

Proiect CAIF

Tema: Proiectarea unei interfețe analogice, formată dintr-un filtru Rauch trece – bandă de ordinul 2 și un amplificator programabil, în baza specificațiilor și topologiilor date

Student: Melnic Anastasia

1. Specificații generale :

1.1 Schema bloc

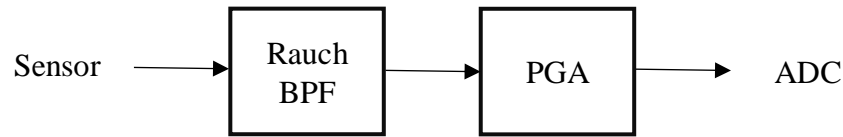


Figura 1 Schema bloc

În Figura 1 este reprezentată schema bloc a interfeței analogice proiectate.

Interfața analogică este un sistem care permite comunicarea între un dispozitiv digital (de ex. microcontroler) și lumea analogică (de ex. senzori). Aceasta:

- Primește sau transmite semnalele analogice;
- Le condiționează (filtrează, amplifică);
- Le pregătește pentru conversia în digital (printr-un ADC) sau invers (prin DAC);

Rolul elementelor din schema bloc (Figura 1):

- Senzorul măsoară o mărime fizică și o transformă într-un semnal electric analogic(tensiune).
- Filtrul trece-bandă elimină zgomotul și frecvențele nedorite din semnalul primit de la senzor. Păstrează o bandă specifică de frecvențe.
- Amplificatorul programabil amplifică semnalul analogic la un nivel optim pentru ADC, pentru a utiliza întreaga gamă a ADC-ului și a asigura o precizie mare a conversiei.
- ADC-ul convertește semnalul analogic, filtrat și amplificat, într-o valoare digitală.

1.2 Specificații Etaj 1 (Filtru)

Tip funcție de transfer	Topologie	Câștigul linear în banda de trecere $ H_0 $	$R_{intrare}$ minim	Q	BW	Liniaritate
Trece-bandă	Rauch	1	1 k Ω	0.707	1 kHz	Amplitudinea de la ieșire = (amplitudinea de la intrare) * (câștigul în banda de trecere) pentru un semnal armonic cu frecvența = frecvența centrală

Tabel 1 Specificații Etaj 1 (Filtru)

1.3 Specificații Etaj 2 (PGA)

Tip PGA	Castig minim	Rezolutie	Numar pasi	Castig maxim	Rin minim	Banda
Inversor, switch-uri in calea de semnal, conexiune serie	8 dB	3dB	4	17 dB	1 k Ω	Mai mare decat banda filtrului

Tabel 2 Specificații Etaj 2 (PGA)

2. Dimensionarea circuitului

2.1 Dimensionare FTB Rauch

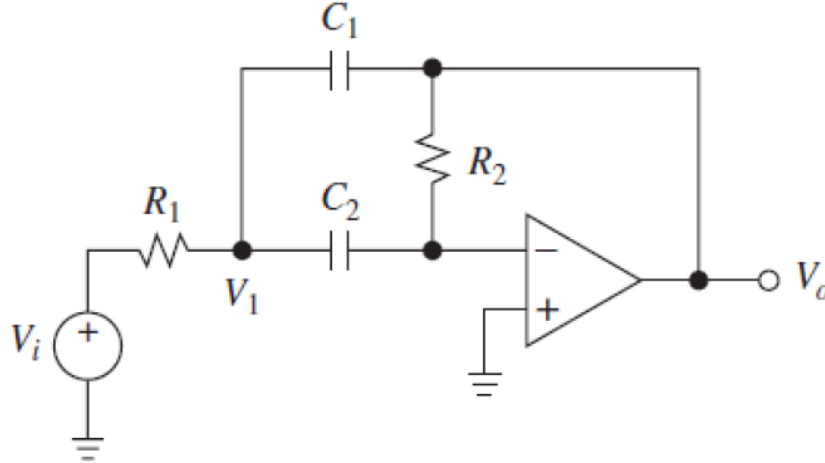


Figura 2 Filtru Rauch Trece-Banda

Formula funcției de transfer a filtrului este:

$$H(s) = \frac{H_0 \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot s + \omega_0^2} \quad (1)$$

Pulsăția centrală este:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2)$$

Factorul de calitate este:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}{\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}} \quad (3)$$

Câștigul la frecvența centrală este:

$$H_0 = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{C_1}{C_2}} \quad (4)$$

Consider $C_1 = C_2 = C$. Formulele (2), (3), (4) devin:

$$\omega_0 = \frac{1}{C \cdot \sqrt{R_1 R_2}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (6)$$

$$H_0 = -\frac{R_2}{2R_1} \quad (7)$$

În formula (7), semnul “-” din fața raportului indică faptul că semnalul de ieșire e în antifază față de semnalul de intrare. În continuare, pentru dimensionarea filtrului voi folosi $|H_0|$.

Ținând cont că frecvența centrală f_0 este:

$$f_0 = BW \cdot Q \quad (8)$$

am determinat expresiile pentru dimensionarea rezistențelor:

$$R_1 = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot |H_0| \cdot BW} \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{\pi \cdot BW} \quad (10)$$

Pentru $C=65 \text{ nF}$, am obținut $R_1=2448 \text{ } \Omega$ și $R_2=4897 \text{ } \Omega$.

Am folosit în circuit amplificatorul operațional LT1357, pe care l-am alimentat cu $\pm 5 \text{ V}$.

În Figura 3 e reprezentat circuitul în LTspice:

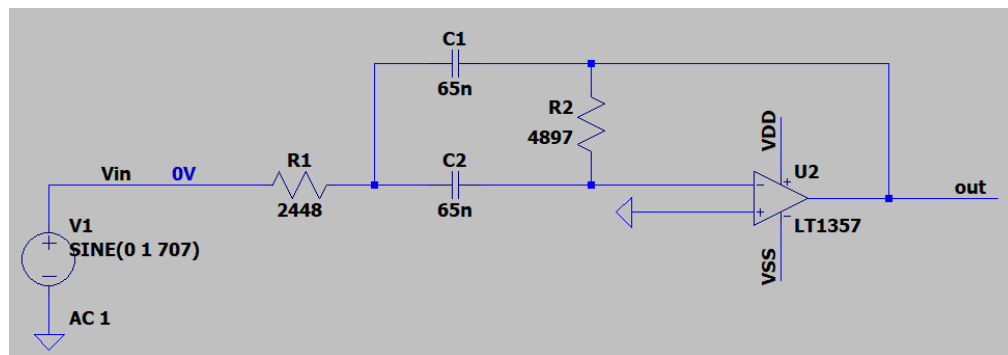


Figura 3 Filtru Rauch Trece-Banda dimensionat

Pentru a asigura o implementare corectă a circuitului pe breadboard, am măsurat cu multimetrul valorile exacte ale rezistențelor. Capacitatea condensatorului am

determinat-o experimental, cu ajutorul unui filtru RC, și am observat că, deși condensatorul este marcat ca având o valoare nominală de 100nF, capacitatea efectivă măsurată este de aproximativ 65nF, ceea ce indică o toleranță mare a componentelor.

Pentru a obține $R_1 \approx 2.45k\Omega$, am conectat în serie 3 rezistențe de $2.2k\Omega$, 220Ω și 33Ω , iar pentru $R_2 \approx 4.9k\Omega$, am conectat în serie 1 rezistență de $4.7k\Omega$ și 2 rezistențe de câte 150Ω . Am folosit 2 condensatoare cu capacitatea nominală de 100nF (valoarea măsurată este 65nF).

În Figura 4 este reprezentat montajul pe breadboard:

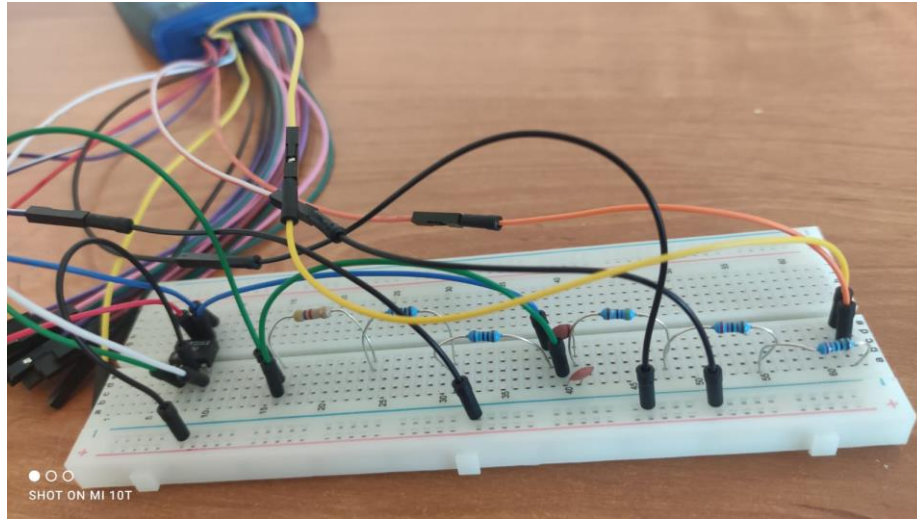


Figura 4 Filtru Rauch Trece-Banda, montaj experimental

2.3 Dimensionare PGA

Conform specificatiilor, $|A_v| = \{8dB, 11dB, 14dB, 17dB\} = \{2.51V/V, 3.54V/V, 5.01V/V, 7.07V/V\}$. Am dimensionat PGA-ul în baza formulelor:

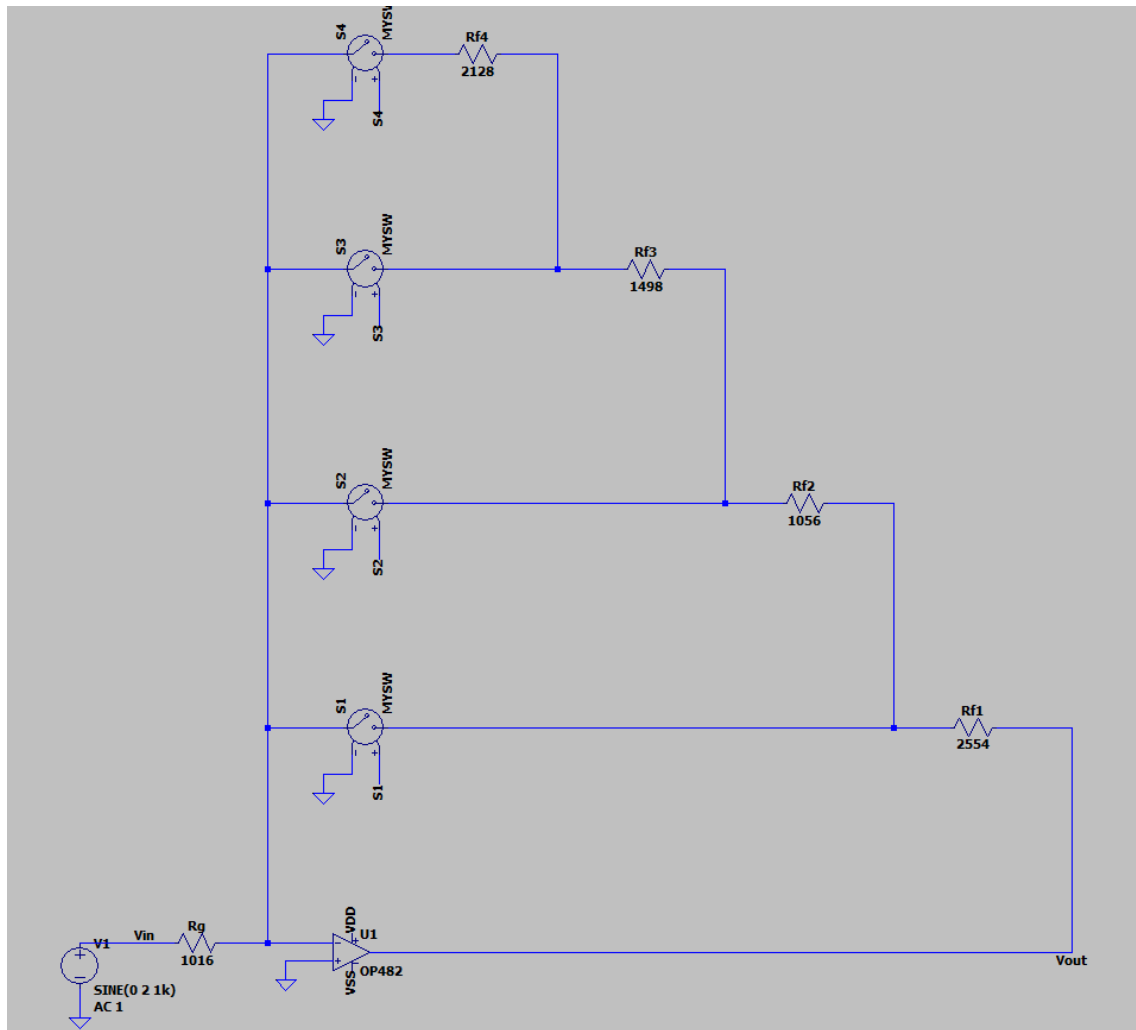
$$|A_{V1}| = \frac{R_{F1}}{R_G} = 2.51$$

$$|A_{V2}| = \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_G} = 3.54$$

$$|A_{V3}| = \frac{R_{F1} + R_{F2} + R_{F3}}{R_G} = 5.01$$

$$|A_{V4}| = \frac{R_{F1} + R_{F2} + R_{F3} + R_{F4}}{R_G} = 7.07$$

Am ales $R_G=1016\Omega$ si am determinat $R_{F1}=2554\Omega$, $R_{F2}=1056\Omega$, $R_{F3}=1498\Omega$ si $R_{F4}=2128\Omega$.



3 Verificarea și caracterizarea ansamblului FTB+PGA

3.1 Verificarea și caracterizarea filtrului Rauch Trece-Banda prin simulari

Rezultatele analizei DCOP sunt reprezentate în Figura 5. Observăm că, $V(\text{out}) \approx 0\text{V}$, adică exact la mijlocul domeniului de alimentare. Prin urmare, semnalul de ieșire va putea oscila simetric în jurul acestui punct, fără a fi distorsionat. Curenții prin condensatori sunt practic nuli, deoarece, în regim DC, condensatorii se comportă ca întreruperi de circuit. Diferența de tensiune dintre bornele de intrare ale amplificatorului operațional este aproximativ nulă, ceea ce confirmă funcționarea AO-ului în regiunea liniară.

* C:\Users\EMELNIAP8\Downloads\P1_Filtru_Practic\Bicuazi_Ord2\

--- Operating Point ---		
V(vdd):	5	voltage
V(vss):	-5	voltage
V(vin):	0	voltage
V(out):	0.000590569	voltage
V(n001):	9.397e-20	voltage
V(-):	-8.94863e-09	voltage
I(C1):	3.8387e-23	device_current
I(C2):	5.81661e-28	device_current
I(R1):	3.83864e-23	device_current
I(R2):	-1.206e-07	device_current
I(V3):	-0.00171378	device_current
I(V4):	0.0017139	device_current
I(V1):	3.83864e-23	device_current
Ix(u2:1):	1.206e-07	subckt_current
Ix(u2:2):	1.206e-07	subckt_current
Ix(u2:3):	0.00171378	subckt_current
Ix(u2:4):	-0.0017139	subckt_current
Ix(u2:5):	-1.206e-07	subckt_current

Figura 5 Punctul static de funcționare

Pentru a determina domeniul tensiunii de intrare de mod comun, am conectat ambele intrări ale filtrului la o sursă de tensiune VDC, apoi am rulat o analiză DC Sweep în care am variat tensiunea generată de sursa respectivă între -5V și +5V. În Figura 6 este circuitul folosit pentru a măsura domeniul tensiunii de intrare de mod comun:

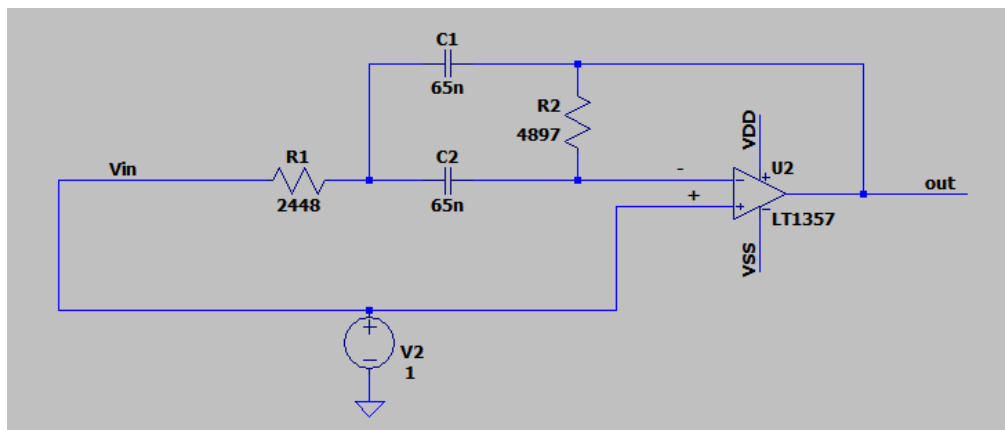


Figura 6 Configurație pentru determinarea domeniului tensiunii de intrare de mod comun

În Figura 7 sunt reprezentate rezultatele analizei DC Sweep. În graficul de sus este afișat $V(\text{out})$, iar în cel de jos $|V(+)-V(-)|$. Domeniul tensiunii de intrare de mod comun este intervalul pentru care AO-ul operează în regim linear, adică $V(\text{out})$ e proporțional cu tensiunea de intrare V_2 , iar $|V(+)-V(-)| \approx 0$. În urma măsurărilor, am obținut **domeniul tensiunii de intrare de mod comun = $[-3.3\text{V} ; +3.6\text{V}]$** , ceea ce corespunde valorilor din datasheet-ul LT1357 ($[-3.5\text{V} ; +3.5\text{V}]$) pentru alimentarea la $\pm 5\text{V}$. Domeniul tensiunii de ieșire de mod comun corespunde domeniului tensiunii de intrare de mod comun.

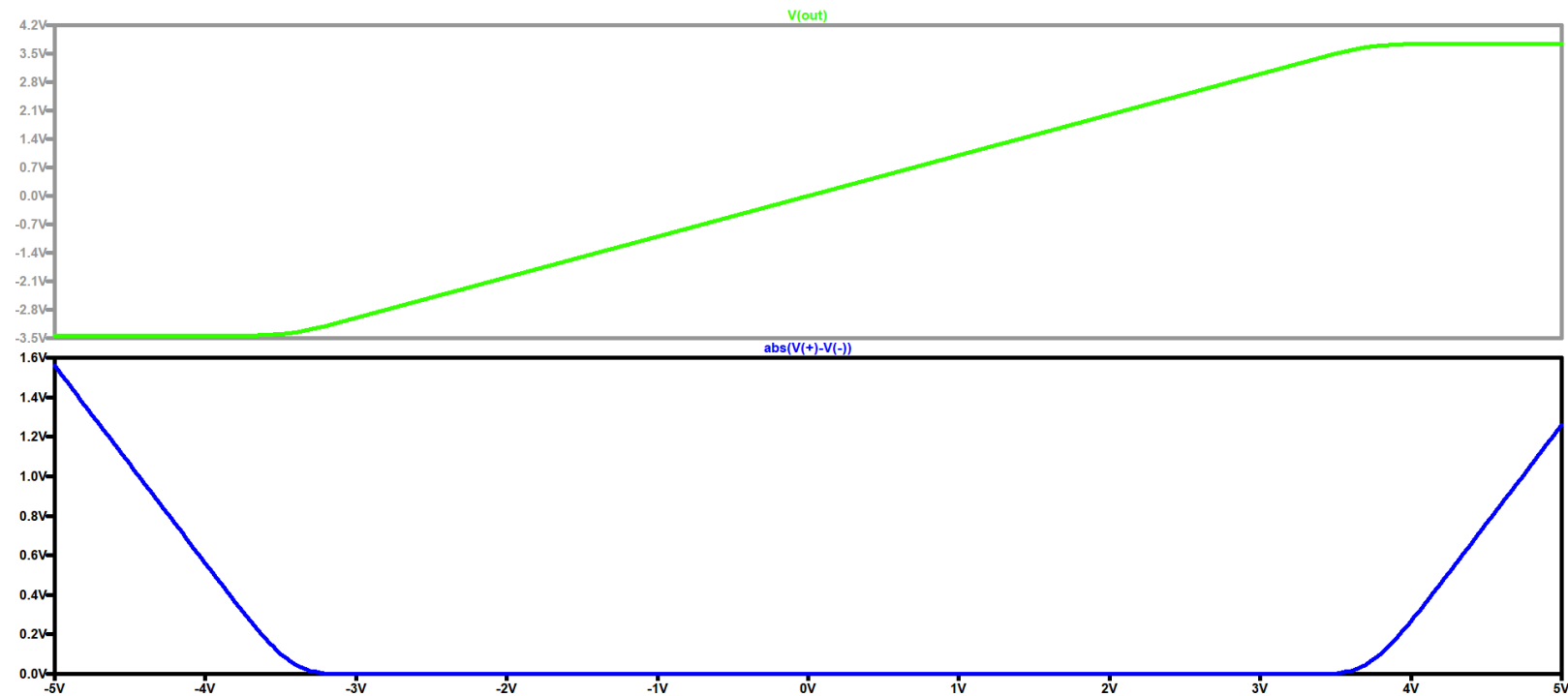


Figura 7 DC Sweep pentru determinarea domeniului tensiunii de intrare de mod comun

Consumul de curent al circuitului $I_{\text{total}} \approx |I(V3)| + |I(V4)| \approx 3.43\text{mA}$.

Pentru a măsura banda de trecere a filtrului și câștigul în banda de trecere, am rulat o analiză AC și am afișat pe grafic $V(\text{out})$. Rezultatul simulării poate fi vizualizat în Figura 8. Am obținut $|H_0| = 1.5\text{mdB}$ la frecvența centrală și $\text{BW} = 999\text{Hz}$, ceea ce corespunde specificațiilor.

Am determinat domeniul liniar al ieșirii (Output Swing) $[-4.12\text{V} ; +4.12\text{V}]$, rulând analize transient pentru semnale de intrare de amplitudini diferite. Domeniul liniar al ieșirii definește tensiunea maximă pe care amplificatorul operațional o poate furniza la ieșire fără distorsiuni. În Figura 9 observăm că $V(\text{out})$ este distorsionat și limitat la $\pm 4.12\text{V}$.

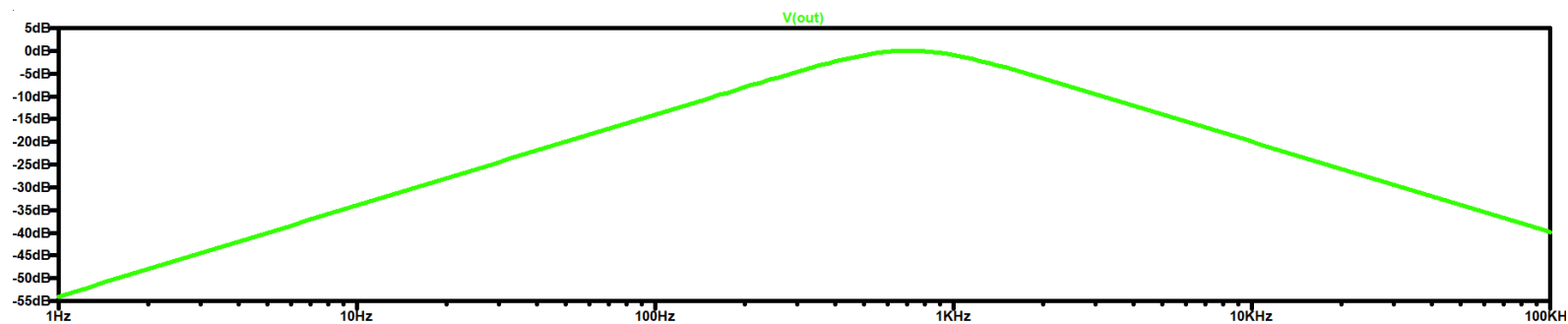


Figura 8 AC Analysis pentru filtru Rauch Trece-Bandă

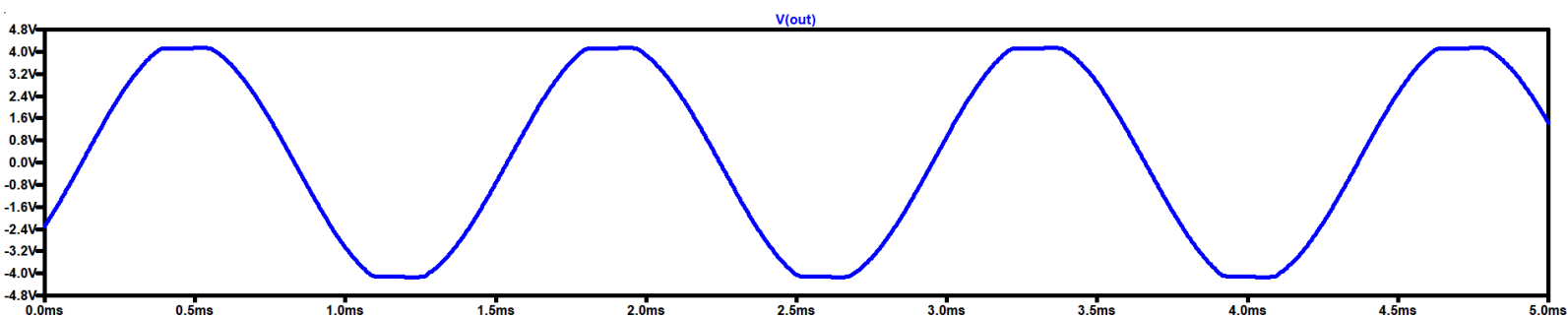


Figura 9 Limitarea semnalului de ieșire al FTB Rauch din cauza constrângerilor de output swing ale amplificatorului operațional

În Figura 10 este prezentat THD-ul pentru un semnal de intrare sinusoidal, cu amplitudinea 1V și frecvența 707Hz, iar în Figura 11 este ilustrat semnalul de ieșire corespunzător aceluiași semnal de intrare. Se poate observa că $THD = 0\%$, iar $V(out)$ păstrează amplitudinea de 1V, ceea ce confirmă că filtrul funcționează în regim liniar.

Harmonic Number	Frequency [Hz]
1	7.070e+2
2	1.414e+3
3	2.121e+3
4	2.828e+3
5	3.535e+3
6	4.242e+3
7	4.949e+3
8	5.656e+3
9	6.363e+3
10	7.070e+3
Partial Harmonic Distortion: 0.000115%	
Total Harmonic Distortion: 0.000000%	

Total elapsed time: 0.234 seconds.

Figura 10 Total Harmonic Distortion pentru un semnal de intrare sinusoidal cu frecvența 707 Hz și amplitudinea 1V

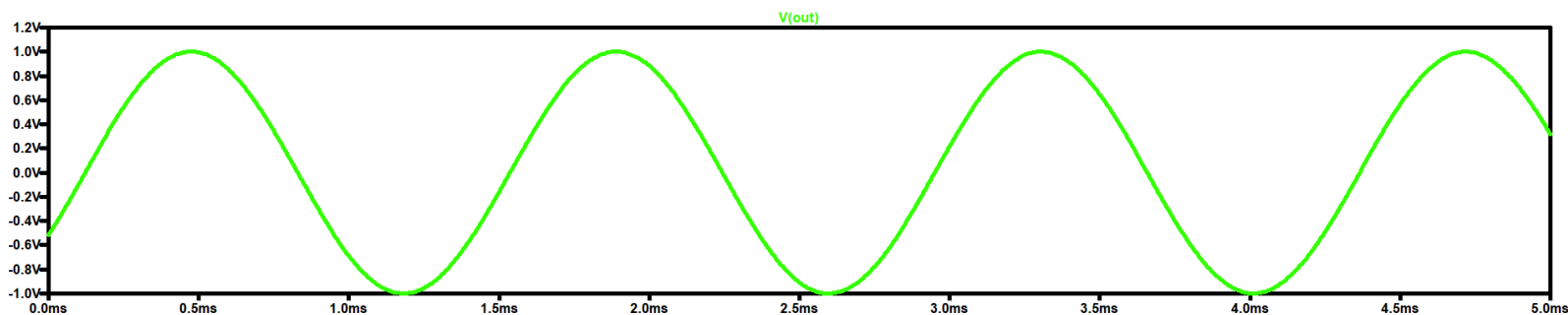


Figura 11 Semnalul de iesire din FTB Rauch, pentru un semnal de intrare sinusoidal cu frecvența 707 Hz și amplitudinea 1V

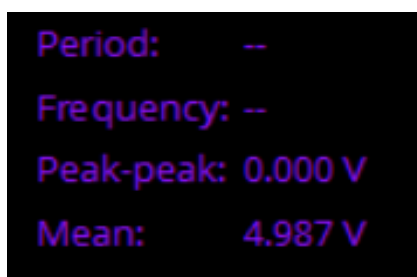
3.2 Verificarea și caracterizarea filtrului Rauch Trece-Bandă prin măsurători experimentale

Am verificat punctul static de funcționare (PSF), conectând intrarea filtrului la masă și măsurând cu osciloscopul din Scopy valorile tensiunilor și a curenților din circuit.

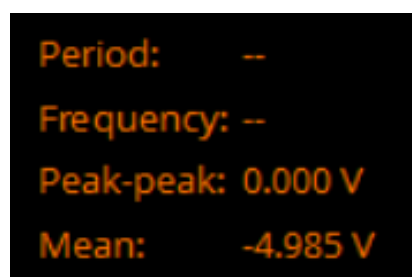
Am obținut tensiunea pozitivă de alimentare a amplificatorului operațional $V_{dd} \approx 4.99V$ (Figura 12a), iar tensiunea negativă de alimentare a AO-ului, $V_{ss} \approx -4.99V$ (Figura 12b). Tensiunea de intrare în circuit este $V_{in} \approx -2.27mV$ (Figura 12c), iar tensiunea de ieșire este $V_{out} \approx -24.15mV$ (Figura 12d). Tensiunile la bornele inversoare (Figura 12e) și neinversoare (Figura 12f) sunt $V_{-} \approx 3.07mV$ și $V_{+} \approx 1.81mV$.

Curenții prin R1 și R2 sunt de ordinul pA.

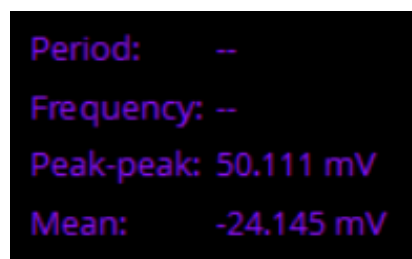
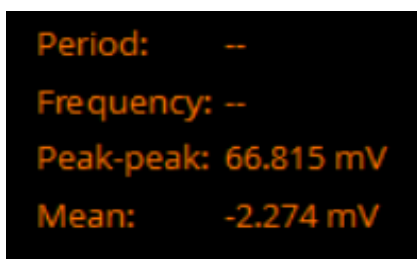
Rezultatele obținute confirmă funcționarea corectă a circuitului în regim liniar. Abaterile minore de la valorile teoretice se datorează toleranțelor componentelor și zgometului la măsurători, și nu afectează performanța dinamică a filtrului.



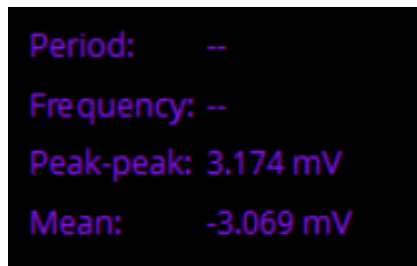
a) V_{dd}



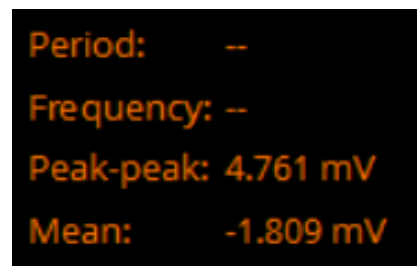
b) V_{ss}



c) V_{in}



d) V_{out}



e) V_-

f) V_+

Figura 12 Valorile tensiunilor în circuit, când intrarea e conectată la masă

Pentru a determina câștigul în banda de trecere și lățimea benzii de trecere, am folosit Network Analyzer (Figura 13). Am obținut câștigul la frecvența centrală $H_0 = -0.14 \text{ dB}$ (Figura 14), iar $BW = 1.043 \text{ kHz}$ (Figura 15).

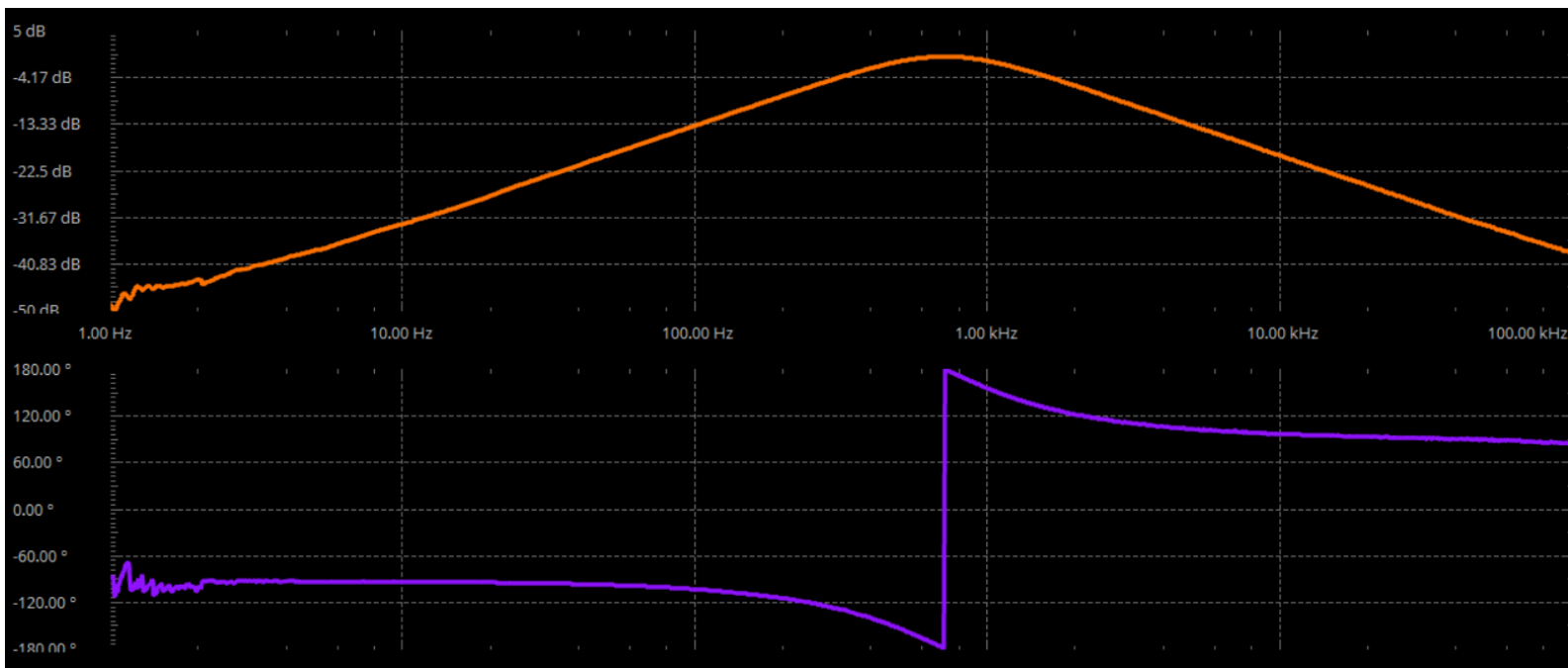


Figura 13 Răspunsul în frecvență a filtrului Rauch trece-bandă

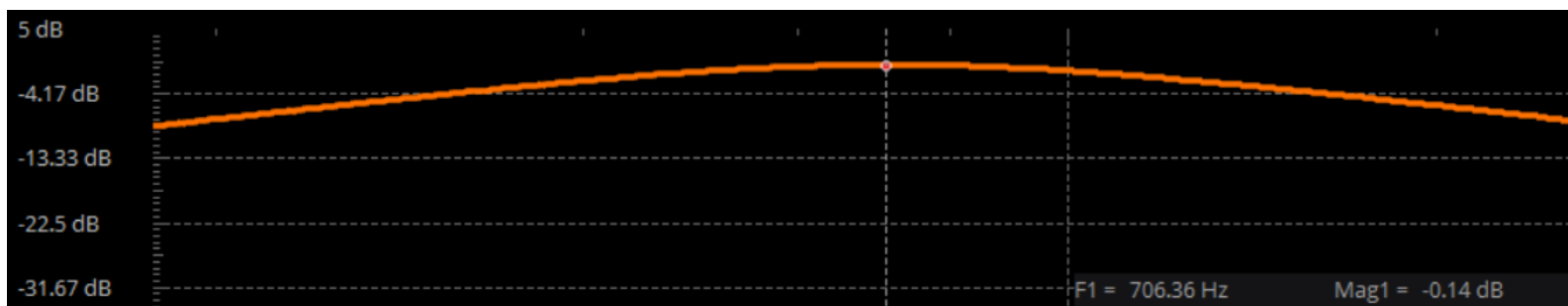


Figura 14 Câștigul la frecvența centrală (707 Hz)

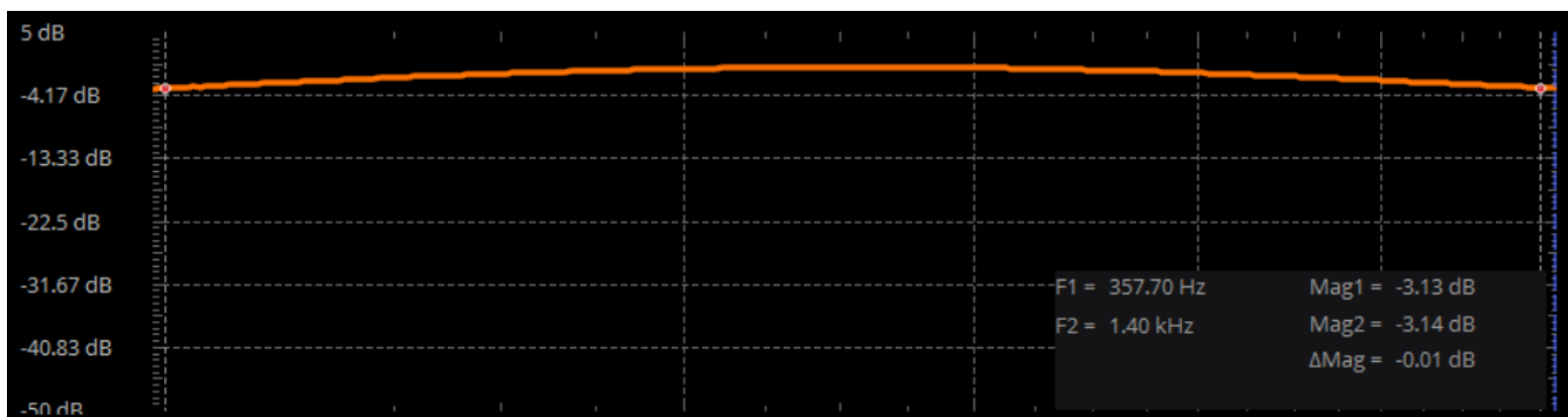


Figura 15 Lățimea benzii de trecere (BW)

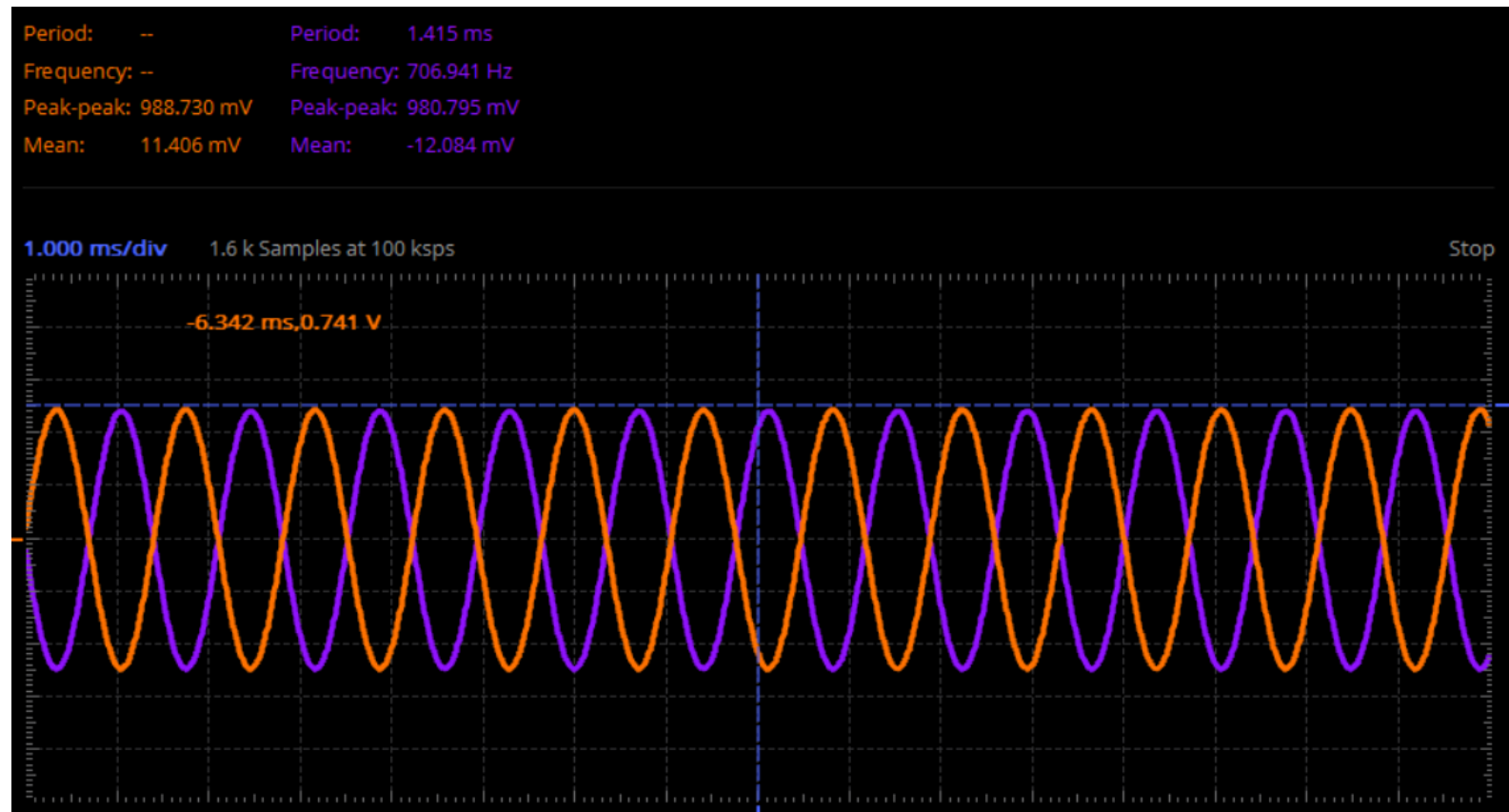


Figura 16 Răspunsul filtrului la un semnal de intrare sinusoidal, de frecvență 707Hz și amplitudine vârf la vârf 1V

THD (Total Harmonic Distortion) măsoară cât de mult este distorsionat un semnal față de forma sa ideală. Am calculat THD-ul filtrului montat pe breadboard, în baza primelor 10 armonici, folosind formula (11):

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{2\text{RMS}}^2 + V_{3\text{RMS}}^2 + V_{4\text{RMS}}^2 + V_{5\text{RMS}}^2 + V_{6\text{RMS}}^2 + V_{7\text{RMS}}^2 + V_{8\text{RMS}}^2 + V_{9\text{RMS}}^2 + V_{10\text{RMS}}^2}}{V_{1\text{RMS}}}$$

Am măsurat valorile efective (RMS) ale armonicilor cu Spectrum Analyzer-ul din Scopy. Pentru o precizie maximă, am selectat Gain Mode = High, care e eficient pentru semnalele între -2.5V și +2.5V, și am folosit fereastra Flat Top, care asigură cea mai mare precizie în măsurarea amplitudinii, atât pentru armonica fundamentală, cât și pentru cele secundare. Rezultatul transformatei Fourier (FFT) este prezentat în Figura 17.



Figura 17 Spectrul semnalului de ieșire al filtrului

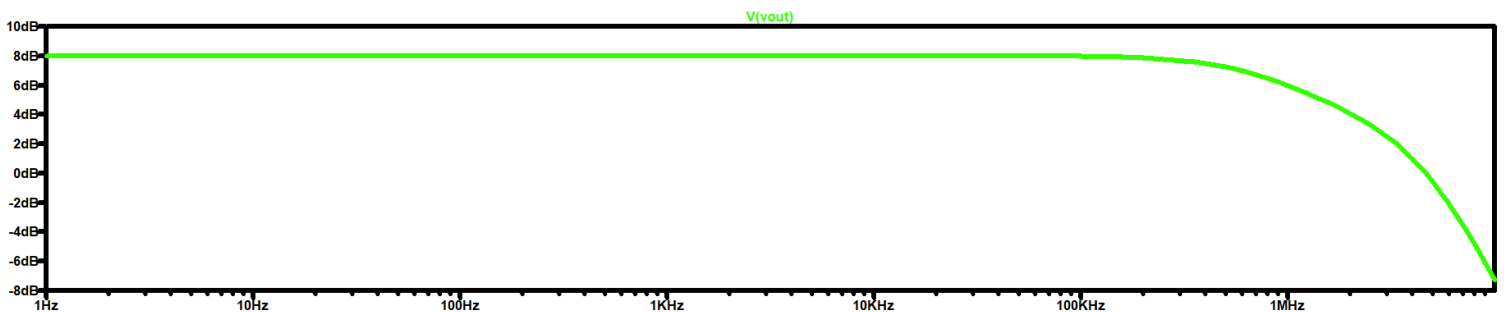
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{0.00174^2 + 0.002055^2 + 0.000171^2 + 0.000345^2 + 0.000633^2 + 0.000186^2 + 0.000176^2 + 0.000237^2 + 0.00016^2}}{0.684} \cdot 100\% = \mathbf{0.41\%}$$

3.3 Verificarea și caracterizarea PGA-ului prin simulari

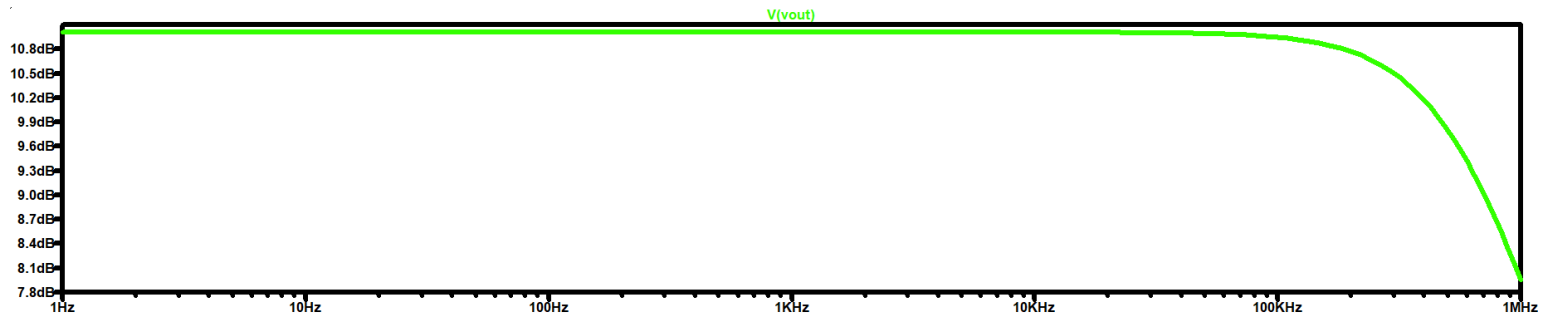
Punctul static de functionare:

```
--- Operating Point ---  
  
V(vdd) :      5      voltage  
V(s1) :       0      voltage  
V(s2) :       0      voltage  
V(s3) :       0      voltage  
V(s4) :       1      voltage  
V(n001) :    -0.00058627 voltage  
V(n005) :    -0.00326535 voltage  
V(n004) :    -0.00265882 voltage  
V(n003) :    -0.00180152 voltage  
V(n002) :    -0.00058627 voltage  
V(vss) :     -5      voltage  
V(vout) :   -0.00473912 voltage  
V(vin) :       0      voltage  
I(Rg) :     -5.77037e-07 device_current  
I(Rf4) :     -5.71077e-07 device_current  
I(Rf3) :     -5.72293e-07 device_current  
I(Rf2) :     -5.74365e-07 device_current  
I(Rf1) :     -5.77044e-07 device_current  
I(S1) :     -2.67908e-09 device_current  
I(S2) :     -2.07255e-09 device_current  
I(S3) :     -1.21525e-09 device_current  
I(S4) :     -5.71077e-07 device_current  
I(V2) :     -0.00100412 device_current  
I(V4) :       0      device_current  
I(V5) :       0      device_current  
I(V6) :       0      device_current  
I(V7) :       0      device_current  
I(V8) :     0.00100412 device_current  
I(V1) :     -5.77037e-07 device_current  
Ix(u1:1) :    7.90331e-13 subckt_current  
Ix(u1:2) :   -7.15573e-12 subckt_current  
Ix(u1:3) :    0.00100412 subckt_current  
Ix(u1:4) :   -0.00100412 subckt_current  
Ix(u1:5) :    5.77044e-07 subckt_current
```

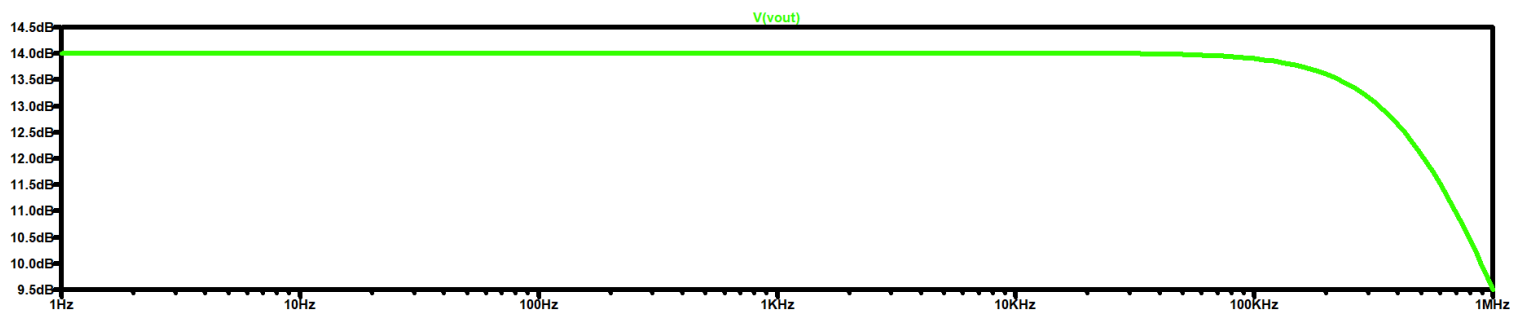
Prima treapta a castigului: $|A_{V1}|=8\text{dB}$, $BW=1.46\text{MHz}$.



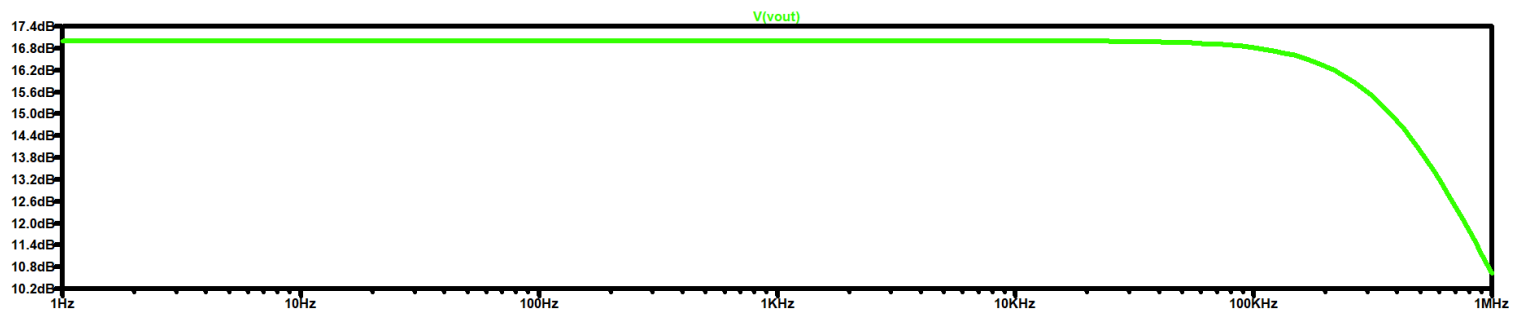
A 2-a treapta a castigului: $|A_{v2}|=11\text{dB}$, $\text{BW}=985\text{kHz}$.



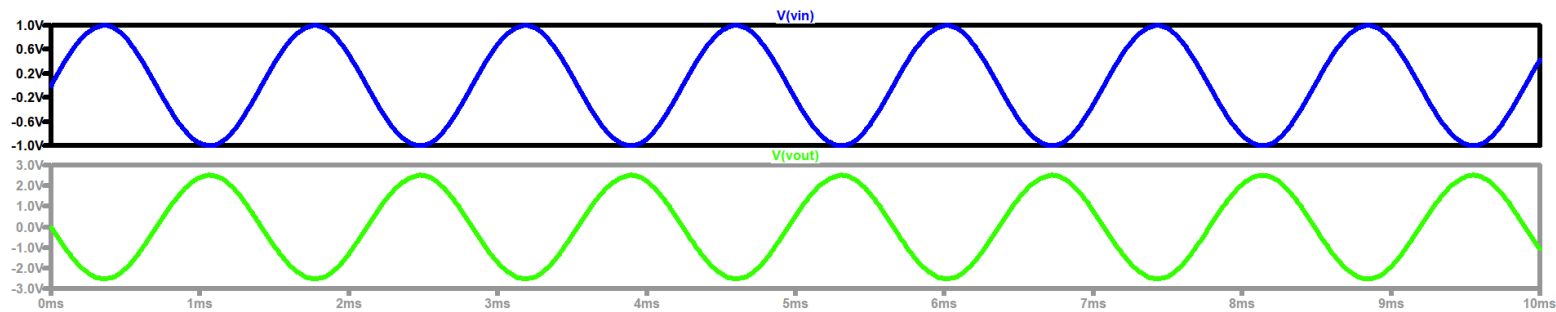
A 3-a treapta a castigului: $|A_{v3}|=14\text{dB}$, $\text{BW}=694\text{kHz}$.



A 4-a treapta a castigului: $|A_{v4}|=17\text{dB}$, $\text{BW}=497\text{kHz}$.



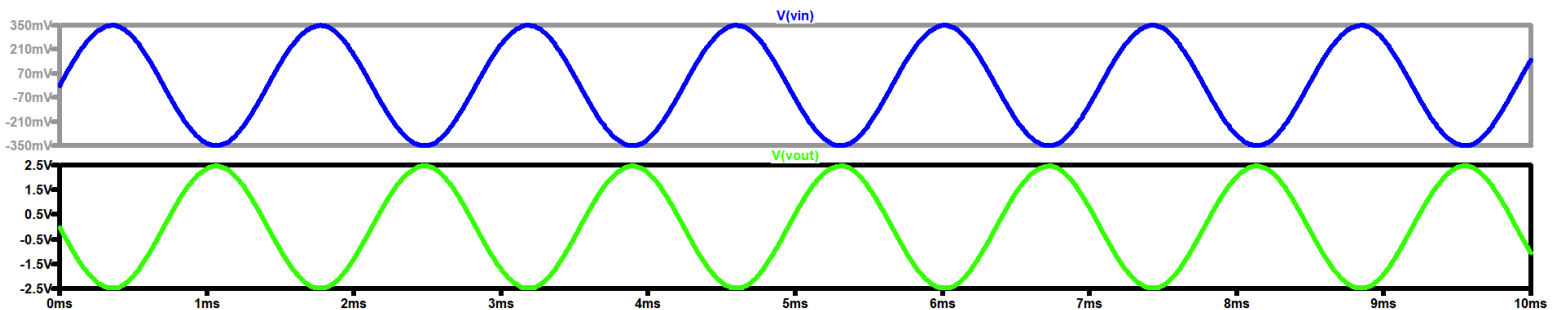
Pentru a analiza liniaritatea circuitului, am aplicat la intrare un semnal de amplitudinea maxima 1V si am selectat treapta de castig minim pentru PGA:



THD :

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component
1	7.070e+2	2.513e+0
2	1.414e+3	1.312e-8
3	2.121e+3	3.427e-5
4	2.828e+3	1.093e-8
5	3.535e+3	3.167e-5
6	4.242e+3	9.739e-9
7	4.949e+3	2.800e-5
8	5.656e+3	1.641e-8
9	6.363e+3	2.350e-5
10	7.070e+3	1.409e-8
Partial Harmonic Distortion:		0.002359%
Total Harmonic Distortion:		0.000000%

Apoi am aplicat la intrare un semnal sinusoidal cu amplitudinea 0.35V si am selectat treapta de castig maxim pentru PGA:

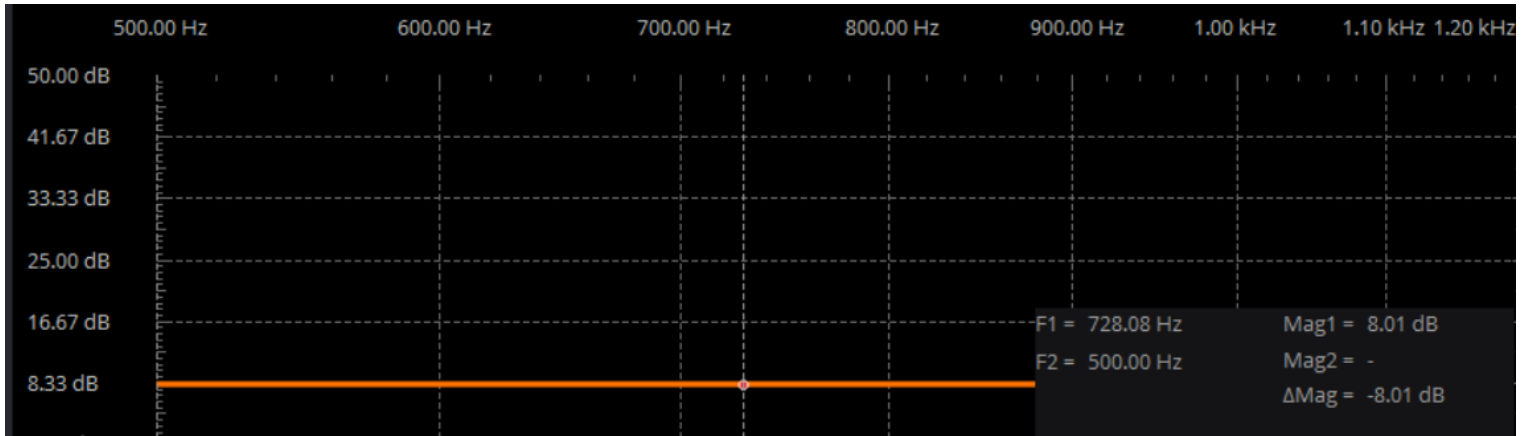


THD:

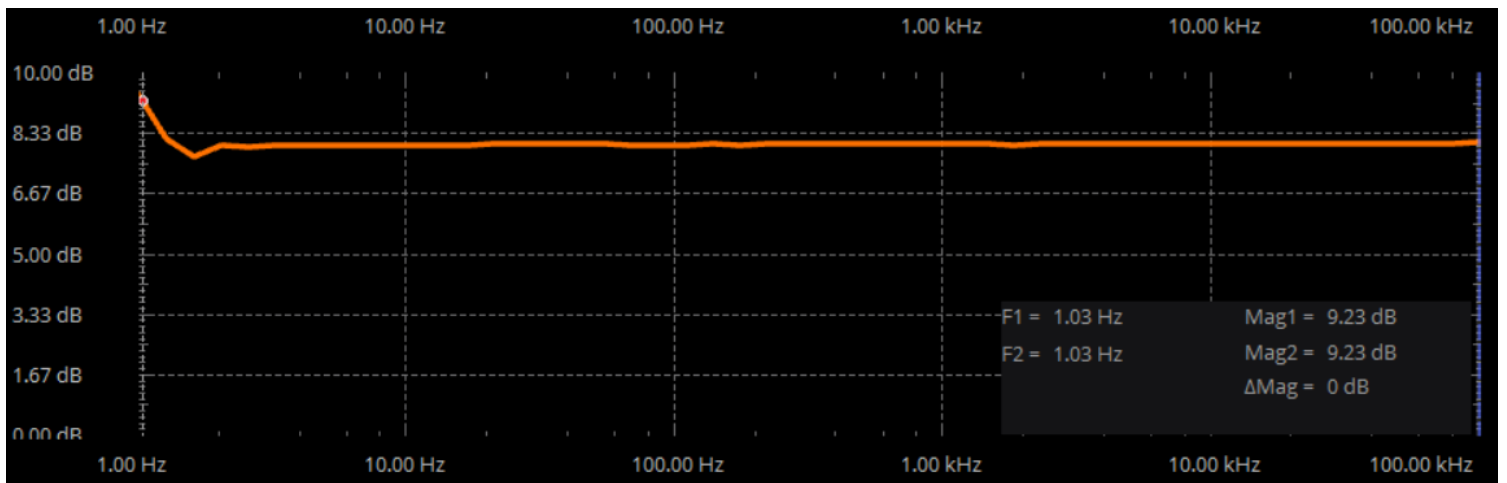
Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component
1	7.070e+2	2.478e+0	1.000e+0
2	1.414e+3	1.049e-6	4.233e-7
3	2.121e+3	1.653e-4	6.670e-5
4	2.828e+3	2.019e-6	8.149e-7
5	3.535e+3	1.528e-4	6.166e-5
6	4.242e+3	2.885e-6	1.164e-6
7	4.949e+3	1.388e-4	5.603e-5
8	5.656e+3	3.579e-6	1.444e-6
9	6.363e+3	1.250e-4	5.044e-5
10	7.070e+3	4.053e-6	1.636e-6
Partial Harmonic Distortion:		0.011807%	
Total Harmonic Distortion:		0.000000%	

3.4 Verificarea și caracterizarea PGA-ului prin măsurători experimentale

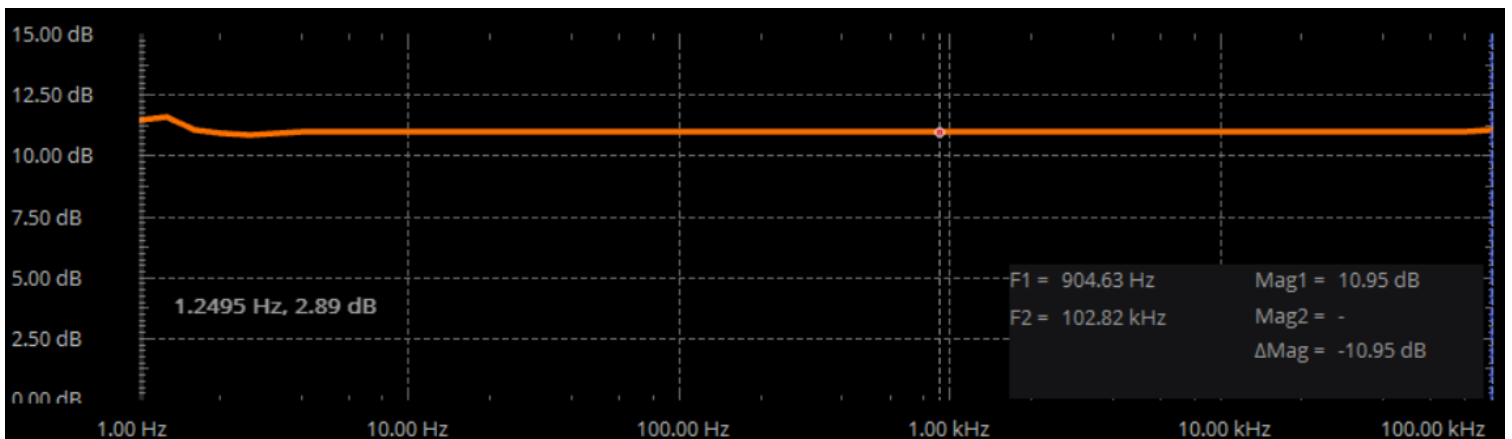
Castigul primei trepte $|A_{V1}| = 8.01\text{dB}$:



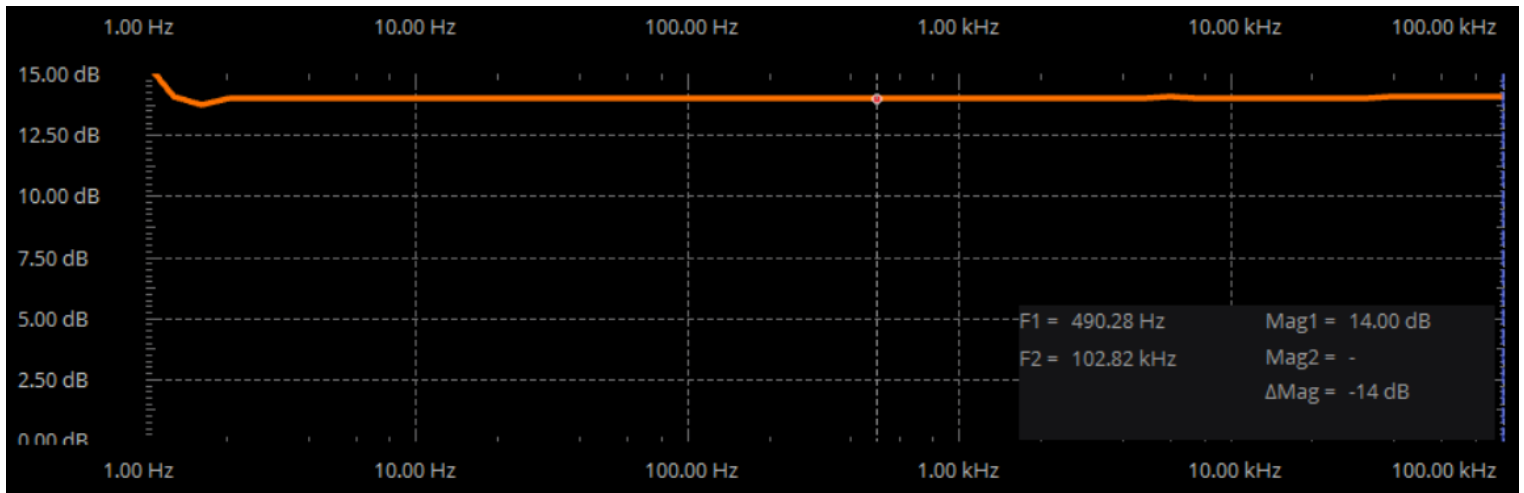
$BW_1 > 100\text{kHz}$:



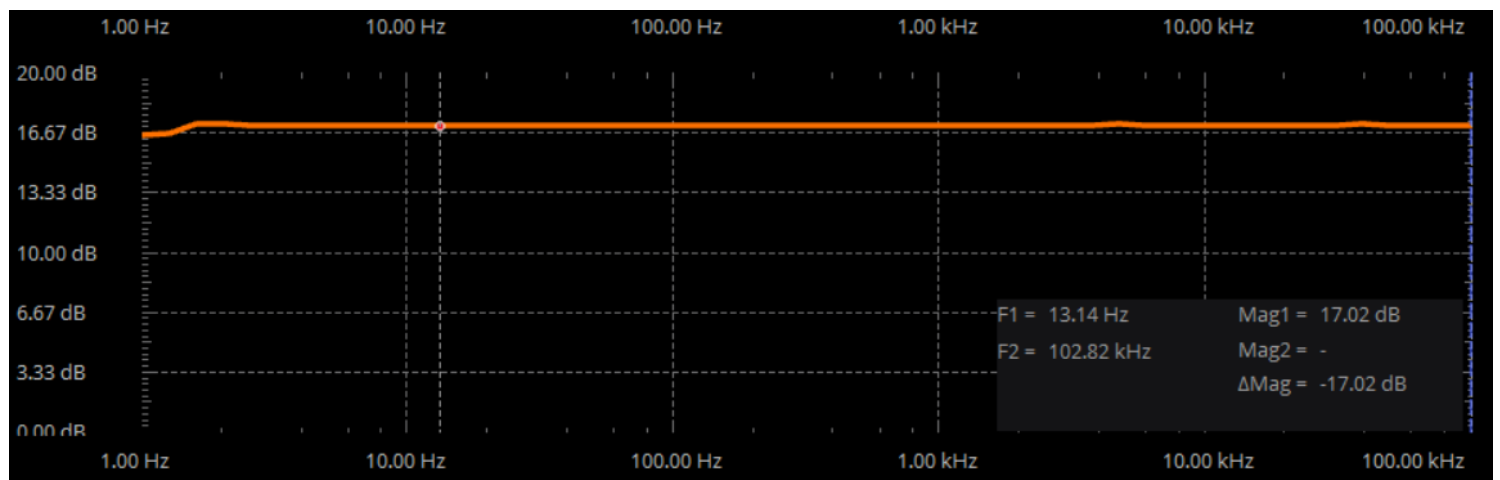
Castigul celei de-a 2-a trepte $|A_{V2}| = 10.95\text{dB}$ si $BW_2 > 100\text{kHz}$:



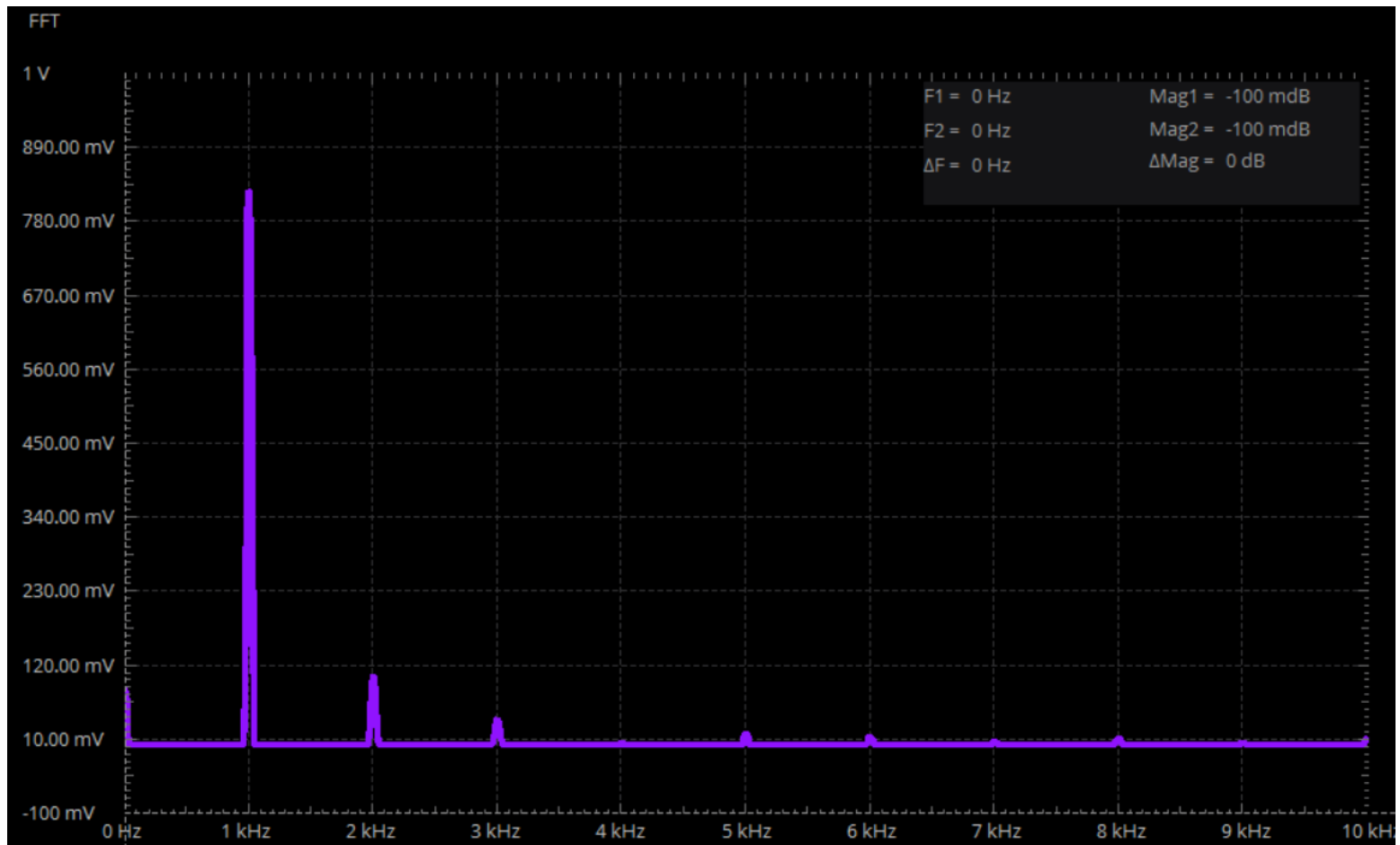
Castigul celei de-a 3-a trepte $|A_{V3}| = 14\text{dB}$ si $BW_3 > 100\text{kHz}$:



Castigul celei de-a 4-a trepte $|A_{V4}| = 17.02\text{dB}$ si $BW_4 > 100\text{kHz}$:



FFT al semnalului de iesire din PGA, pentru un semnal de intrare sinusoidal cu amplitudinea varf la varf 0.35V (castig maxim):



FFT al semnalului de iesire din PGA, pentru un semnal de intrare sinusoidal cu amplitudinea varf la varf 1V (castig minim): (THD=0.7%)

