



**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, Piotr Masurek, Michał Nizioł

11 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
3.1 Problem V_{CM} - do przedyskutowania	9

Spis rysunków

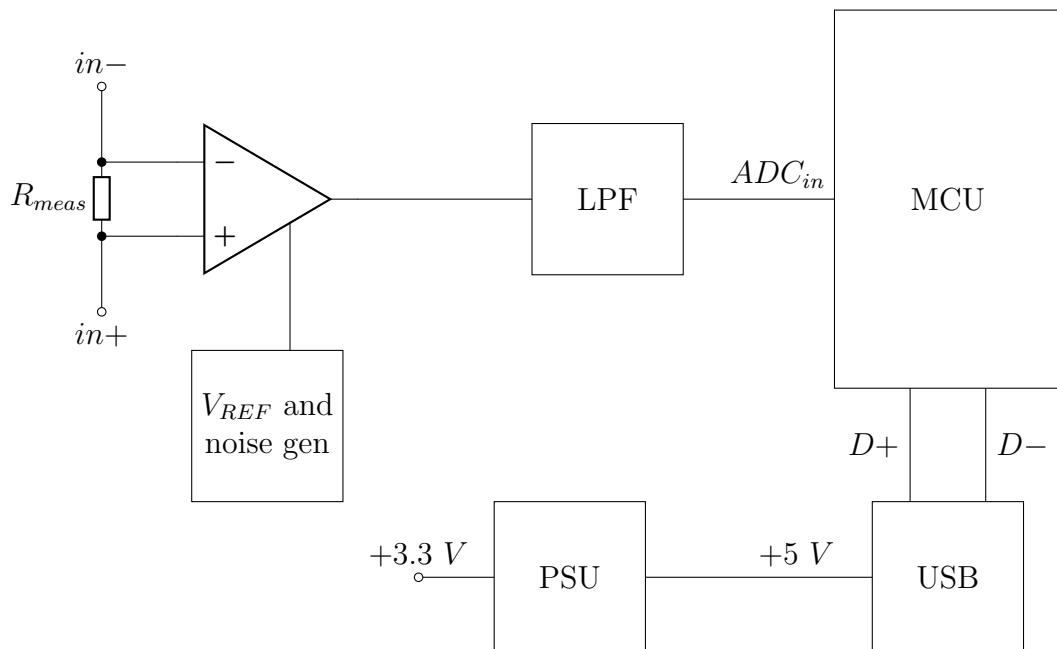
1.1 Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia prądu.	2
2.1 Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.	3
2.2 Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego z układem generacji szumu.	3
2.3 Schemat do pomiaru napięcia sumacyjnego.	3
2.4 Schemat pasywnego filtra RC o częstotliwości granicznej $f_g \approx 318 \text{ kHz}$	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 parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 1 \mu\text{A}$	5
3.3 Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 100 \text{ nA}$	6
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.	7
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 $f \approx 150 \text{ kHz}$	8
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
3.9 Schemat układu symulacyjnego do kompensacji prądów upływu poprzez pomiar V_{CM}	9
3.10 Wyniki symulacji V_{CM} dla prądu 330 nA , można zauważać upływność przez rezystor R_8	10
3.11 Schemat układu symulacyjnego do kompensacji prądów upływu po stronie analogowej.	11
3.12 Wyniki symulacji V_{CM} dla prądu 330 nA z kompensacją, upływność przez R_8 wynosi $\approx 2.5 \text{ nA}$, przy V_{OS} wtórnika wynoszącym 25 mV	12

1. Wstęp

1.1. Założenia

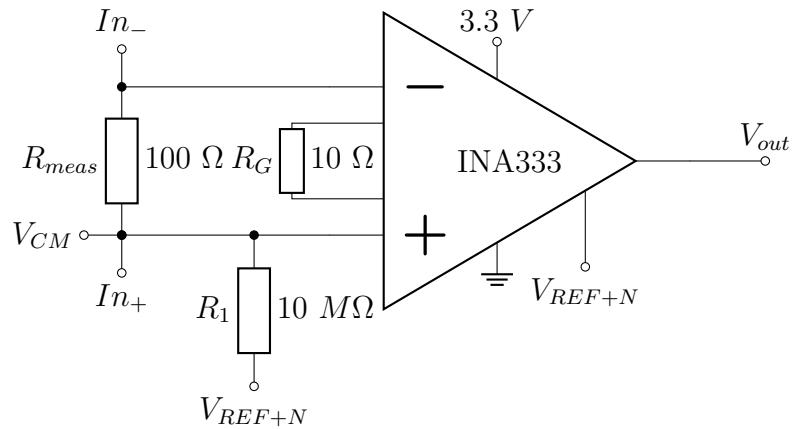
- Pomiar prądu rzędu 10 nA ,
- Wykorzystanie ditheringu szumem Gaussowskim,
- Wykorzystanie mikroprocesora STM32F103C8T6 z 12 bitowym ADC,
- Wykorzystanie wzmacniacza pomiarowego INA333.

1.2. Schemat Blokowy

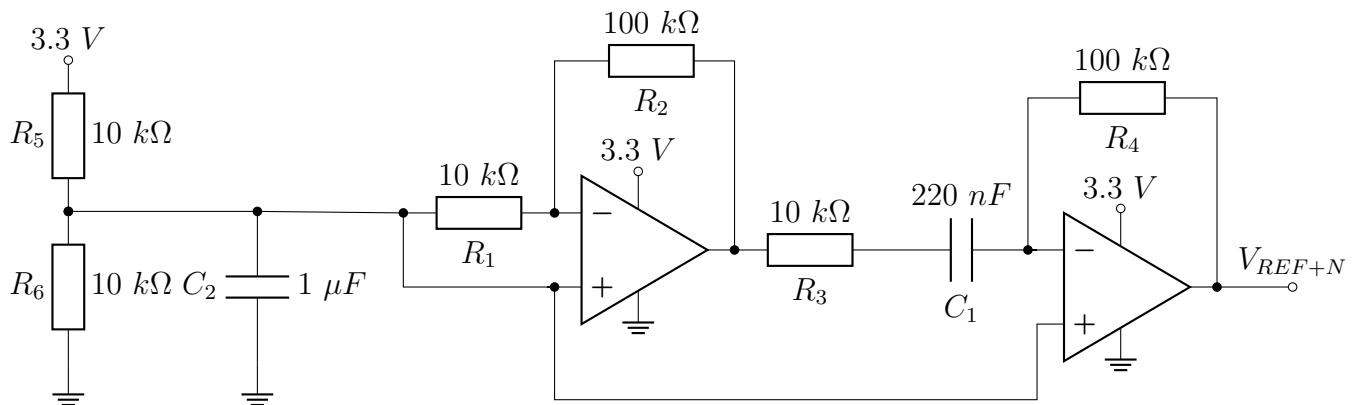


Rysunek 1.1: Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia prądu.

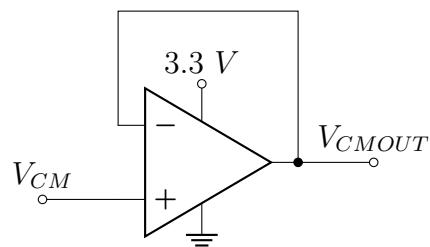
2. Schematy ideowe układu



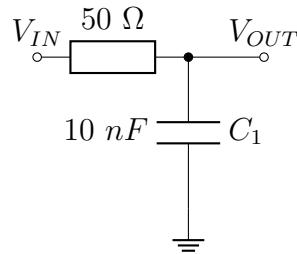
Rysunek 2.1: Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.



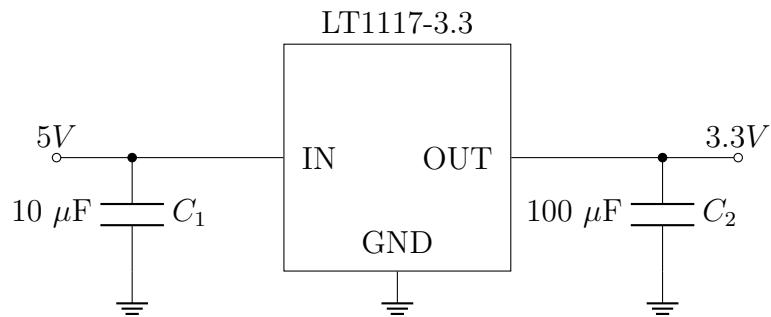
Rysunek 2.2: Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego z układem generacji szumu.



Rysunek 2.3: Schemat do pomiaru napięcia sumacyjnego.



Rysunek 2.4: Schemat pasywnego filtru RC o częstotliwości granicznej $f_g \approx 318 \text{ kHz}$.



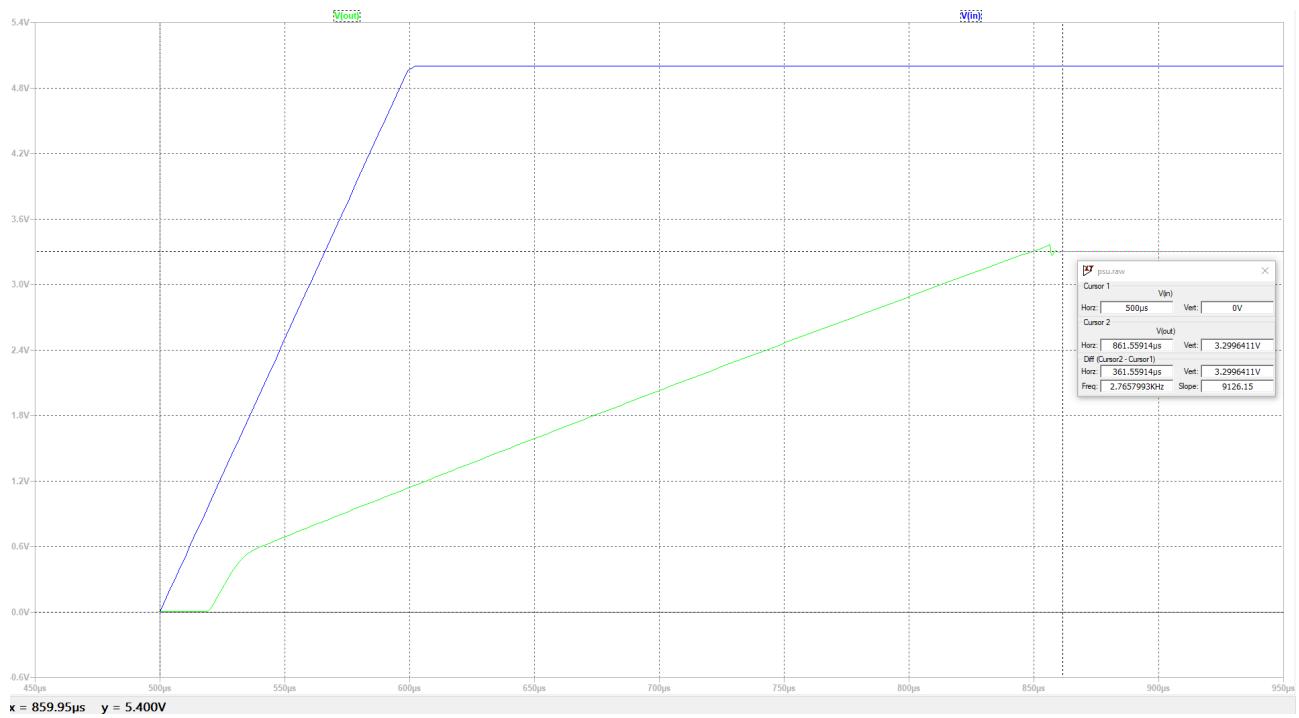
Rysunek 2.5: Układ stabilizacji napięcia na 3.3V.

3. Symulacje układów

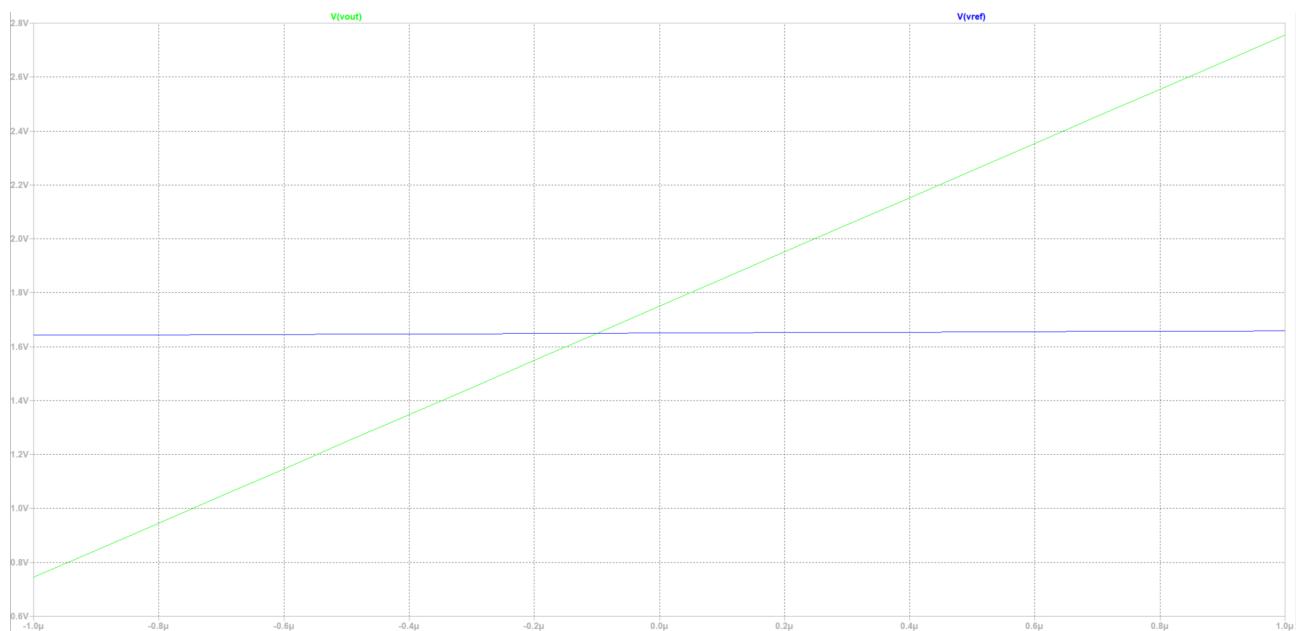
Podczas symulacji sprawdzono działanie kilku bloków funkcjonalnych, tj. PSU, generator szumu białego oraz wzmacniacz pomiarowy. Symulacja czasowa PSU pozwoliła sprawdzić jak duży będzie przerzut napięcia podczas uruchomiania układu. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.1.

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 prądu 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.

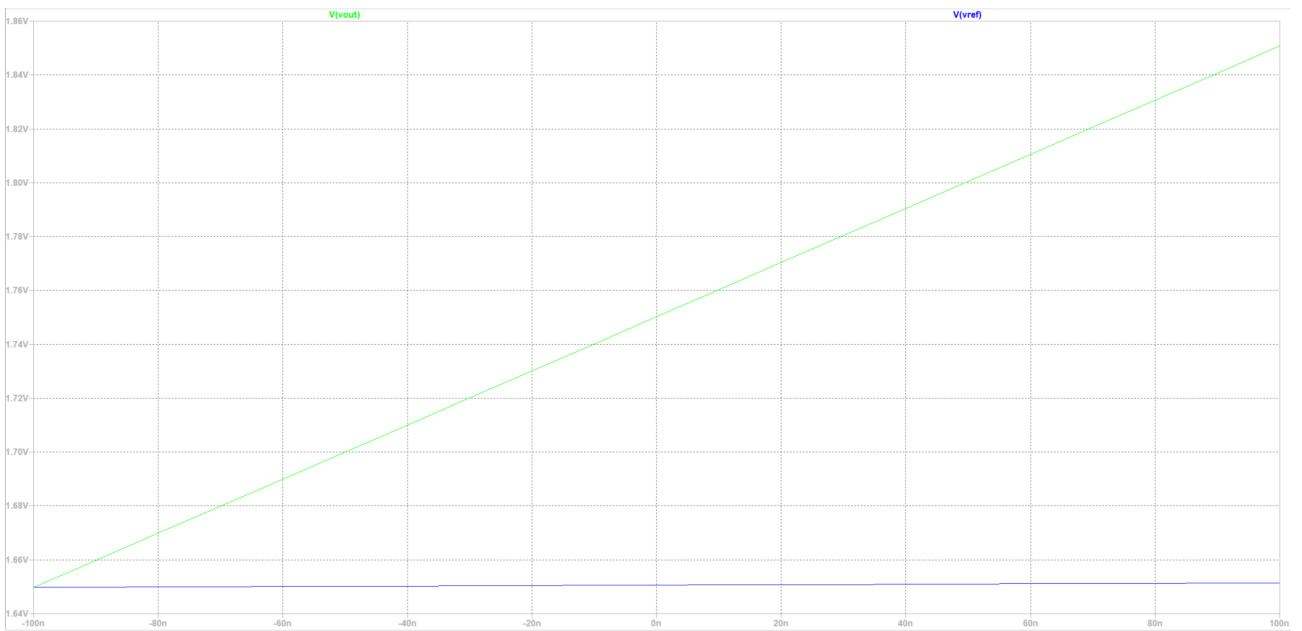
parametr	wartość	komentarz
czułość	$1 \frac{\text{mV}}{\text{nA}}$	czułość układu bez ditheringu
zakres pomiarowy	$\pm 1 \mu\text{A}$	-
zakres napięcia wspólnego	$0.7 \div 2.8 \text{ V}$	-
częstotliwość graniczna	30 Hz	ograniczenie od INA333
pasmo szumu białego	$100 \text{ Hz} \div 200 \text{ kHz}$	górnne 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



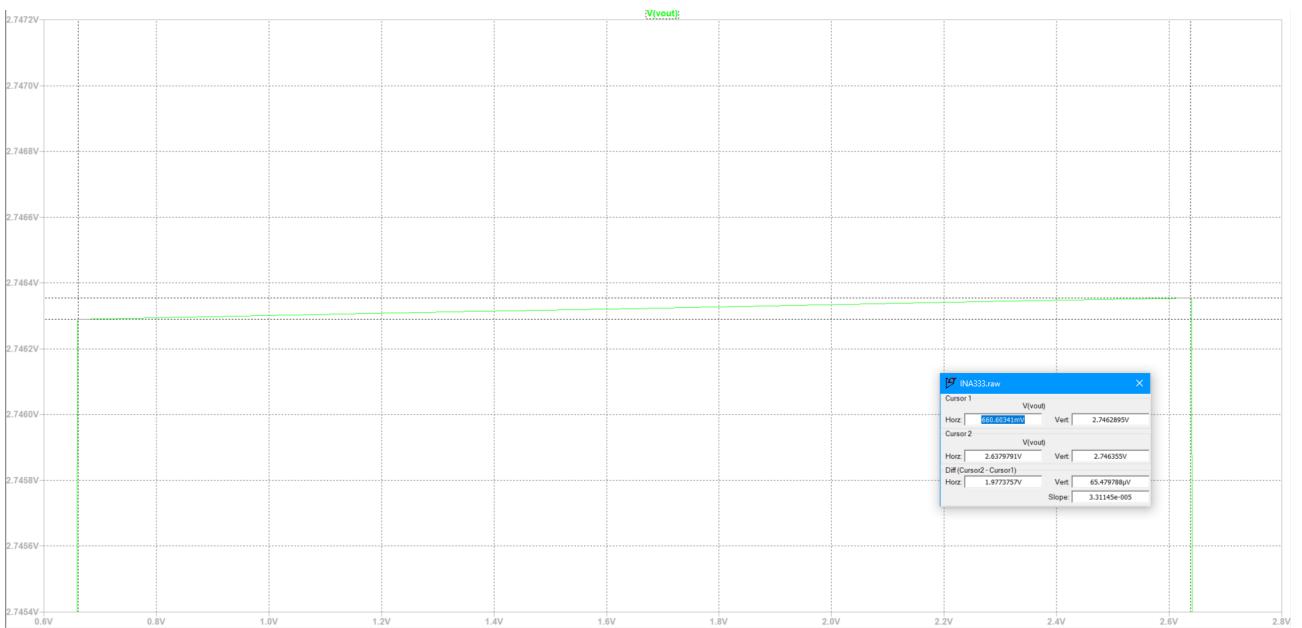
Rysunek 3.1: Symulacja tran stabilizatora napięcia LM1117-3.3 napięcia wejściowego (V_{in}) i wyjściowego (V_{out}).



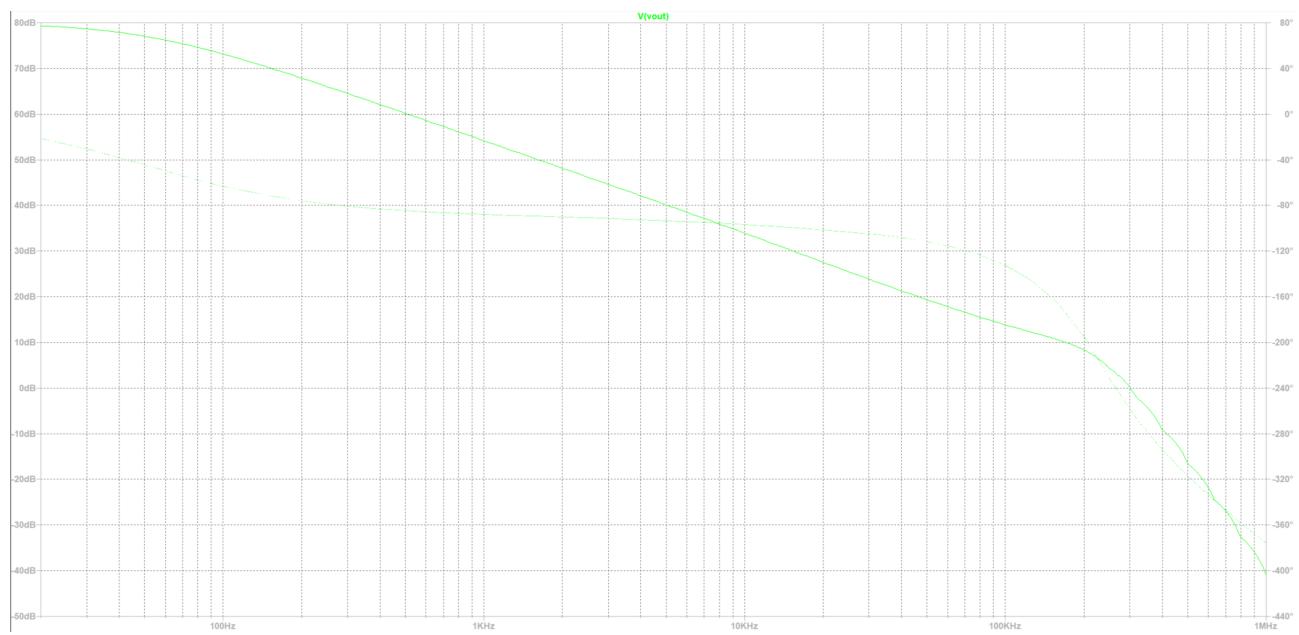
Rysunek 3.2: Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 1 \mu A$.



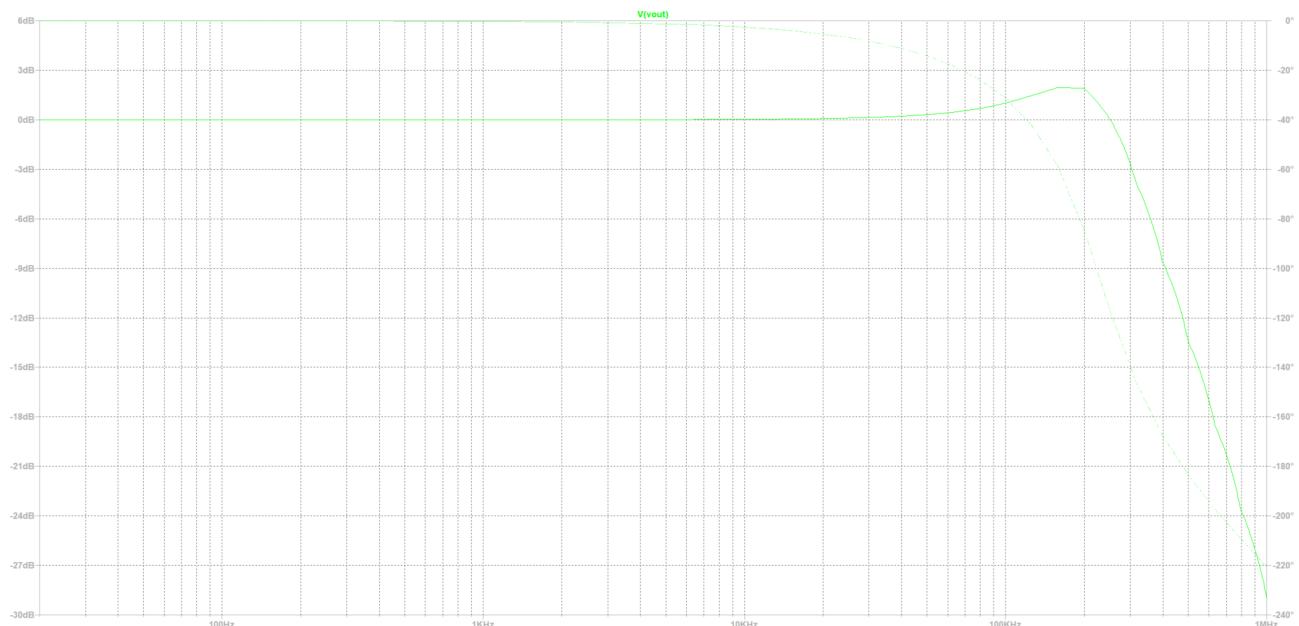
Rysunek 3.3: Symulacja parametryczna wzmacniacza pomiarowego w zakresie $\pm 100 \text{ nA}$.



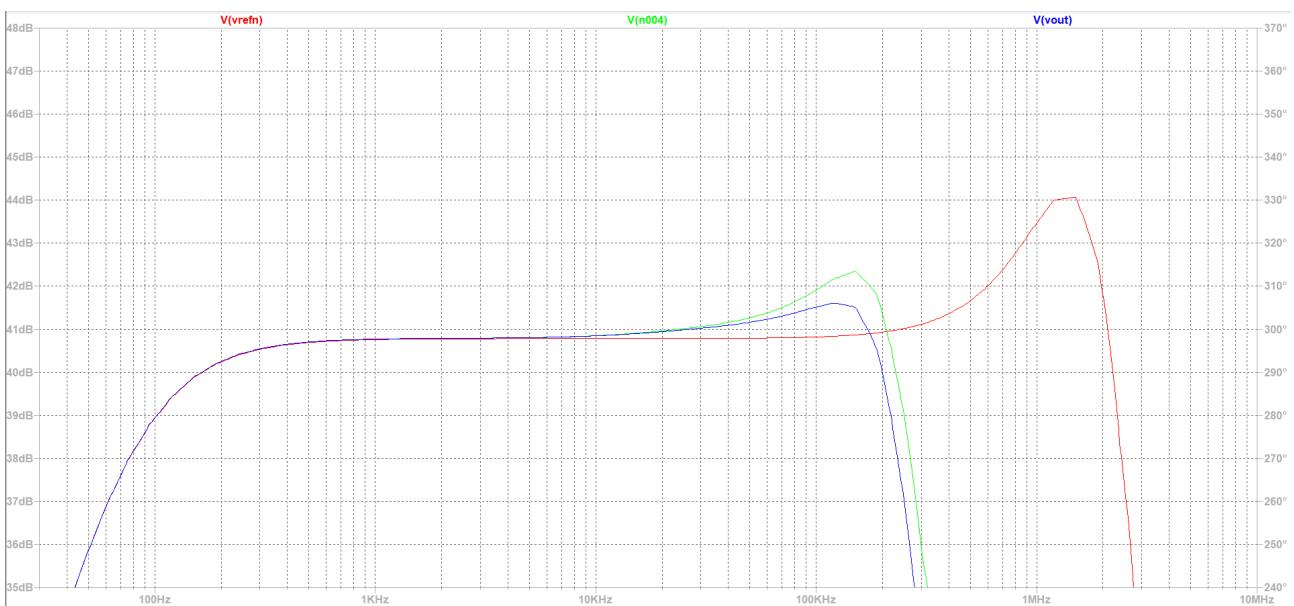
Rysunek 3.4: Symulacja dc wejściowego napięcia wspólnego wzmacniacza pomiarowego dla $I_{meas} = 1 \mu\text{A}$, różnica napięć $\approx 65 \mu\text{V}$.



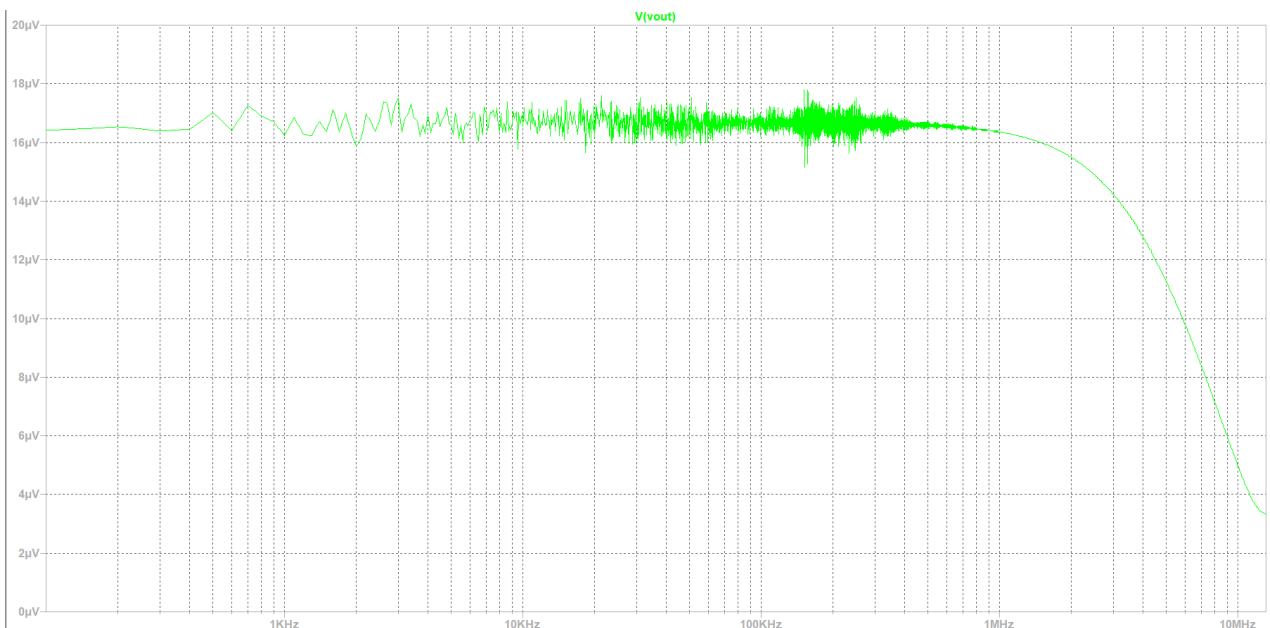
Rysunek 3.5: Wzmocnienie różnicowe INA333.



Rysunek 3.6: Wzmocnienie od wejścia REF wzmacniacza pomiarowego.



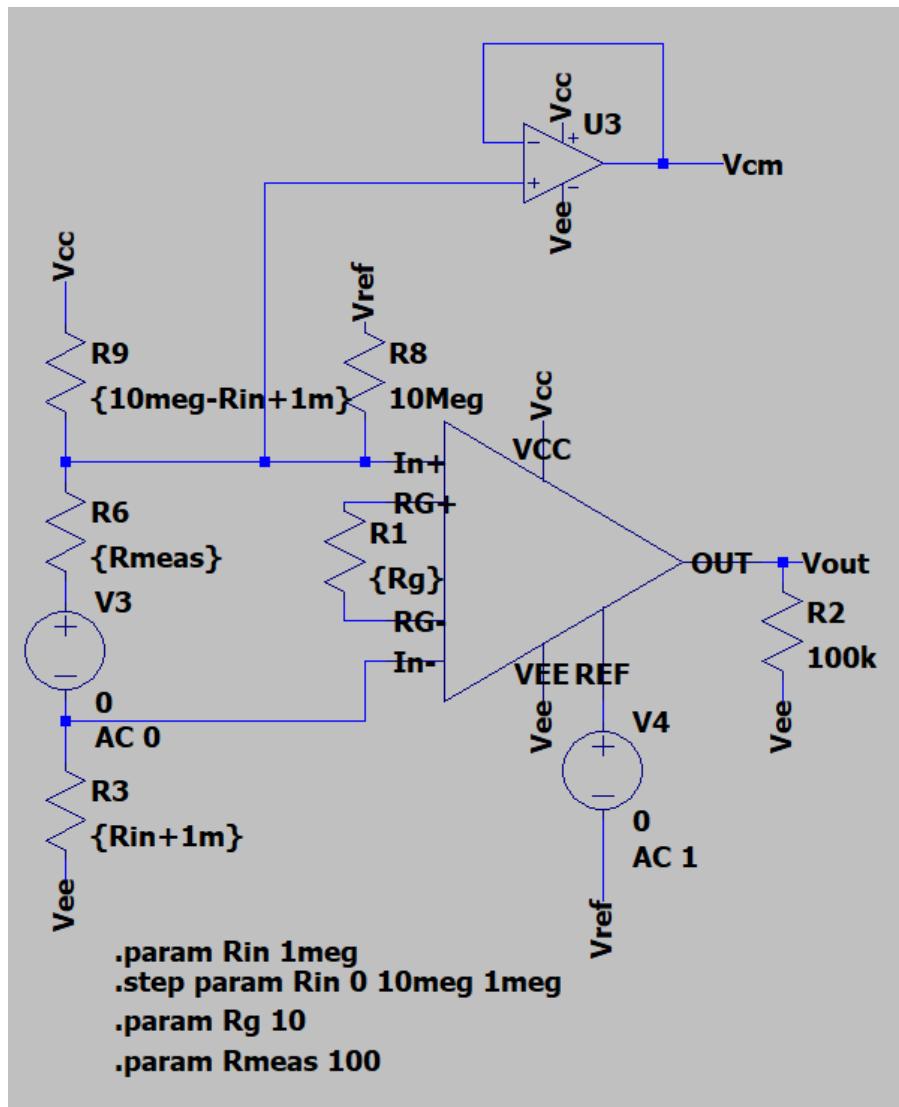
Rysunek 3.7: Charakterystyki częstotliwościowe układu: czerwona - pasmo przenoszenia generatora szumu, zielona - pasmo przenoszenia na wyjściu INA333, niebieska - pasmo przenoszenia za filtrem LPF z wtórnikiem - UWAGA, bez wtórnika jest podbicie o $\approx 7 \text{ dB}$ na wyjściu INA333 przy $f \approx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



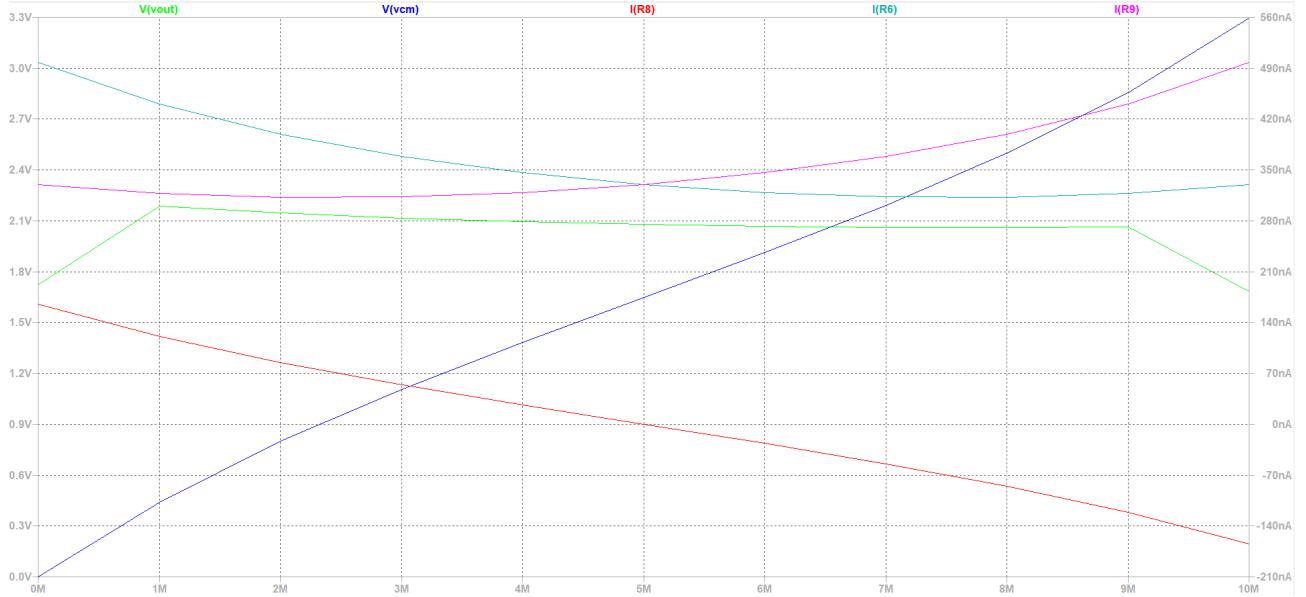
Rysunek 3.8: Transformata fouriera z 10 ms symulacji transient wzmacniacza pomiarowego z generacją szumu na referencji. Okno fft 100 Hz , co daje $\approx 1.65 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$.

3.1. Problem V_{CM} - do przedyskutowania

Po przeprowadzeniu dodatkowych symulacji, zauważono, że napięcie sumacyjne może powodować znaczne upływności przez rezystor polaryzujący wejścia układu pomiarowego. Schemat symulacyjny przedstawiono na rysunku 3.9. Podczas symulacji założono mierzony prąd $I_{meas} = 330 \text{ nA}$ i modyfikowano rezystory dzielnika napięcia w zakresie $0 \div 10 \text{ M}\Omega$. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 3.10. Różnica napięcia wyjściowego w zakresie dopuszczalnego napięcia wspólnego wyniosła $\approx 100 \text{ mV}$, co odpowiada różnicy natężenia prądu 100 nA , z tym, że dla napięć większych niż V_{REF} , ta różnica wynosi maksymalnie 17 mV . Propozycją rozwiązania problemu jest pomiar napięcia sumacyjnego i software'owa kompensacja związanych z nim upływności, jednak taka metoda pozwoli prawidłowo mierzyć prądy rzędu setek nA .

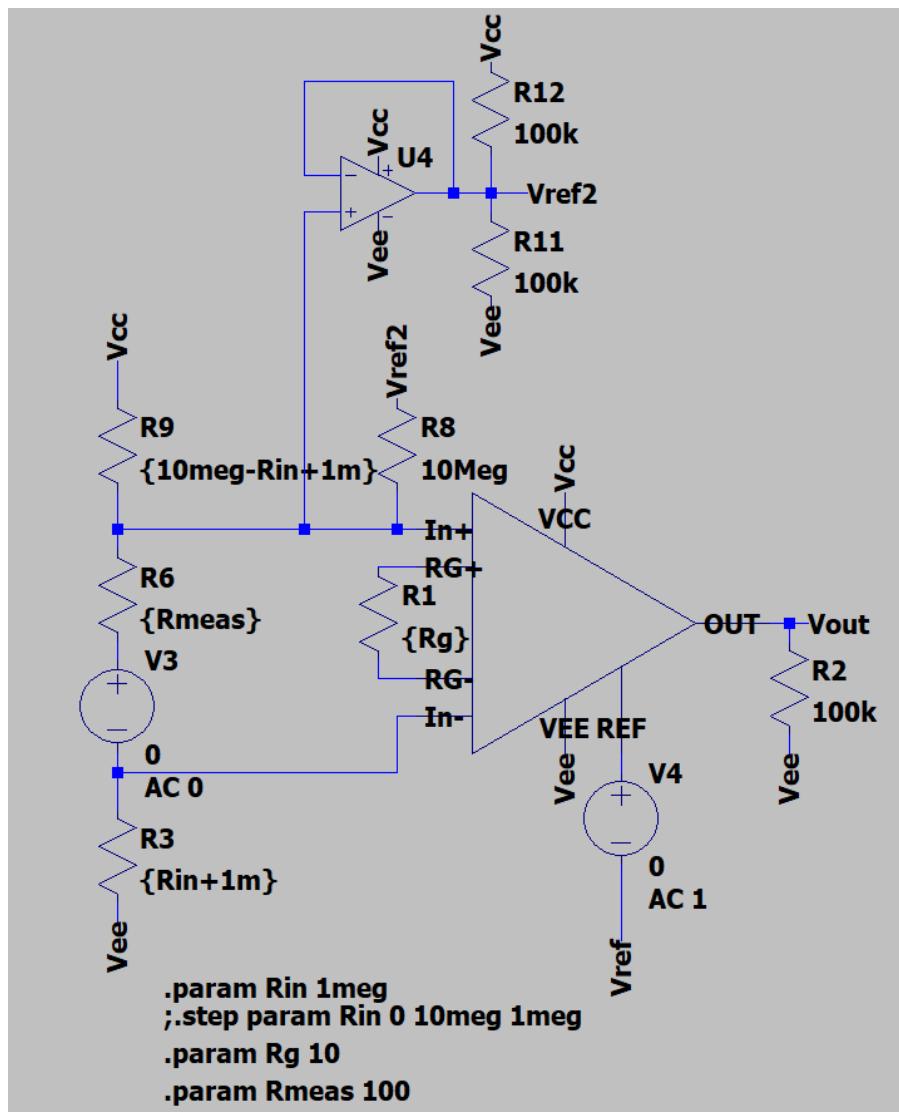


Rysunek 3.9: Schemat układu symulacyjnego do kompensacji prądów upływu poprzez pomiar V_{CM} .

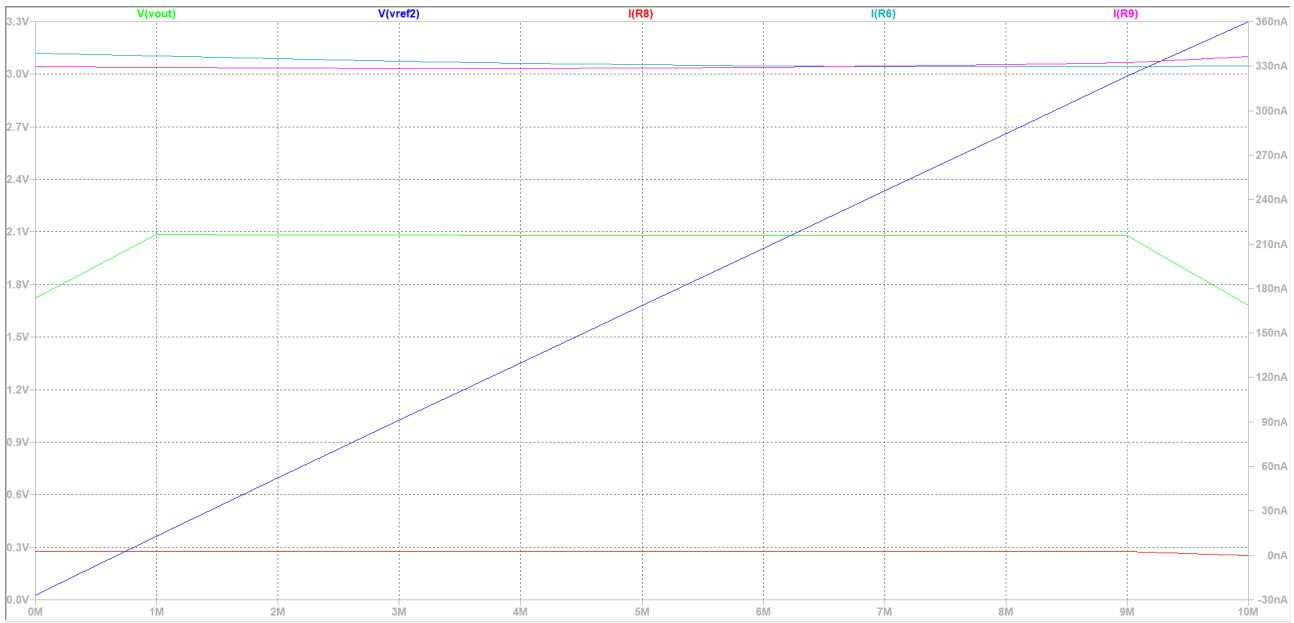


Rysunek 3.10: Wyniki symulacji V_{CM} dla prądu 330 nA , można zauważać upływność przez rezystor R_8 .

Drugim podejściem do problemu jest zmiana napięcia wspólnego podawanego przez rezystor do wejść wzmacniacza pomiarowego, tak by spadek napięcia na rezystorze był na tyle mały, że prąd upływu będzie możliwa zaniedbać. Osiągnięto to poprzez dołożenie wtórnika napięciowego i podłączenie jego wyjścia do rezystora. Wtedy spadek napięcia na rezystorze jest bliski napięciu niezrównoważenia wtórnika. Schemat układu przedstawiono na rysunku 3.11. Taka modyfikacja napięcia wspólnego nie powinna wpłynąć na pomiar, ze względu na duży CMRR, jednocześnie umożliwiając przepływ prądów polaryzacji, wynoszących według dokumentacji maksymalnie $\pm 200 \text{ pA}$. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 3.12. Jeśli wejścia nie są nigdzie podłączone, czyli nie ma zewnętrznego wymuszenia V_{CM} , napięcie wspólne silnie zależy od V_{OS} wtórnika i osiąga górną granicę dopuszczalnego zakresu napięć wspólnych, w przypadku $V_{OS} = 25 \text{ mV}$, a przy $V_{OS} = -200 \mu\text{V}$, $V_{CM} \approx 1.59 \text{ V}$, co jest bliskie V_{REF} . Z powyższych rozważań wynika, że wtórnik powinien mieć małe napięcie niezrównoważenia.



Rysunek 3.11: Schemat układu symulacyjnego do kompensacji prądów upływu po stronie analogowej.



Rysunek 3.12: Wyniki symulacji V_{CM} dla prądu 330 nA z kompensacją, upływność przez R_8 wynosi $\approx 2.5 \text{ nA}$, przy V_{OS} wtórnika wynoszącym 25 mV .