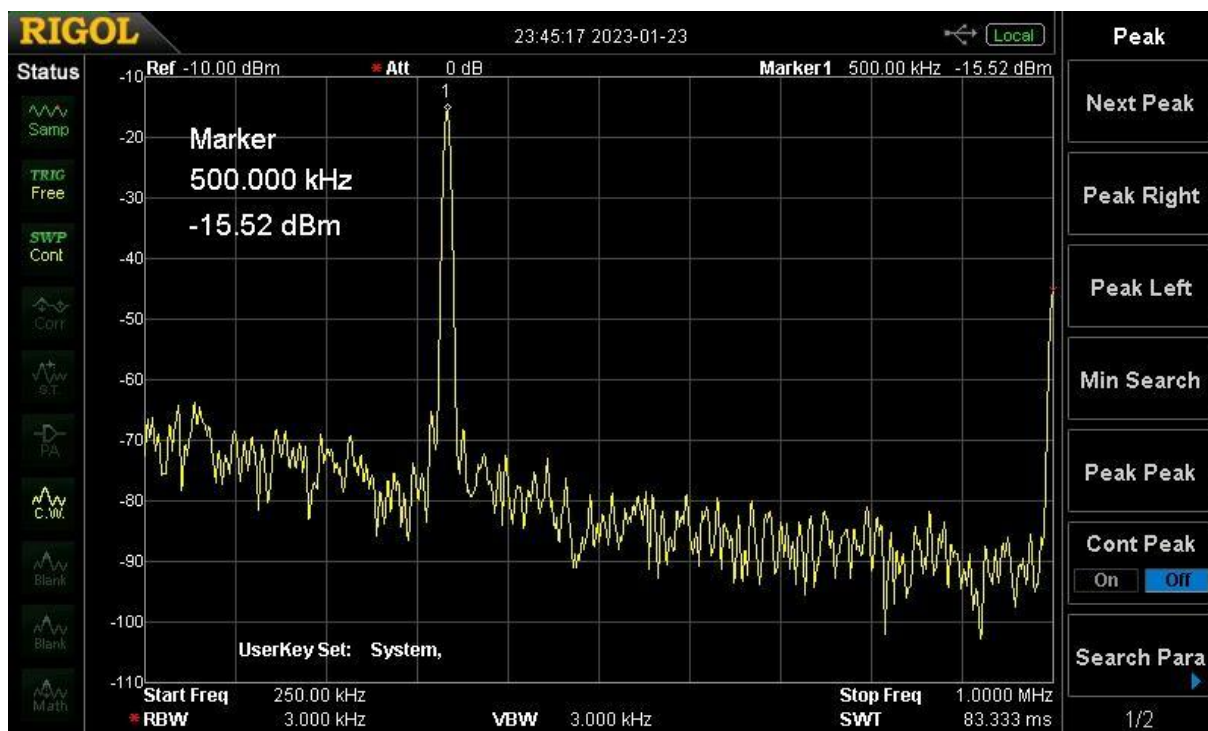
Rys. 31 Widmo wzmocnionego sygnału na wyjściu stabilizatora dla częstotliwości wejściowej 100[kHz]



Rys. 32 Widmo wzmocnionego sygnału na wyjściu stabilizatora dla częstotliwości wejściowej 200[kHz]



Rys. 33 Widmo wzmacnionego sygnału na wyjściu stabilizatora dla częstotliwości wejściowej 300[kHz]



Rys. 34 Widmo wzmacnionego sygnału na wyjściu stabilizatora dla częstotliwości wejściowej 500[kHz]

Na każdym z przebiegów widać dużą składową stałą napięcia potrzebną do działania stabilizatora oraz prążek wskazujący na obecność sygnału sinusoidalnego o określonej częstotliwości.

Znając wzmacnienie 1 stopnia wynoszące 18.4[dB] dla mocy, można obliczyć moc sygnału na wyjściu stabilizatora. Posiadając amplitudę RMS sygnału o danej częstotliwości podaną na wejście stabilizatora wynoszącą 80[mV RMS] oraz zakładając, że impedancja wejściowa stabilizatora jest znacznie większa niż 50[Ω] wyjście generatora, można obliczyć moc na wejściu stabilizatora:

$$P_{IN} = 10 \log \left(\frac{80[\text{mV}]^2}{50[\Omega]} \right) \approx -8.93[\text{dBm}]$$

Znając te wartości obliczono parametr PSRR dla zbadanych częstotliwości i wyniki zebrano w poniższej tabeli:

Częstotliwość sygnału [kHz]	Moc sygnału na wyjściu stabilizatora [dBm]	PSRR [dB]
20	-59.5	-50.57
50	-48.9	-39.97
100	-41.13	-32.2
200	-34.62	-25.69
300	-32.14	-23.21
500	-33.92	-24.99

Zbadane wartości pokrywają się w przybliżeniu się z danymi odczytanymi z karty katalogowej stabilizatora. Tak samo jak zostało to przedstawione na rys. 2, maksimum znajduje się w okolicach 400[kHz] dla obciążenia 10[mA].

8. Wnioski i podsumowanie

W ramach projektu przeprowadzono cały proces projektowania układu do pomiaru parametrów stabilizatora, składający się z:

- określenia założeń projektowych,
- wyboru komponentów,
- przeprowadzenia obliczeń oraz symulacji,
- projektu i wykonania płytki drukowanej,
- przeprowadzenia pomiarów

Wyznaczono charakterystykę częstotliwościową szumu stabilizatora oraz wzmacniacza, a także zbadano parametr PSRR dla różnych częstotliwości wejściowych. Opracowano wyniki pomiarów i porównano je z wynikami symulacji oraz danymi odczytanymi z kart katalogowych.

Zaprojektowany prototyp działa, a wyniki w większości pokrywają się z przewidywanymi.

Projekt był bardzo ciekawy i dał nam możliwość przeprowadzenia całego procesu projektowania układu co zdecydowanie było bardzo kształcące.