



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

Raport z projektu

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

z przedmiotu

**Analogowe układy peryferyjne w
systemach cyfrowych**

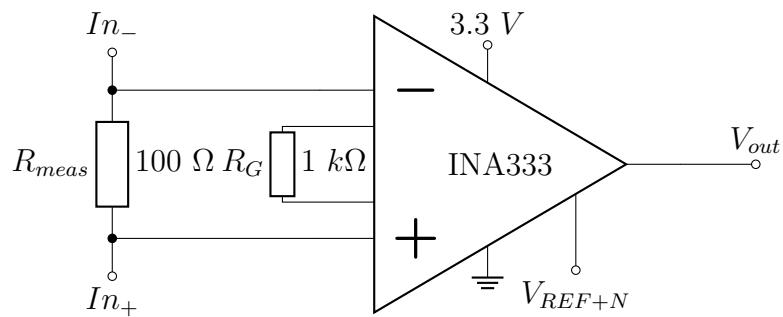
Elektronika i telekomunikacja - Systemy wbudowane, rok II studiów magisterskich

Piotr Kowol, Piotr Masurek, Michał Nizioł

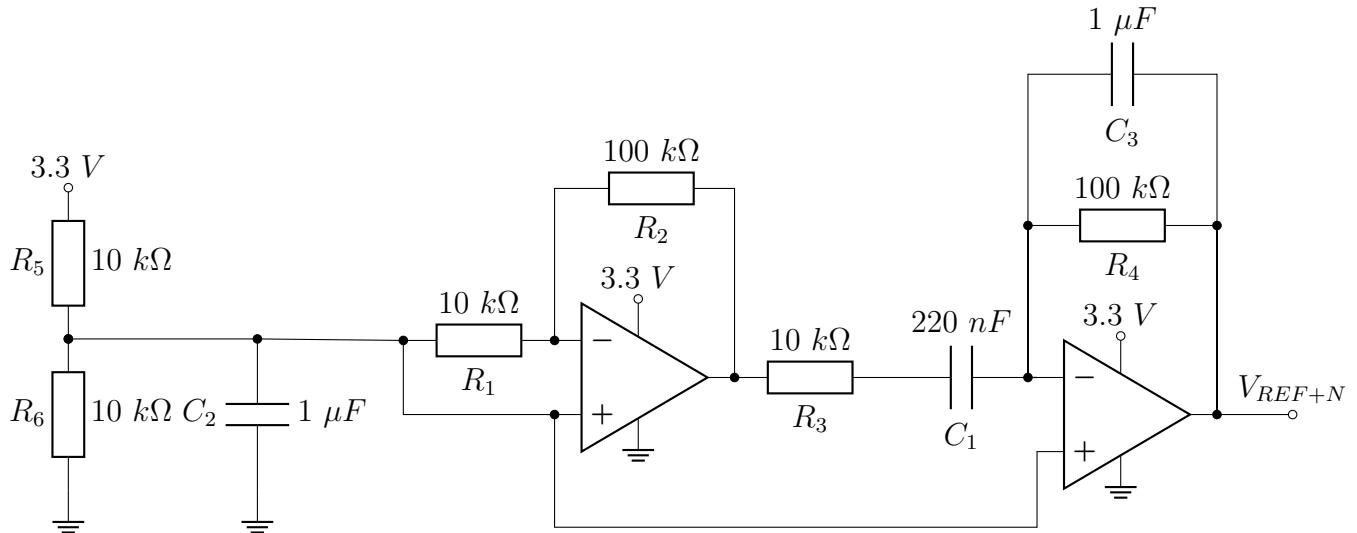
19 lutego 2026

1. Schematy ideowe układu

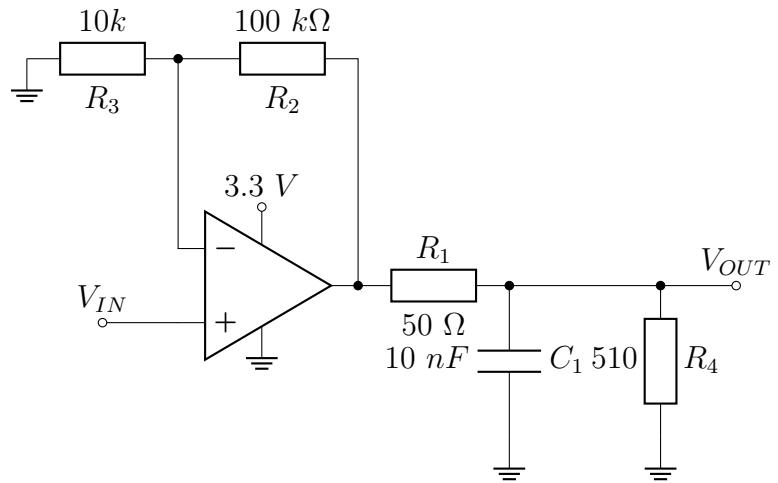
Poniżej przedstawiono schematy części analogowej układu. Podczas pomiarów okazało się, że szum INA333 jest znacznie większy od szumu generowanego przez generator szumu. W związku z tym, zredukowano szum generowany przez generator szumu oraz zmniejszono wzmacnienie INA333 z $K_u = 10000 \frac{V}{V}$ do $K_u = 100 \frac{V}{V}$. Modyfikacja wiązała się z wlutowaniem kondensatora o wartości $1 \mu F$ w sprzążenie zwrotne wyjściowego wzmacniacza generatora szumu, co dało obcięcie pasma do około $100 Hz$, oraz zmiana rezystora ustalającego wzmacnianie z 10Ω do $1 k\Omega$. Wprowadzone modyfikacje pozwoliły zmniejszyć szum do około $1 \div 2$ LSB. Schemat wzmacniacza pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.1, a generatora szumu na rysunku 1.2. Wyjście INA333 podłączeno do filtra anty-aliasing'owego, który został przedstawiony na rysunku 1.3. Rezystor R_4 zgodnie z dokumentacją zastosowanego wzmacniacza pozwala zmniejszyć wpływ obciążenia pojemnościowego na wzmacniacz, ale wprowadza tłumienie sygnału, dlatego zamiast wtórnika zastosowano wzmacniacz w konfiguracji nieodwracającej o niewielkim wzmacnieniu. Parametry robocze układu przedstawiono w tabeli 1.1.



Rysunek 1.1: Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.



Rysunek 1.2: Schemat ideowy źródła napięcia referencyjnego z układem generacji szumu.



Rysunek 1.3: Schemat pasywnego filtra RC o częstotliwości granicznej $f_g \approx 318 \text{ kHz}$.

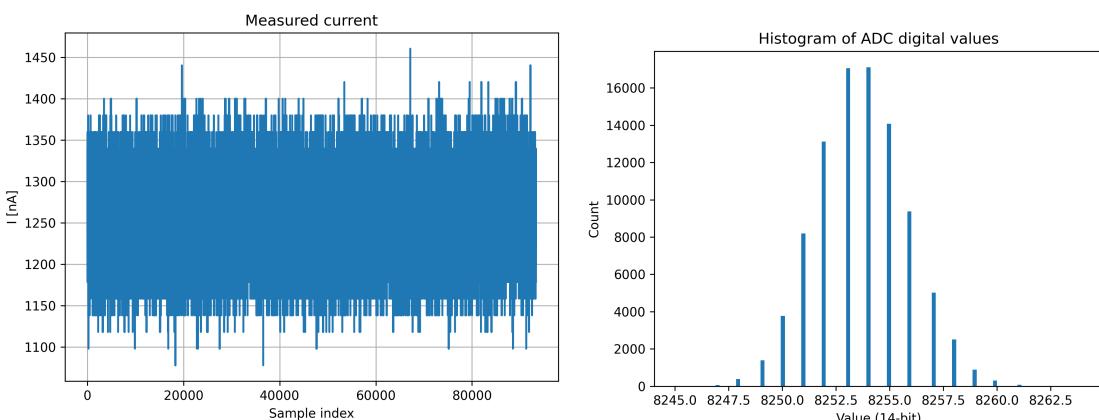
parametr	wartość	komentarz
czułość	$10 \frac{mV}{\mu A}$	czułość układu bez ditheringu
zakres pomiarowy	$\pm 100 \mu A$	-
zakres napięcia wspólnego	$0.7 \div 2.8 \text{ V}$	-
częstotliwość graniczna	30 Hz	ograniczenie od INA333
pasmo szumu białego	$100 \text{ Hz} \div 300 \text{ kHz}$	
napięcie szumu	$\approx 1.5 \text{ mV}$	w paśmie $100 \text{ Hz} \div 300 \text{ kHz}$
częstotliwość próbkowania	$f_S = 300 \text{ kHz}$	z dokumentacji STM32F103C8T6
częstotliwość nadpróbkowania	$f_{OVS} = 18.75 \text{ kHz}$	nadpróbkowanie 16 razy
dodatkowe bity	+2 bity	na podstawie AN5537
teoretyczna wartość mierzalnego prądu przy ditheringu	$I_{meas} \approx 25 \text{ nA}$	jeśli nie tracimy na ENOB

Tabela 1.1: Parametry zaprojektowanego układu do pomiaru prądu.

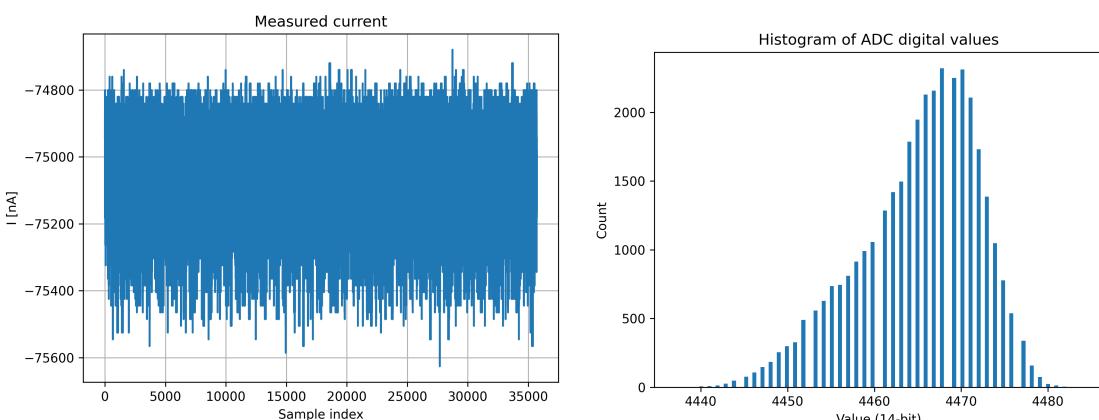
2. Pomiary

Podczas pomiarów wystąpiły problemy z rozkładem prawdopodobieństwa szumu - była widoczna asymetria powodowana przez układ zasilania - LDO. Asymetria była zależna od natężenia i polaryzacji prądu. Rozwiązaniem było zastosowanie zasilacza laboratoryjnego - szum był Gaussowski, do puki zasilacz się nie nagrzał - potem rozkład nieco się zniekształcił, ale znacznie mniej niż w przypadku LDO. Przebiegi czasowe oraz rozkłady prawdopodobieństwa dla kilku pomiarów przedstawiono na rysunkach 2.1 - 2.5. Dodatkowa filtracja pozwala uzyskać dokładniejsze wyniki, co zostało przedstawione na rysunku 2.6. Dodatkowym utrudnieniem w przeprowadzaniu pomiarów było występowanie zewnętrznych zakłóceń, co powodowało chwilowe zmiany napięcia wejściowego przetwornika ADC, oraz wprowadzało zniekształcenie w histogramie.

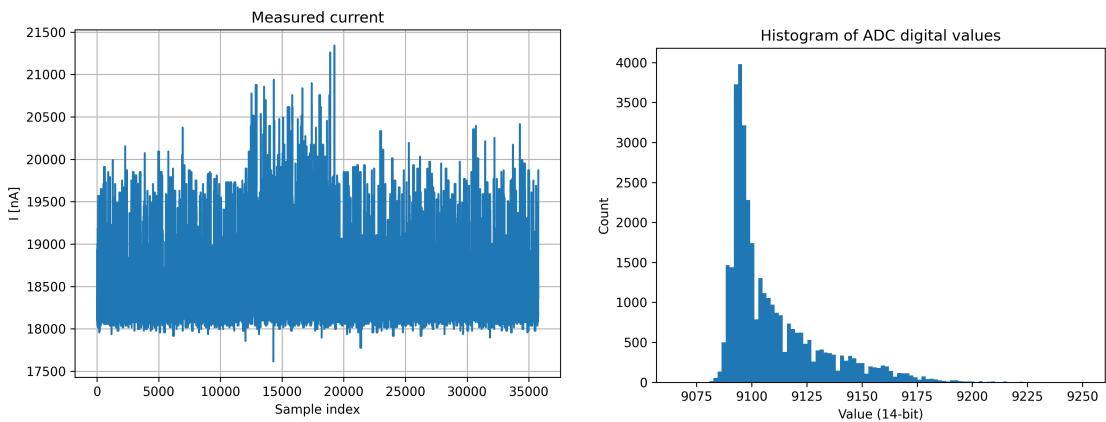
Zastosowany algorytm oblicza sumę 16 próbek, a następnie dzieli wynik przez 4, co pozwala zapisać wynik na 14 bitach zamiast 12. Tak przygotowane dane są przesyłane do komputera przez UART.



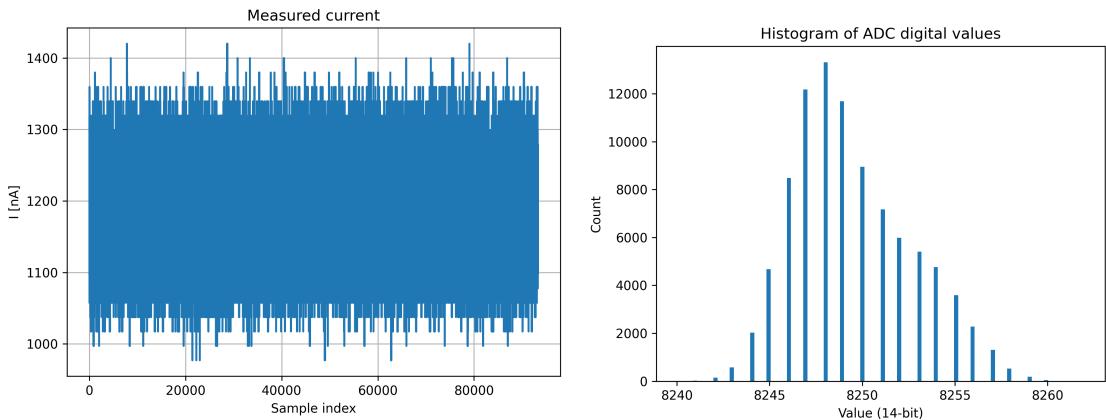
Rysunek 2.1: Mierzony prąd oraz rozkład prawdopodobieństwa szumu dla prądu $0 \mu\text{A}$ przy zasilaniu z LDO - nie widać zniekształceń.



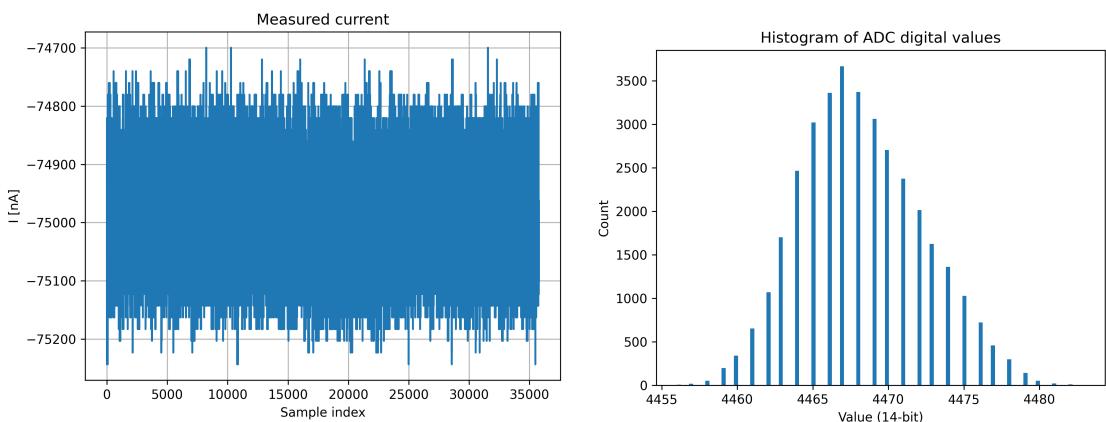
Rysunek 2.2: Mierzony prąd oraz rozkład prawdopodobieństwa szumu dla prądu $-75 \mu\text{A}$ przy zasilaniu z LDO - odwrócona polaryzacja oraz zniekształcenie dla wyższych wartości.



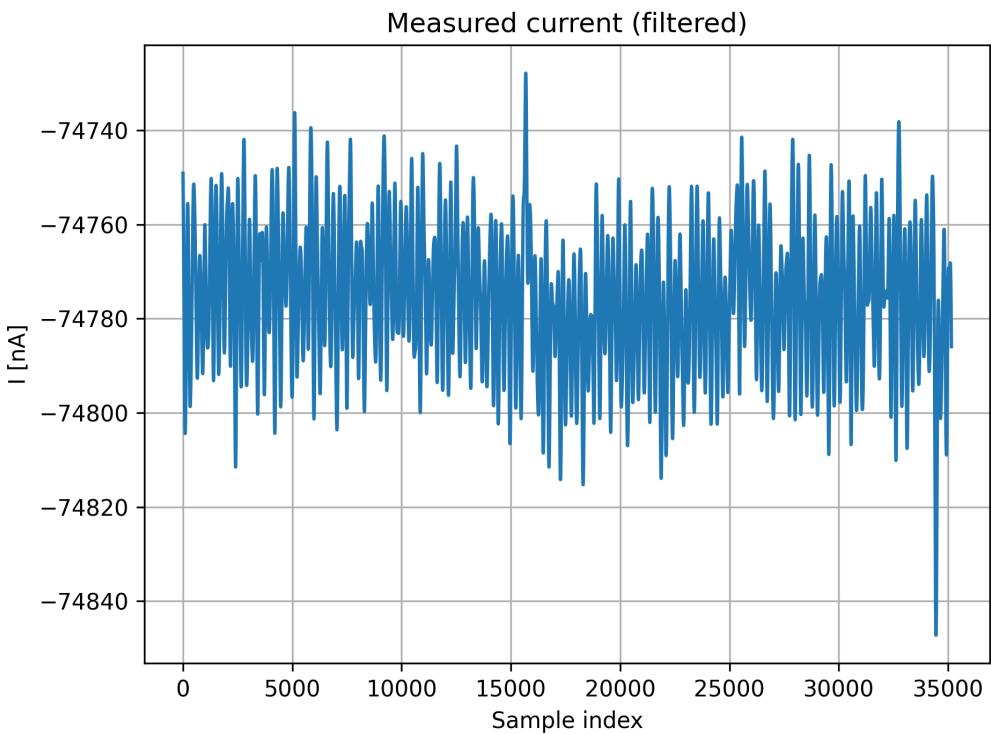
Rysunek 2.3: Mierzony prąd oraz rozkład prawdopodobieństwa szumu dla prądu $16 \mu A$ przy zasilaniu z LDO - zniekształcenie dla mniejszych wartości.



Rysunek 2.4: Mierzony prąd oraz rozkład prawdopodobieństwa szumu dla prądu $0 \mu A$ przy zasilaniu z zasilacza laboratoryjnego - widać niewielkie zniekształcenie, ale nie zmienne.



Rysunek 2.5: Mierzony prąd oraz rozkład prawdopodobieństwa szumu dla prądu $-75 \mu A$ przy zasilaniu z zasilacza laboratoryjnego - zniekształcenie niemalże takie same jak dla zerowego prądu z zasilacza, można zauważyć zewnętrzne zakłócenie.



Rysunek 2.6: Przebieg prądu $-75 \mu A$ po filtracji przy zasilaniu z zasilacza.

3. Podsumowanie

Mimo napotkanych problemów udało się zrealizować pomiar poniżej 1 LSB - dzięki decy-
macji zwiększoano rozdzielcość przetwornika o 2 bity.