



**Akademia Górnictwo-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, Michał Nizioł

4 listopada 2025

# Spis treści

<b>1 Wstęp</b>	<b>2</b>
1.1 Założenia . . . . .	2
1.2 Schemat Blokowy . . . . .	2
<b>2 Schematy ideowe układu</b>	<b>3</b>
<b>3 Symulacje układów</b>	<b>5</b>
3.1 Alternatywne podejście do układu . . . . .	8

# Spis rysunków

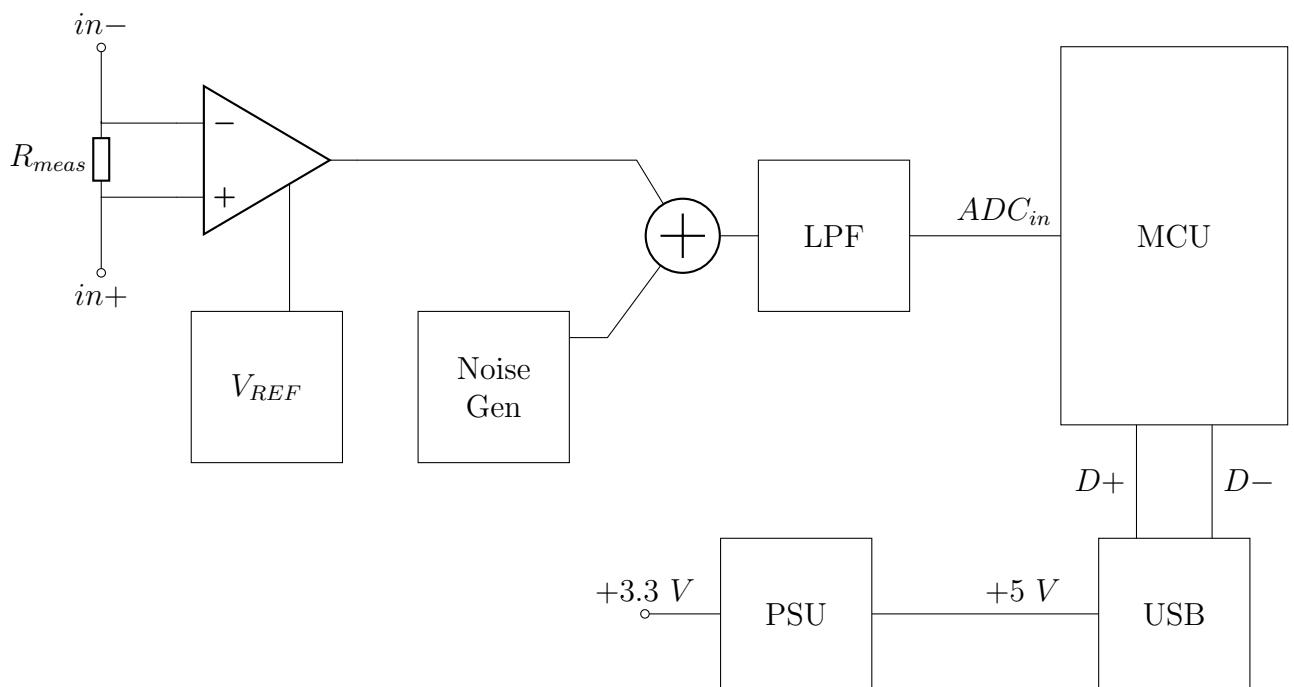
1.1 Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia prądu. . . . .	2
2.1 Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego. . . . .	3
2.2 Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego. . . . .	3
2.3 Schemat układu generacji szumu białego. . . . .	3
2.4 Układ sumacyjny dla dodania sygnału pomiarowego i szumu. . . . .	4
2.5 Układ stabilizacji napięcia na 3.3V. . . . .	4
3.1 Symulacja tran stabilizatora napięcia LM1117-3.3 napięcia wejściowego ( $V_{in}$ ) i wyjściowego ( $V_{out}$ ). . . . .	5
3.2 Symulacja dc układu sumującego, napięcia wyjściowego ( $V_{out}$ ) od napięcia wejściowego ( $V_{in}$ ). . . . .	6
3.3 Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 1 \mu A$ . . . . .	6
3.4 Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 100 nA$ . . . . .	7
3.5 Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego dla $I_{meas} = 1 \mu A$ , różnica napięć $\approx 120 mV$ . . . . .	7
3.6 Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego z buforowaniem $V_{REF}$ dla $I_{meas} = 1 \mu A$ , różnica napięć $\approx 65 \mu V$ . . . . .	8
3.7 Schemat do symulacji $V_{CM}$ . . . . .	8
3.8 Schemat układu generacji szumu wzmacniaczem TSV992. . . . .	9
3.9 Widmowa gęstość szumu na wyjściu układu generacji szumu. . . . .	9
3.10 Wzmacniacz pomiarowy z szumem doprowadzonym do wejścia $REF$ . . . . .	10
3.11 Widmowa gęstość szumu na wyjściu wzmacniacza pomiarowego z szumem dodanym do referencji. . . . .	10
3.12 Zbliżenie na "interesujący" fragment charakterystyki gęstości szumu wzmacniacza pomiarowego. . . . .	11

# 1. Wstęp

## 1.1. Założenia

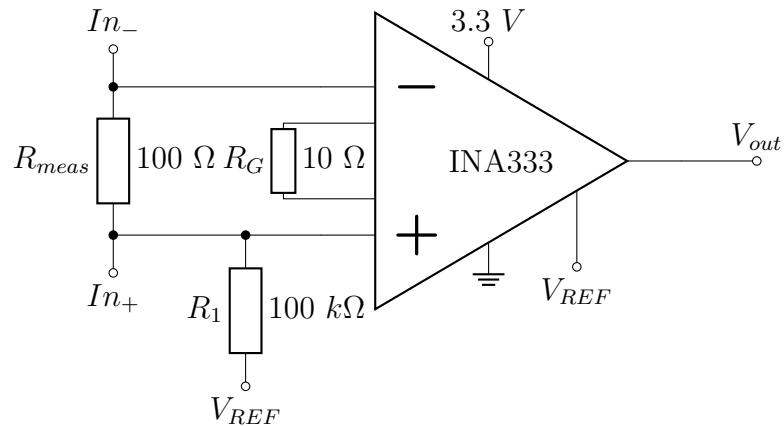
- Pomiar prądu rzędu  $10 \text{ nA}$ ,
- Wykorzystanie ditheringu szumem Gaussowskim,
- Wykorzystanie mikroprocesora STM32F103C8T6 z 12 bitowym ADC,
- Wykorzystanie wzmacniacza pomiarowego INA333.

## 1.2. Schemat Blokowy

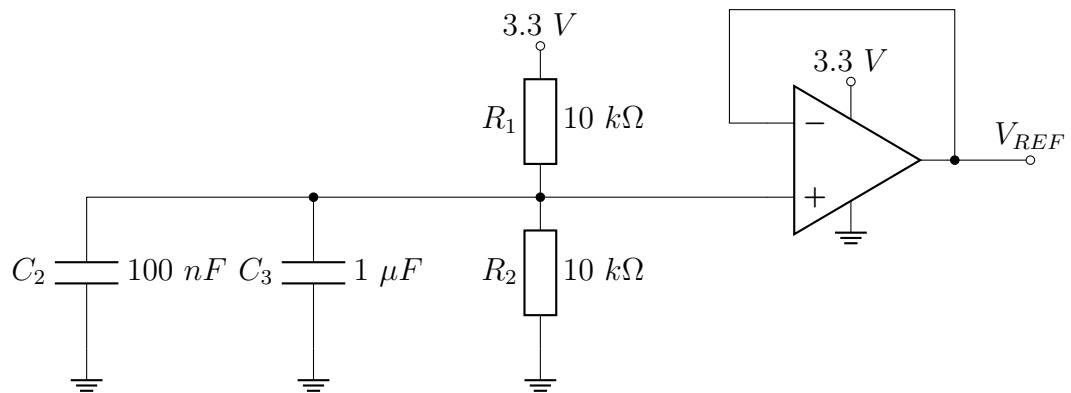


Rysunek 1.1: Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia prądu.

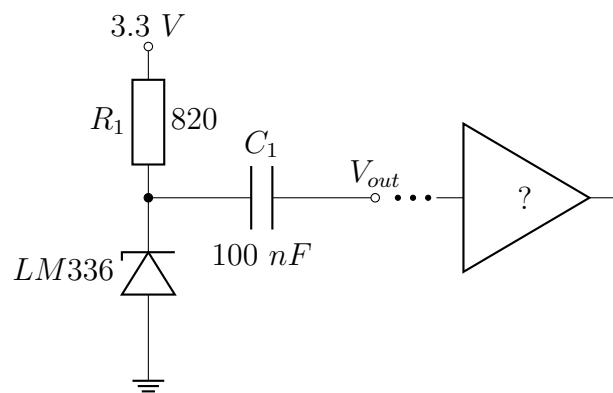
## 2. Schematy ideowe układu



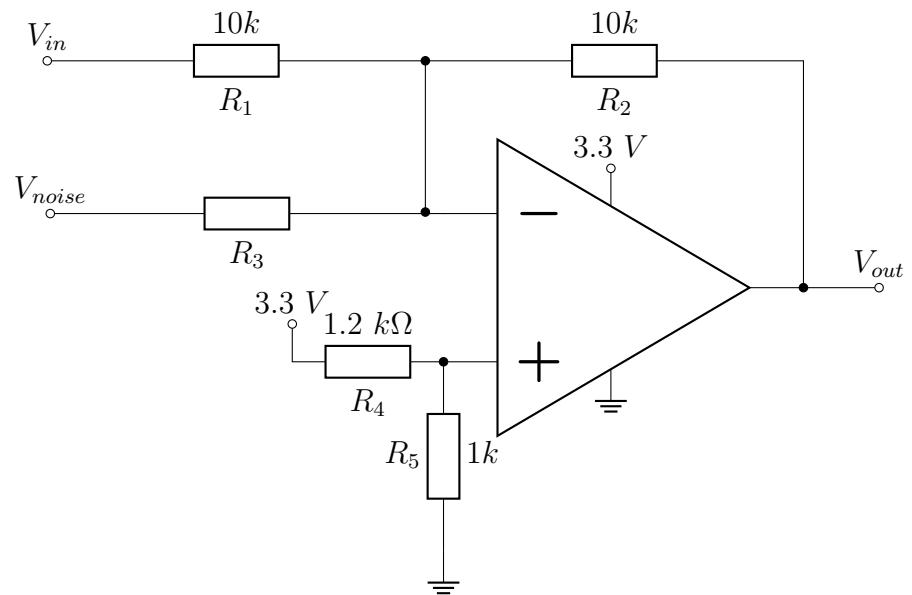
Rysunek 2.1: Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.



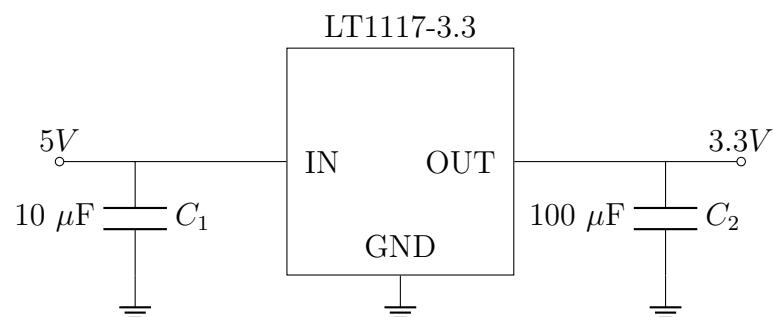
Rysunek 2.2: Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego.



Rysunek 2.3: Schemat układu generacji szumu białego.



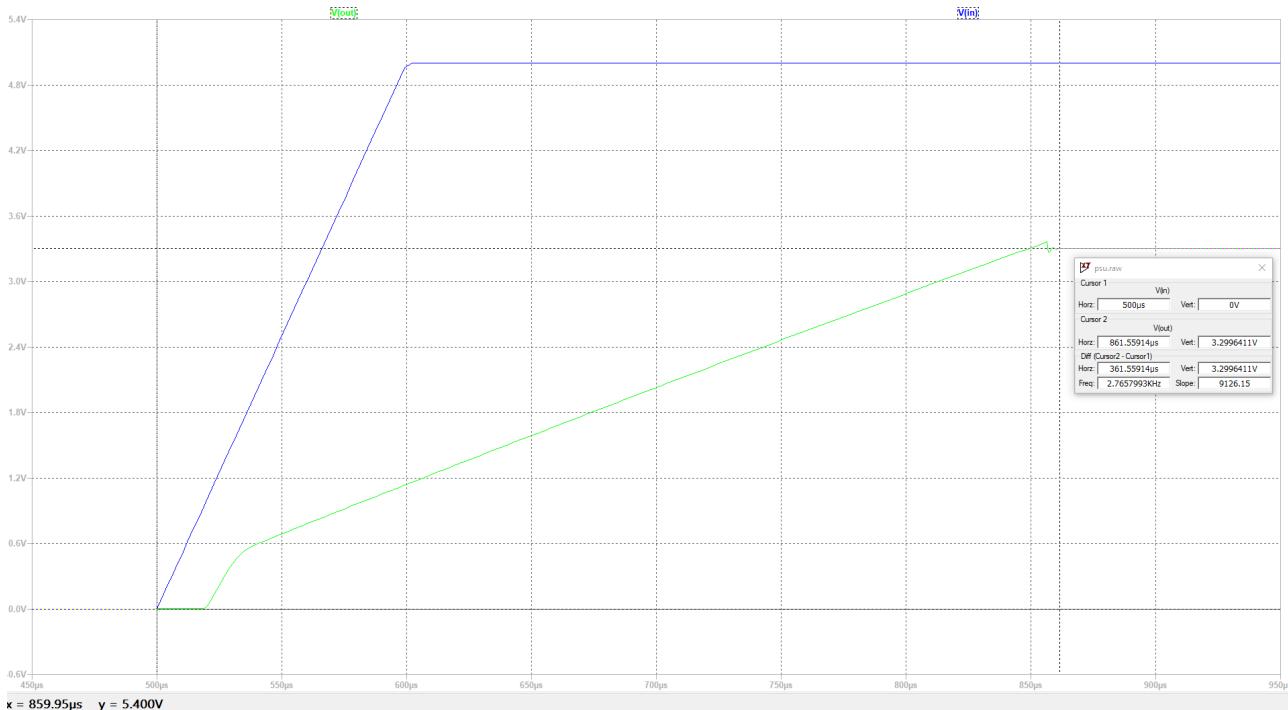
Rysunek 2.4: Układ sumacyjny dla dodania sygnału pomiarowego i szumu.



Rysunek 2.5: Układ stabilizacji napięcia na  $3.3V$ .

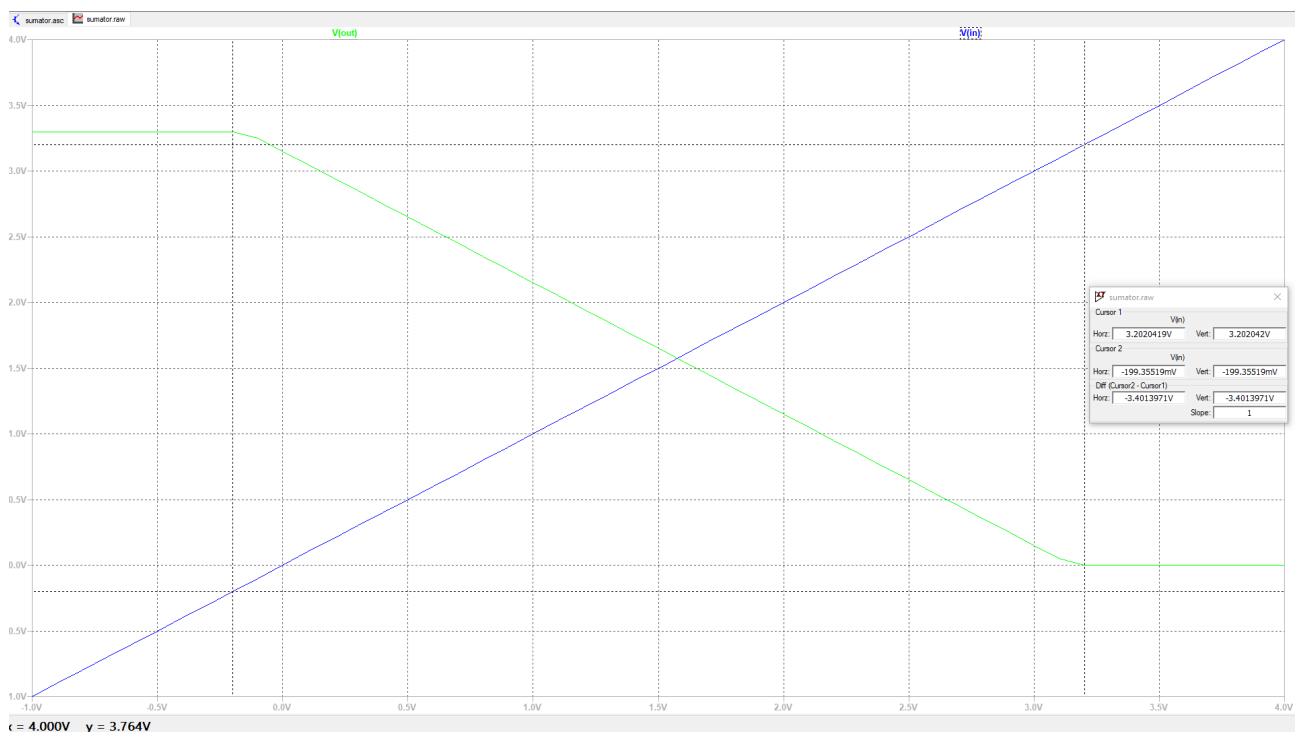
### 3. Symulacje układów

Podczas symulacji sprawdzono działanie kilku bloków funkcjonalnych, tj. PSU, sumator, 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. Jako sumator postanowiono skorzystać ze schematu z noty AN5537 od ST Microelectronics. Symulacja potwierdziła wcześniejsze przypuszczenia - układ zasilany niesymetrycznie nie toleruje napięć ujemnych. W związku z tym iteracyjnie naniesiono potrzebne poprawki, by układ mógł pracować bez zniekształceń z szumem o zerowej składowej stałej. Wyniki symulacji przedstawia rysunek 3.2.

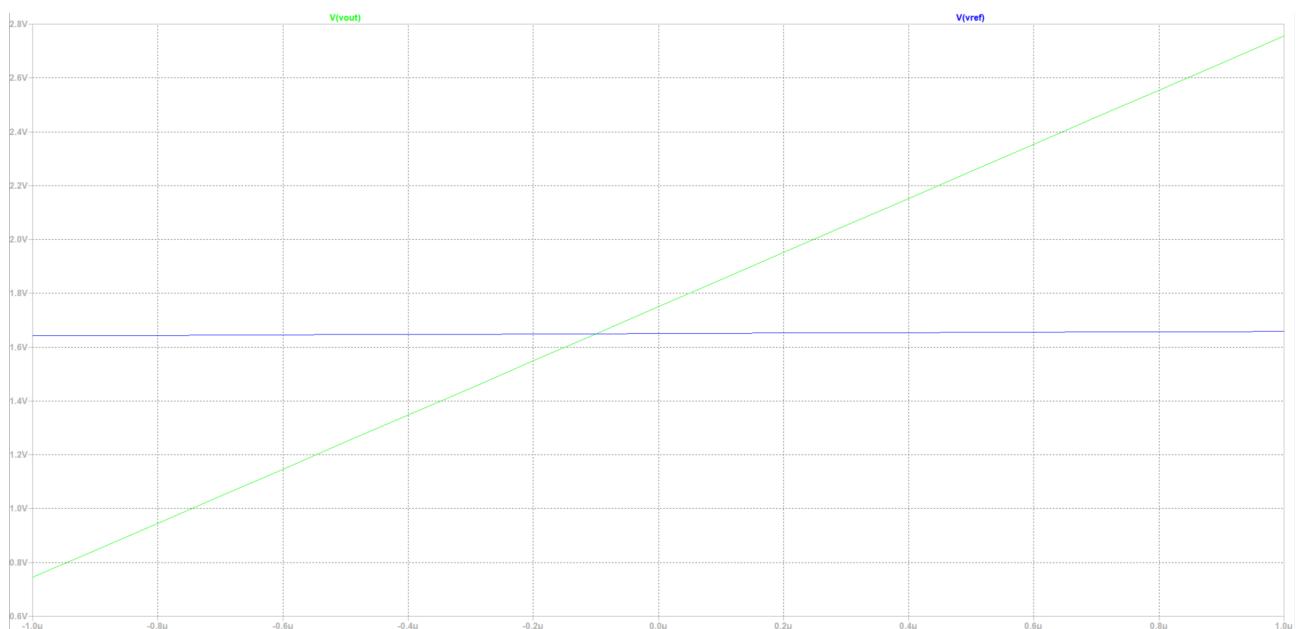


Rysunek 3.1: Symulacja tran stabilizatora napięcia LM1117-3.3 napięcia wejściowego ( $V_{in}$ ) i wyjściowego ( $V_{out}$ ).

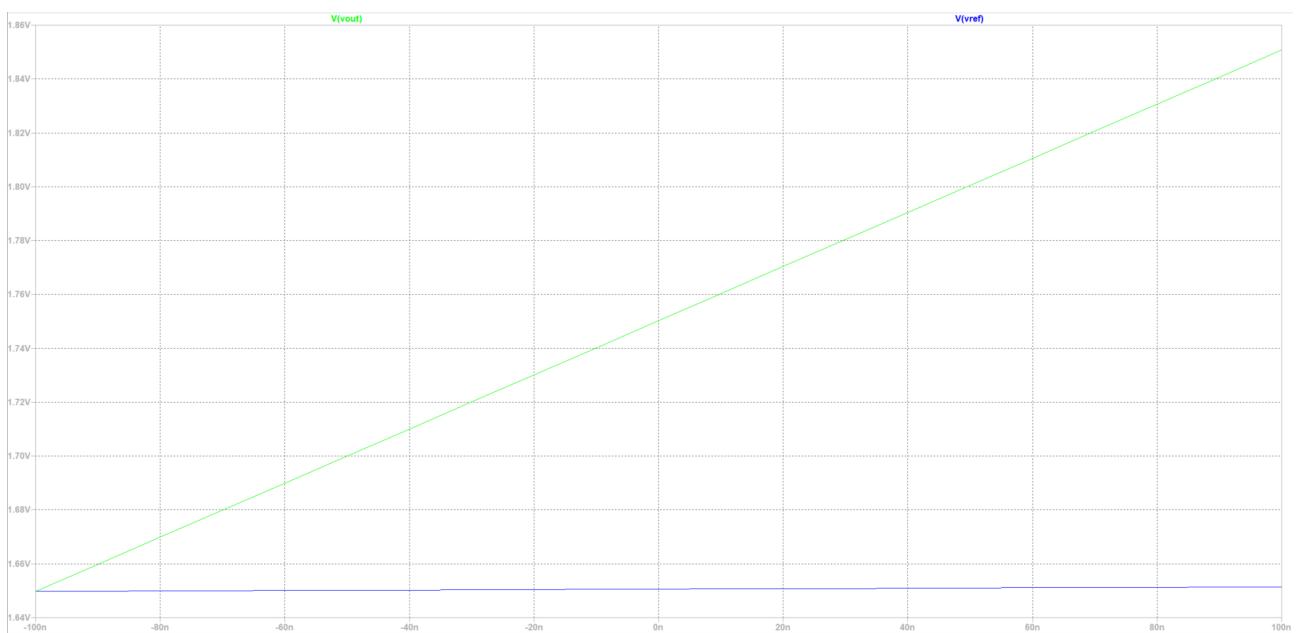
Podczas symulacji wzmacniacza pomiarowego okazało się, że możliwe będzie zmierzenie prądów o natężeniu  $1 \text{ nA}$ . Czułość wzmacniacza określono na  $\frac{1 \text{ mV}}{1 \text{ nA}}$ . Zakres pomiarowy wynosi  $\pm 1 \mu\text{A}$ , a dopuszczalny zakres napięcia wspólnego, przy maksymalnym prądzie wynosi  $\approx 0.7 \text{ V} \div \approx 2.8 \text{ V}$ . Zależność napięcia wyjściowego od prądu wejściowego przedstawiono na wykresach 3.4 i 3.3. Zależność napięcia wyjściowego od wejściowego napięcia wspólnego dla prądu  $1 \mu\text{A}$  została przedstawiona na wykresach 3.5 i 3.6. Schemat symulacyjny przedstawiono na rysunku 3.7.



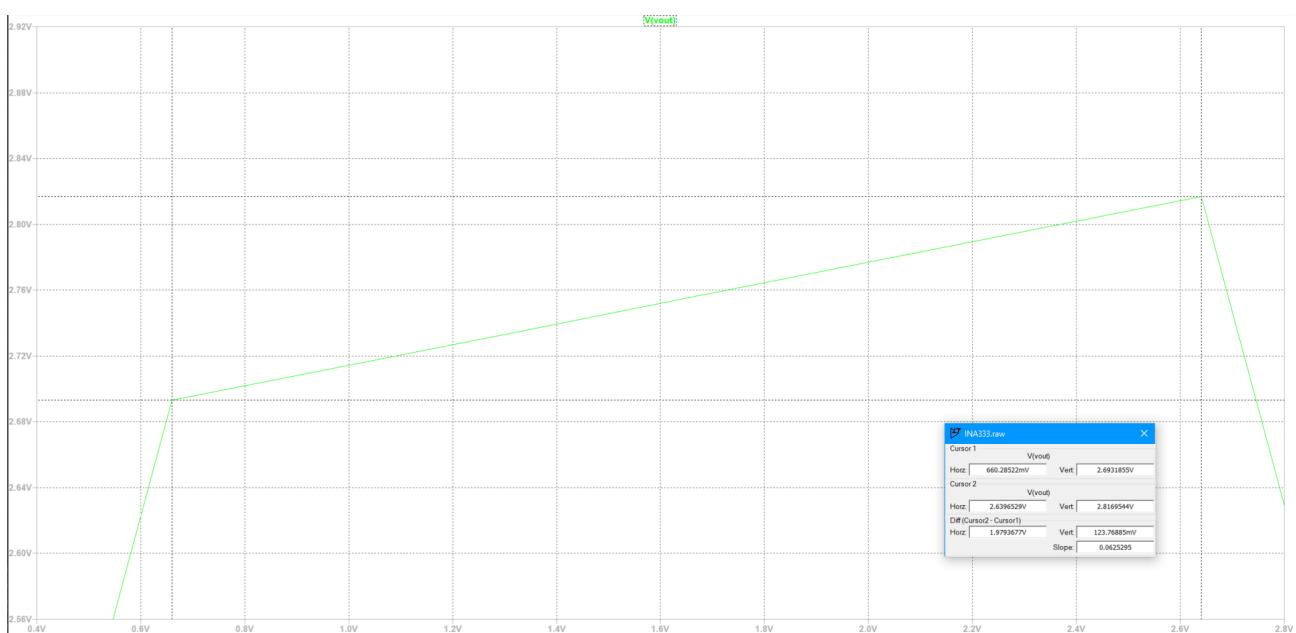
Rysunek 3.2: Symulacja dc układu sumującego, napięcia wyjściowego ( $V_{out}$ ) od napięcia wejściowego ( $V_{in}$ ).



Rysunek 3.3: Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie  $\pm 1 \mu A$ .



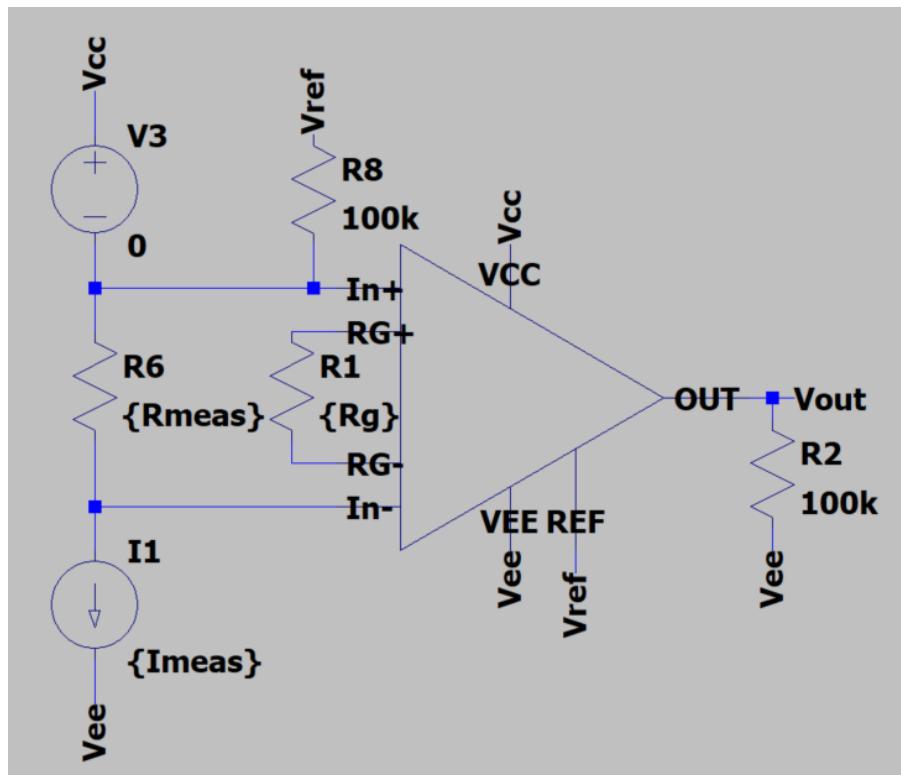
Rysunek 3.4: Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie  $\pm 100 \text{ nA}$ .



Rysunek 3.5: Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego dla  $I_{meas} = 1 \mu\text{A}$ , różnica napięć  $\approx 120 \text{ mV}$ .



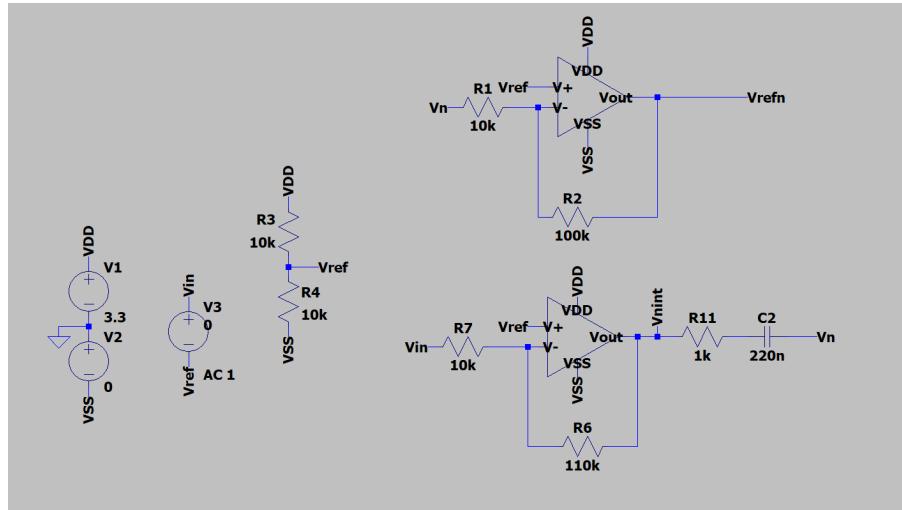
Rysunek 3.6: Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego z buforowaniem  $V_{REF}$  dla  $I_{meas} = 1 \mu\text{A}$ , różnica napięć  $\approx 65 \mu\text{V}$ .



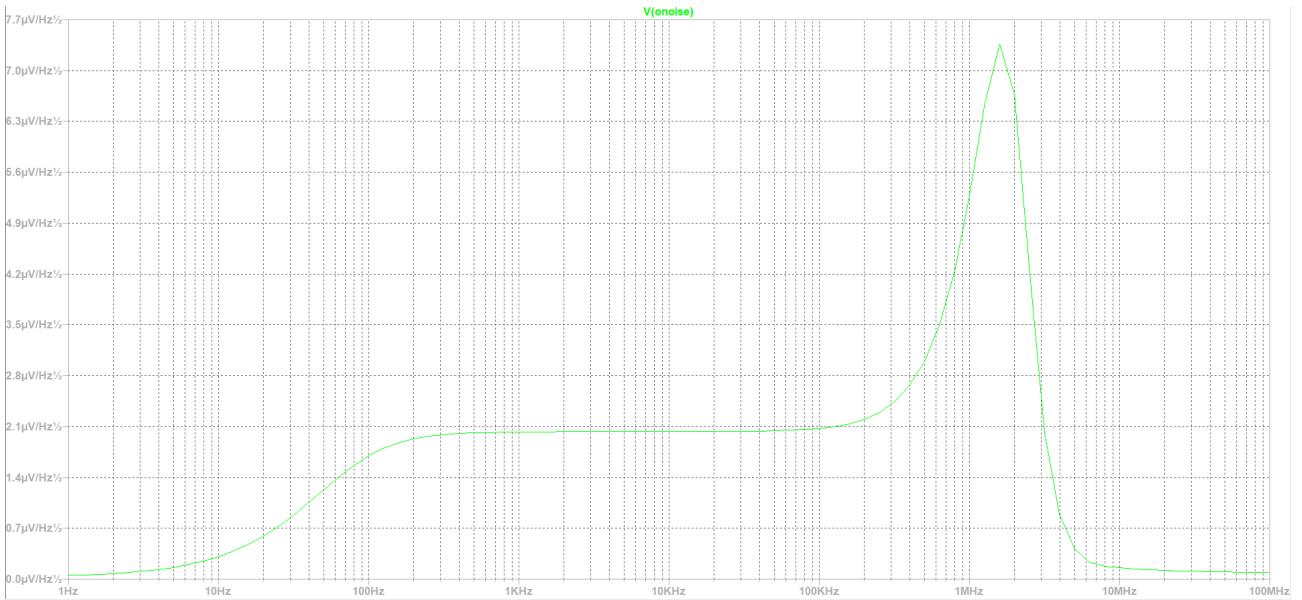
Rysunek 3.7: Schemat do symulacji  $V_{CM}$ .

### 3.1. Alternatywne podejście do układu

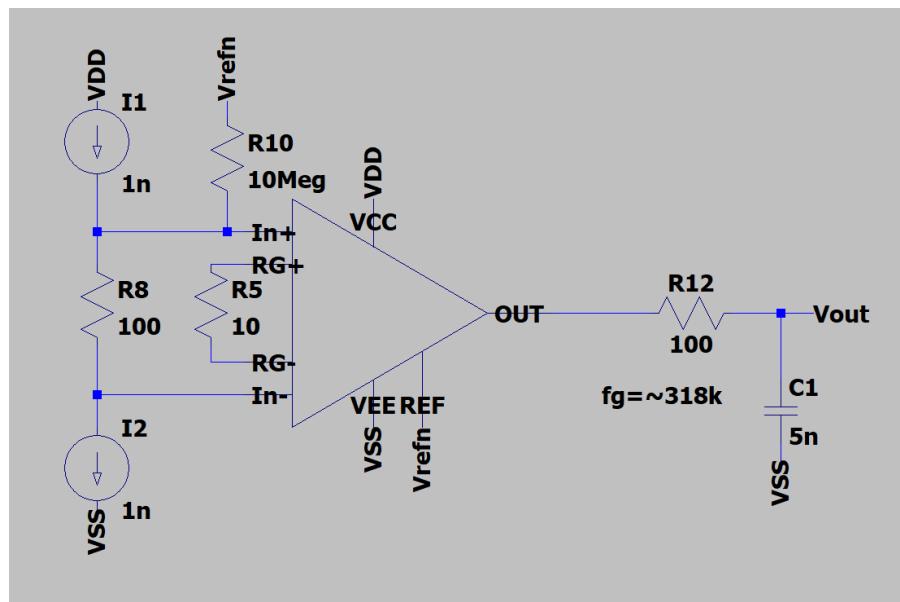
Piotr Kowol, Michał Nizioł



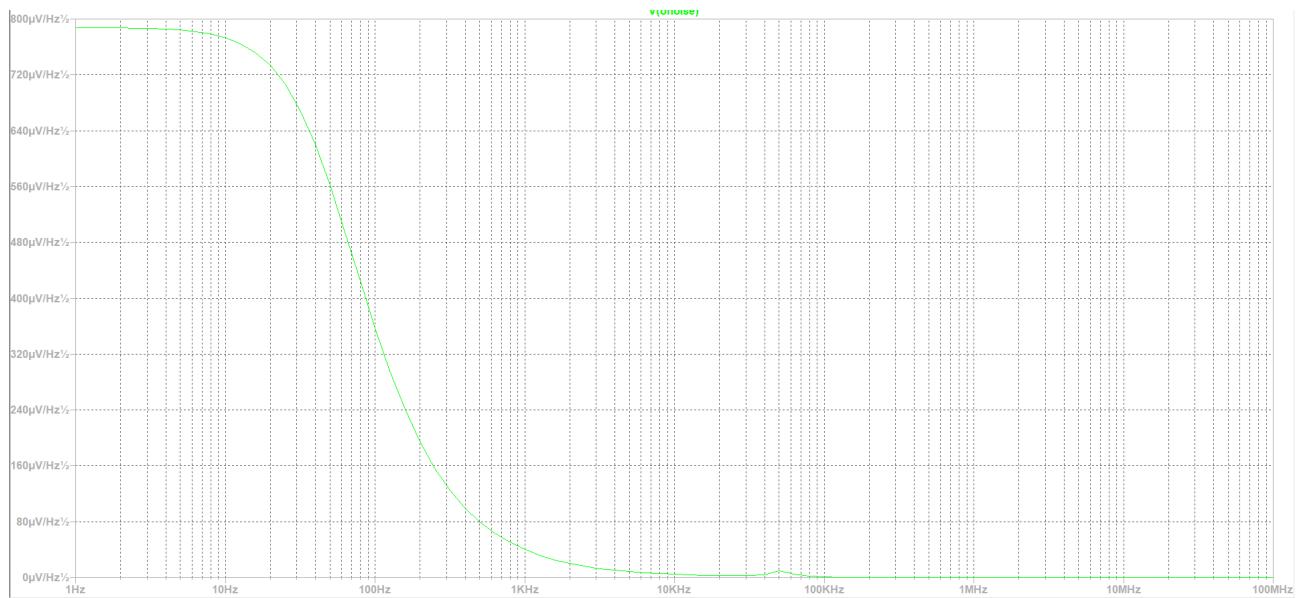
Rysunek 3.8: Schemat układu generacji szumu wzmacniaczem TSV992.



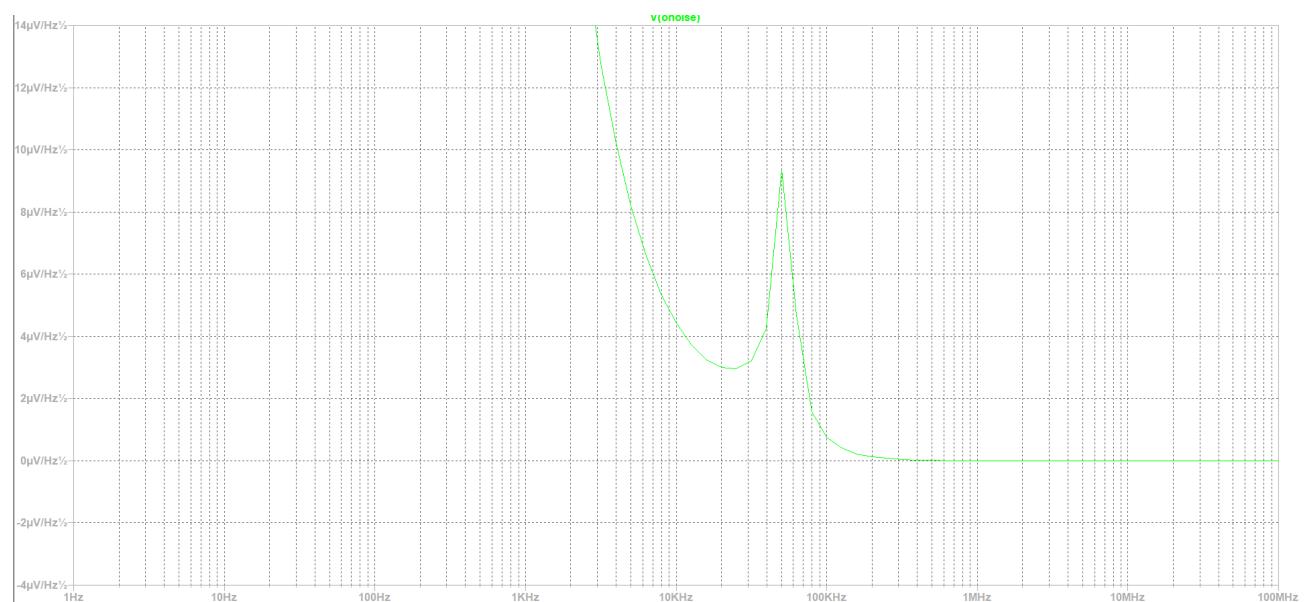
Rysunek 3.9: Widmowa gęstość szumu na wyjściu układu generacji szumu.



Rysunek 3.10: Wzmacniacz pomiarowy z szumem doprowadzonym do wejścia REF.



Rysunek 3.11: Widmowa gęstość szumu na wyjściu wzmacniacza pomiarowego z szumem dodanym do referencji.



Rysunek 3.12: Zbliżenie na ”interesujący” fragment charakterystyki gęstości szumu wzmacniacza pomiarowego.