



**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Dokumentacja projektu

**Układ do pomiaru natężenia prądu poniżej
jednego LSB przetwornika A/C**

z przedmiotu

**Analogowe układy peryferyjne w
systemach cyfrowych**

Elektronika i telekomunikacja - Systemy wbudowane, rok II studiów magisterskich

Piotr Kowol, Piotr Masurek, Michał Nizioł

12 listopada 2025

Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Założenia	2
1.2	Schemat Blokowy	2
2	Schematy ideowe układu	3
3	Symulacje układów	4

Spis rysunków

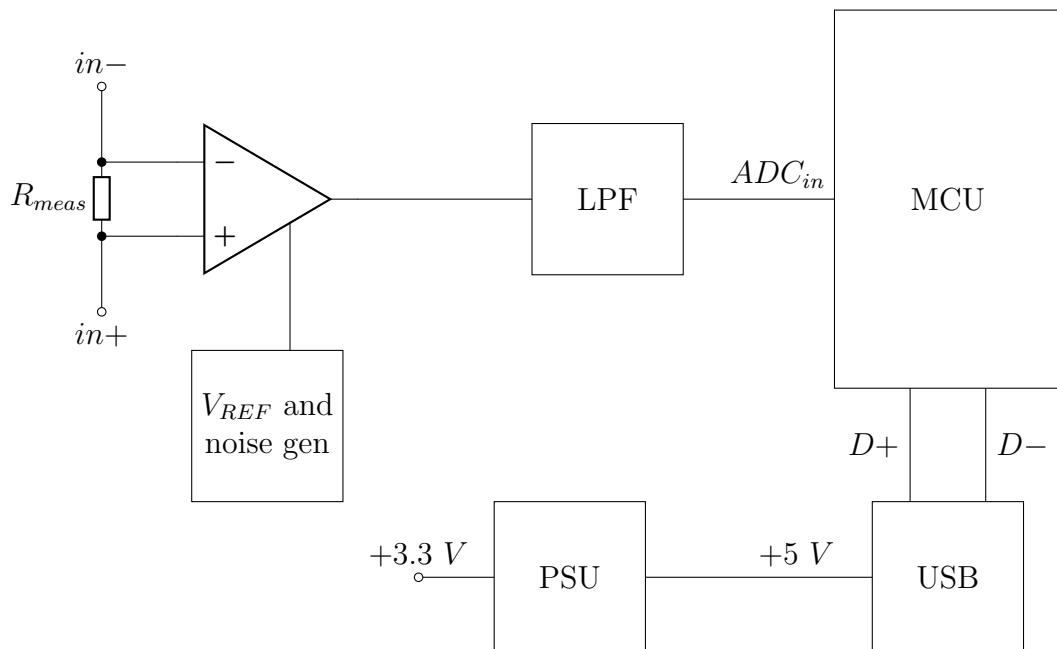
1.1	Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia prądu.	2
2.1	Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.	3
2.2	Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego z układem generacji szumu.	3
2.3	Schemat pasywnego filtra RC o częstotliwości granicznej $f_g \approx 318 \text{ kHz}$	3
2.4	Układ stabilizacji napięcia na 3.3V.	3
3.1	Symulacja tran stabilizatora napięcia LM1117-3.3 napięcia wejściowego (V_{in}) i wyjściowego (V_{out}).	4
3.2	Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 1 \mu\text{A}$	5
3.3	Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 100 \text{ nA}$	5
3.4	Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego dla $I_{meas} = 1 \mu\text{A}$, różnica napięć $\approx 65 \mu\text{V}$	6
3.5	Wzmocnienie różnicowe INA333.	6
3.6	Wzmocnienie od wejścia REF wzmacniacza pomiarowego.	7
3.7	Charakterystyki częstotliwościowe układu: czerwona - pasmo przenoszenia generatora szumu, zielona - pasmo przenoszenia na wyjściu INA333, niebieska - pasmo przenoszenia za filtrem LPF z wtórnikiem - UWAGA, bez wtórnika jest podbiecie o $\approx 7 \text{ dB}$ na wyjściu INA333 przy $f \approx 150 \text{ kHz}$	7
3.8	Transformata fouriera z 10 ms symulacji transient wzmacniacza pomiarowego z generacją szumu na referencji. Okno fft 100 Hz , co daje $\approx 1.65 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	8

1. Wstęp

1.1. Założenia

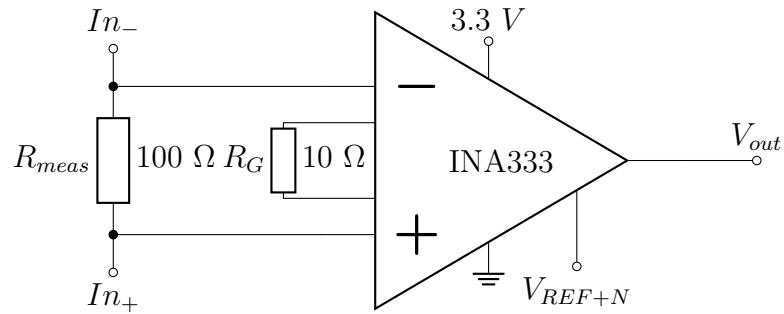
- Pomiar prądu rzędu 10 nA ,
- Wykorzystanie ditheringu szumem Gaussowskim,
- Wykorzystanie mikroprocesora STM32F103C8T6 z 12 bitowym ADC,
- Wykorzystanie wzmacniacza pomiarowego INA333.

1.2. Schemat Blokowy

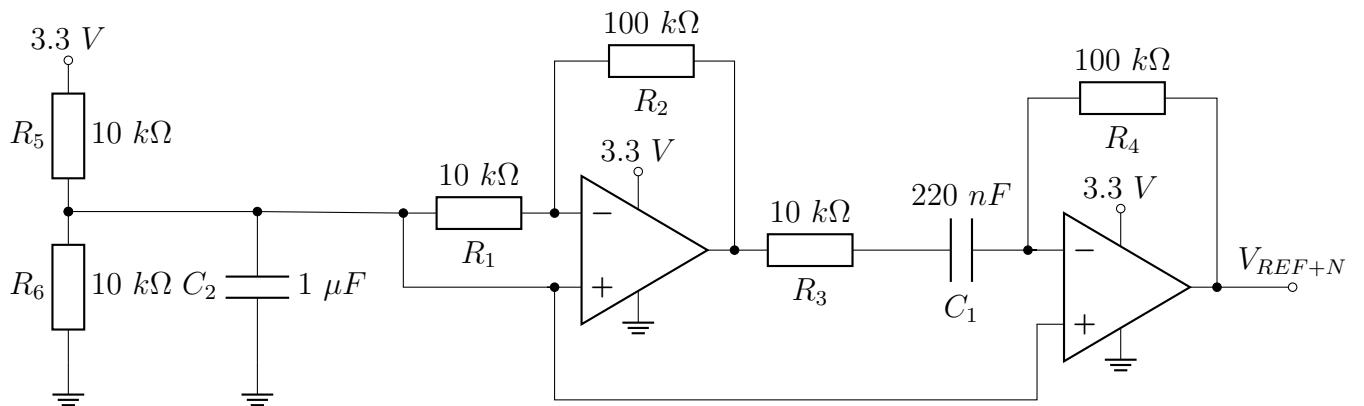


Rysunek 1.1: Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia prądu.

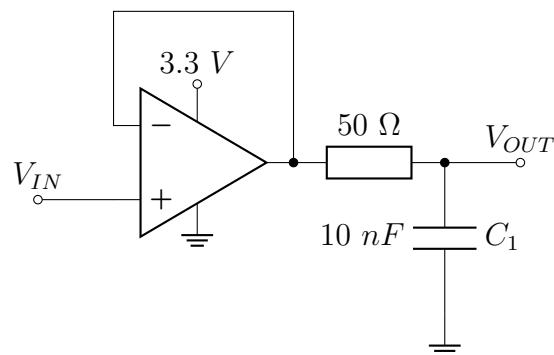
2. Schematy ideowe układu



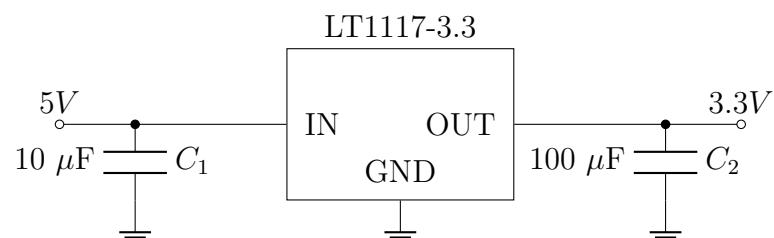
Rysunek 2.1: Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.



Rysunek 2.2: Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego z układem generacji szumu.



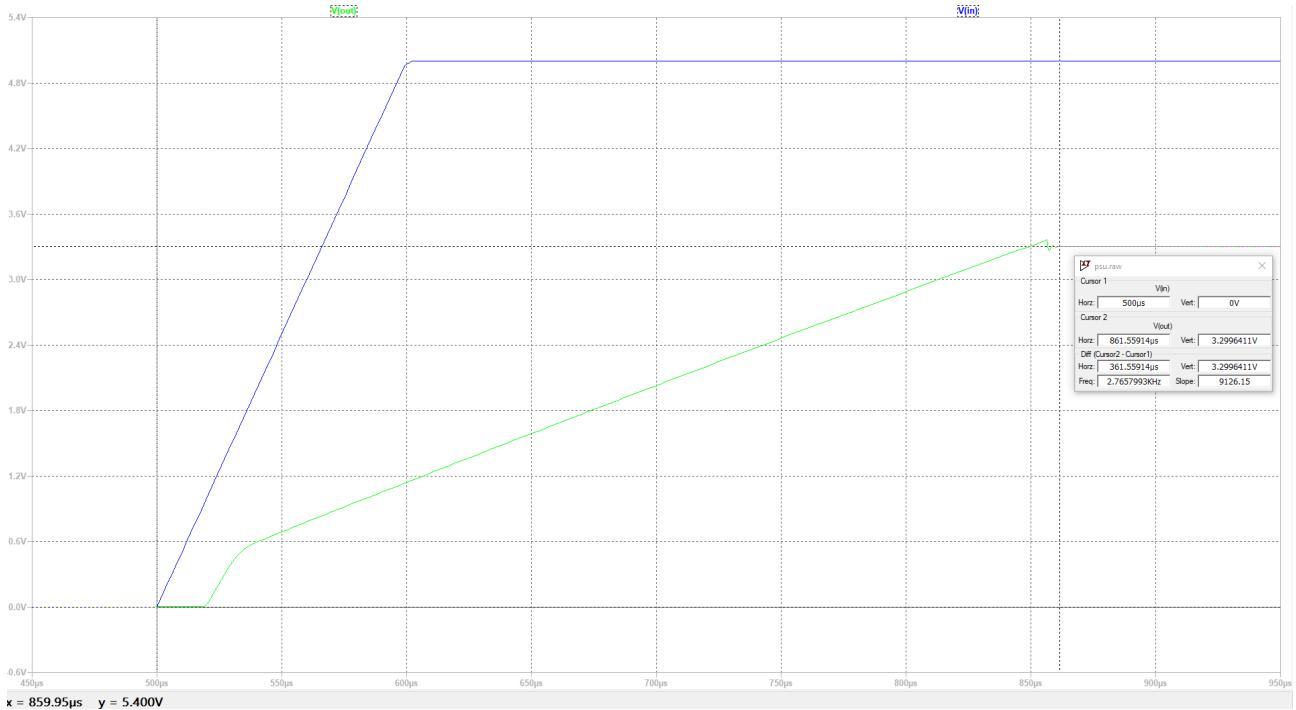
Rysunek 2.3: Schemat pasywnego filtra RC o częstotliwości granicznej $f_g \approx 318 \text{ kHz}$.



Rysunek 2.4: Układ stabilizacji napięcia na 3.3V.

3. Symulacje układów

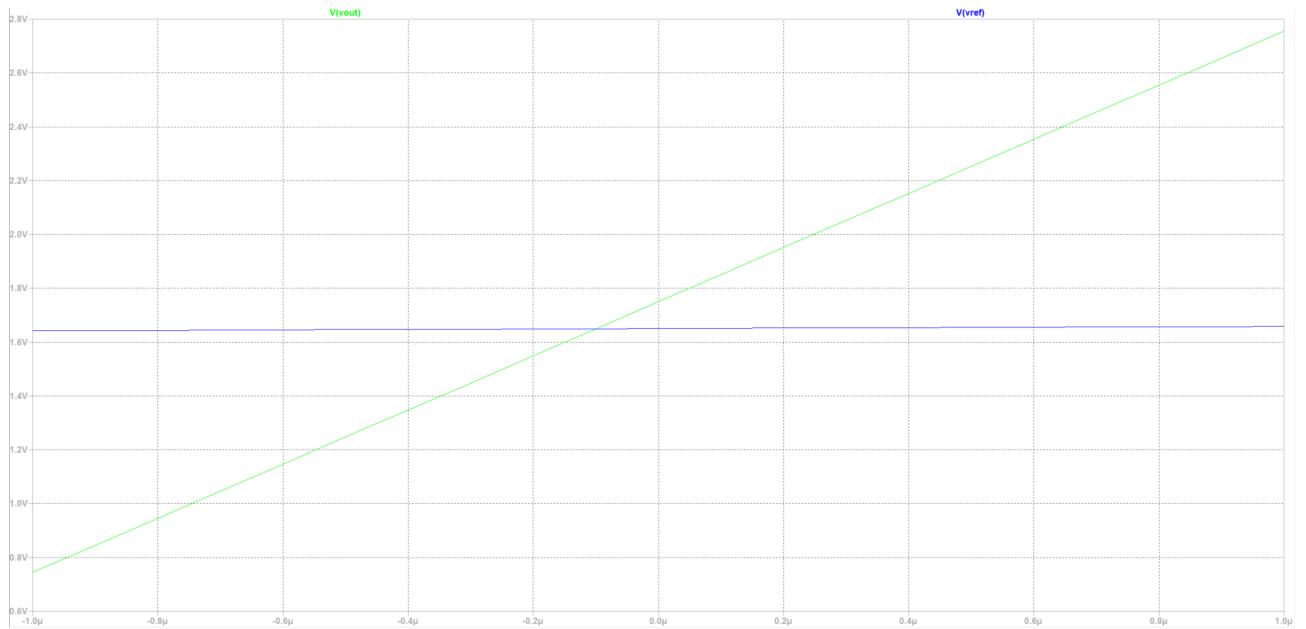
Podczas symulacji sprawdzono działanie kilku bloków funkcjonalnych, tj. PSU, generator szumu białego oraz wzmacniacz pomiarowy. Symulacja czasowa PSU pozwoliła sprawdzić jak duży będzie przerzut napięcia podczas uruchomiania układu. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.1.



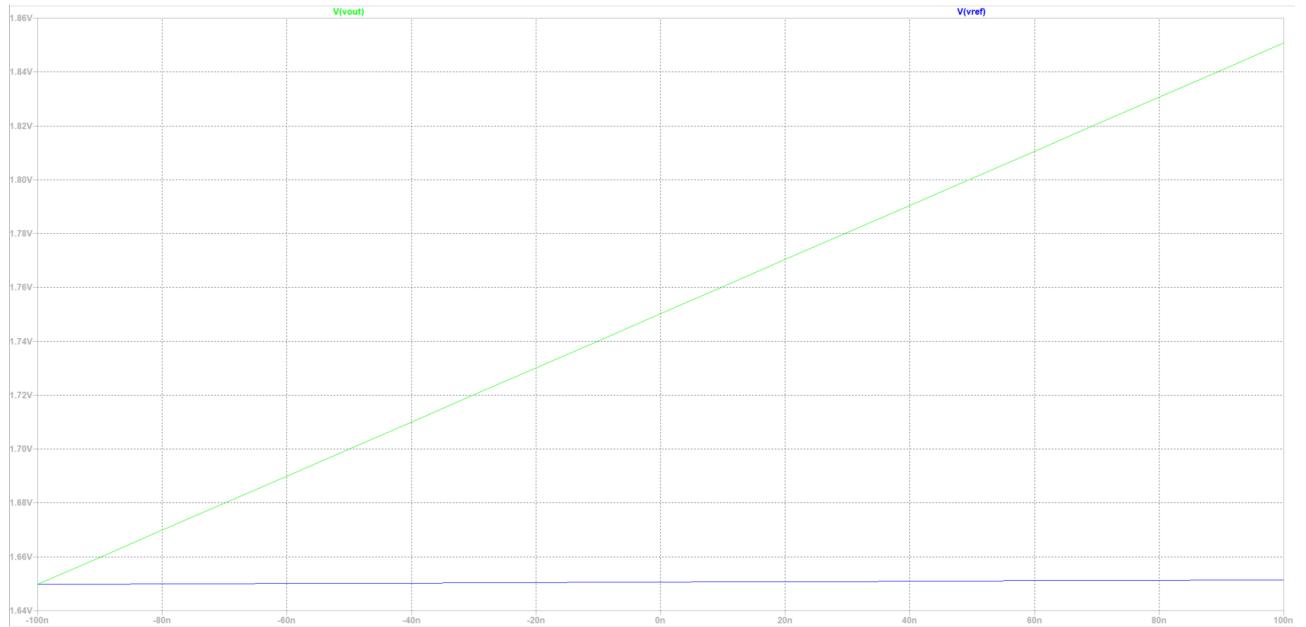
Rysunek 3.1: Symulacja tran stabilizatora napięcia LM1117-3.3 napięcia wejściowego (V_{in}) i wyjściowego (V_{out}).

Podczas symulacji wzmacniacza pomiarowego okazało się, że możliwe będzie zmierzenie prądów o natężeniu 1 nA . Czułość wzmacniacza określono na $\frac{1 \text{ mV}}{1 \text{ nA}}$. Zakres pomiarowy wynosi $\pm 1 \mu\text{A}$, a dopuszczalny zakres napięcia wspólnego, przy maksymalnym prądzie wynosi $\approx 0.7 \text{ V} \div \approx 2.8 \text{ V}$. Zależność napięcia wyjściowego od prądu wejściowego przedstawiono na wykresach 3.3 i 3.2. Zależność napięcia wyjściowego od wejściowego napięcia wspólnego dla prądu $1 \mu\text{A}$ została przedstawiona na wykresie 3.4.

parametr	wartość	komentarz
czułość	$1 \frac{\text{mV}}{\text{nA}}$	czułość układu bez ditheringu
zakres pomiarowy	$\pm 1 \mu\text{A}$	-
zakres napięcia wspólnego	$0.7 \div 2.8 \text{ V}$	-
częstotliwość graniczna	30 Hz	ograniczenie od INA333
pasmo szumu białego	$100 \text{ Hz} \div 200 \text{ kHz}$	górnne ograniczenie od wejścia REF INA333
napięcie szumu	$\approx 0.74 \text{ mV}$	w paśmie $100 \text{ Hz} \div 200 \text{ kHz}$
widmowa gęstość szumu	$\approx 1.65 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	-
częstotliwość próbkowania	$f_S = 1 \text{ MHz}$	z dokumentacji STM32F103C8T6
częstotliwość nadpróbkowania	$f_{OVS} = 62.5 \text{ kHz}$	nadpróbkowanie 16 razy
dodatkowe bity	+2 bity	na podstawie AN5537
teoretyczna wartość mierzalnego prądu przy ditheringu	$I_{meas} \approx 250 \text{ pA}$	jeśli nie tracimy na ENOB

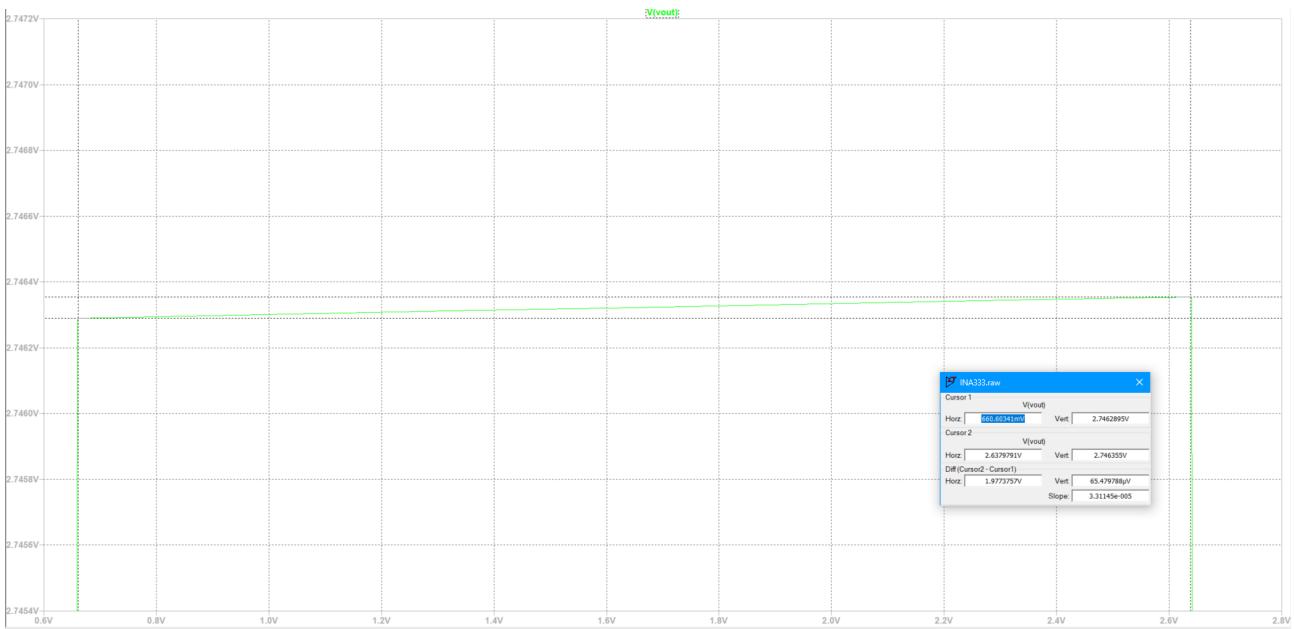


Rysunek 3.2: Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 1 \mu A$.

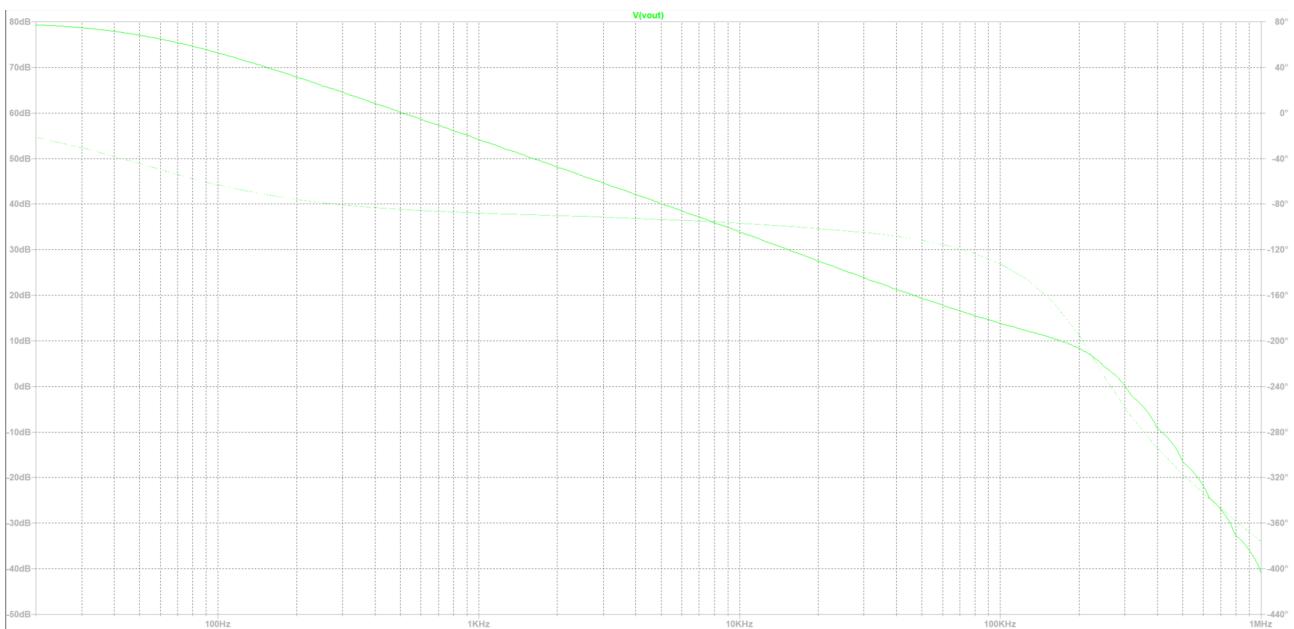


Rysunek 3.3: Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 100 nA$.

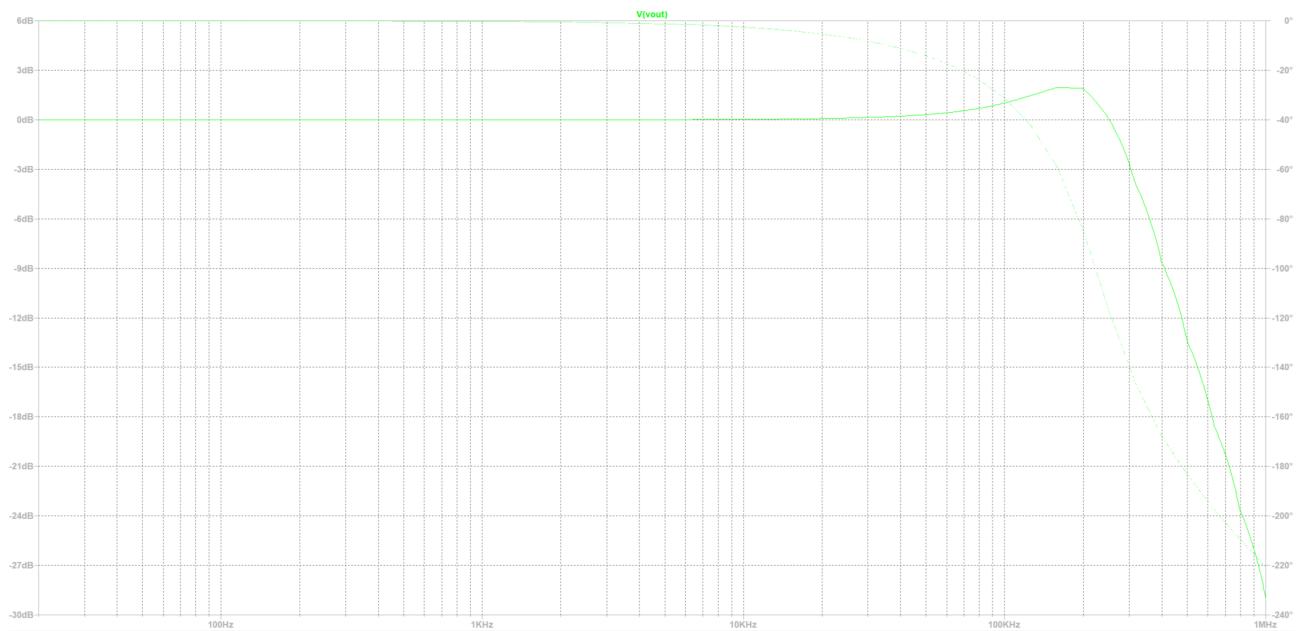
Piotr Kowol, Piotr Mosurek, Michał Nizioł



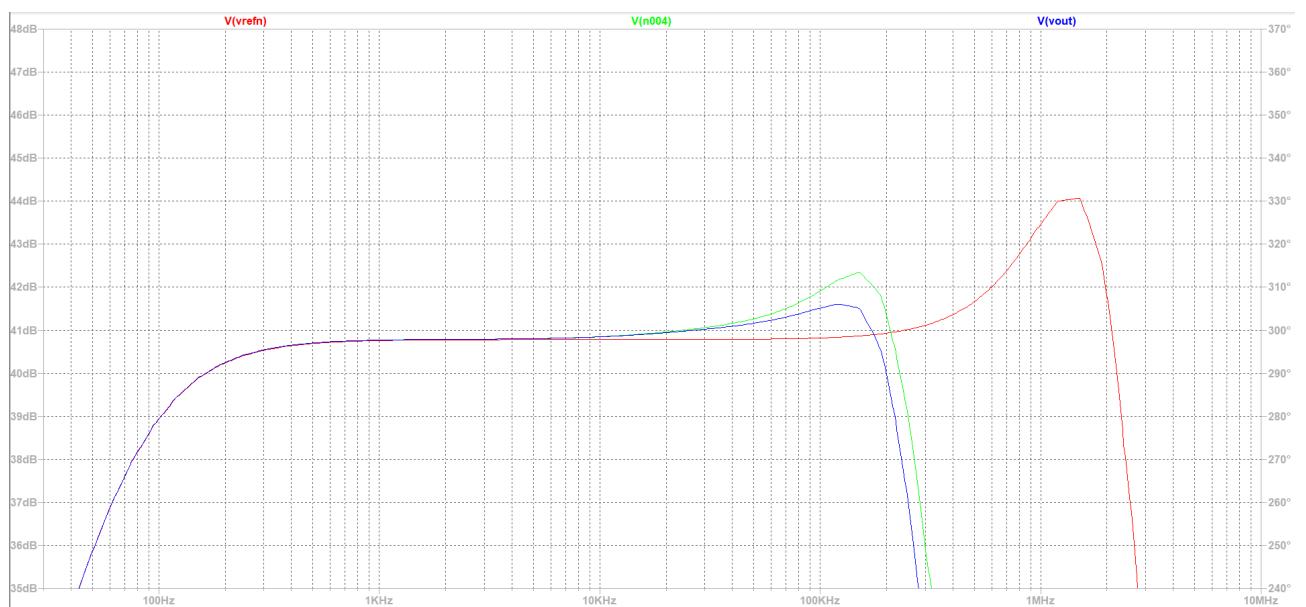
Rysunek 3.4: Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego dla $I_{meas} = 1 \mu A$, różnica napięć $\approx 65 \mu V$.



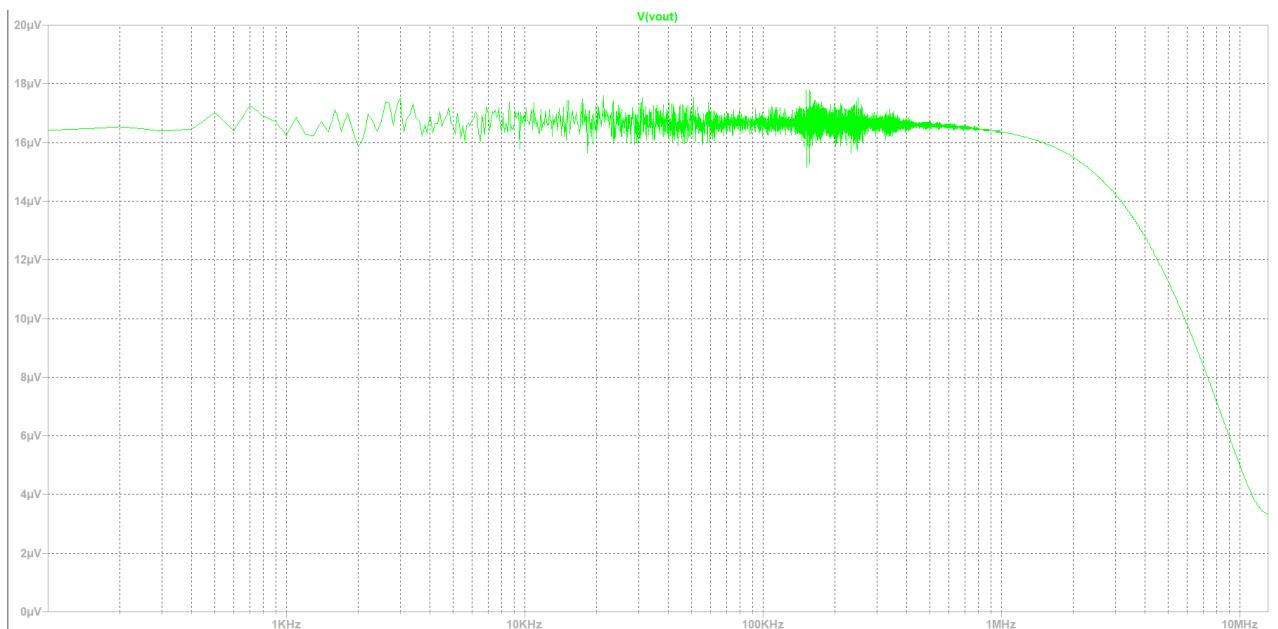
Rysunek 3.5: Wzmocnienie różnicowe INA333.



Rysunek 3.6: Wzmocnienie od wejścia *REF* wzmacniacza pomiarowego.



Rysunek 3.7: Charakterystyki częstotliwościowe układu: czerwona - pasmo przenoszenia generatora szumu, zielona - pasmo przenoszenia na wyjściu INA333, niebieska - pasmo przenoszenia za filtrem LPF z wtórnikiem - UWAGA, bez wtórnika jest podbicie o $\approx 7 \text{ dB}$ na wyjściu INA333 przy $f \approx 150 \text{ kHz}$.



Rysunek 3.8: Transformata fouriera z 10 ms symulacji transient wzmacniacza pomiarowego z generacją szumu na referencji. Okno fft 100 Hz , co daje $\approx 1.65 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$.