

Jakub PAJAKOWSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, KATEDRA SYSTEMÓW TELEKOMUNIKACYJNYCH I OPTOELEKTRONIKI

Pomiar wzmocnienia napięciowego scalonych wzmacniaczy operacyjnych CMOS w zakresie temperatur od 4,2 K do 300 K

Mgr inż. **Jakub PAJAKOWSKI**

Studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej w zakresie Elektronicznej Aparatury i Systemów Pomiarowych ukończył w 1998r. Obecnie pracuje w Katedrze Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Obszar zainteresowań naukowych obejmuje zagadnienia z zakresu rozproszonych systemów pomiarowych, zagadnień z obszaru nadprzewodnictwa i krioelektroniki

e-mail: pajakow@et.put.poznan.pl



Streszczenie

W artykule opisane jest badanie wzmacniaczy operacyjnych CMOS w zakresie temperatur od 4,2 K do 300 K. Charakterystyczną cechą wzmacniaczy operacyjnych CMOS jest histereza wejściowego napięcia niezrównoważenia dla pracy wzmacniacza przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. W artykule opisany jest sposób, który pomimo istnienia histerezy wejściowego napięcia niezrównoważenia, pozwala na wykonanie pomiarów wzmocnienia napięciowego wzmacniaczy operacyjnych CMOS.

Słowa kluczowe: Wzmacniacze operacyjne, niskie temperatury, CMOS.

Open loop gain measurement of CMOS Operational Amplifiers of range from 4,2 K to 300 K

Abstract

The article describes study of the CMOS operational amplifiers within the temperatures ranging from 4,2 K to 300 K. The characteristic feature of CMOS operational amplifiers is hysteresis of input offset voltage for performance of amplifiers with open loop feedback. The method presented allows conducting measurements of voltage gain of CMOS operational amplifiers despite this hysteresis.

Keywords: Operational amplifiers, low temperatures, CMOS.

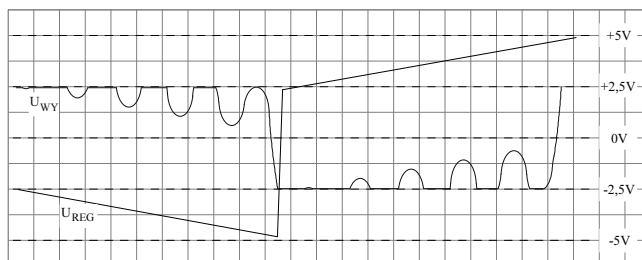
1. Wstęp

W torze pomiarowym zawierającym: czujnik, kondycjoner i układ akwizycji danych występuje zjawisko wzmocnienia sygnału pomiarowego. Artykuł traktuje o pracy wzmacniaczy operacyjnych CMOS w niskich temperaturach. Praca podzespołów elektronicznych poniżej 200 K nie jest typowym zakresem przewidzianym przez ich producentów. Wiele urządzeń technicznych działa jednak w zakresie niższych temperatur, jak na przykład badania kosmiczne, badania z dziedziny fizyki ciała stałego, krioterapia, medycyna i przemysł spożywczy [1]. Prowadzone wcześniej badania na innych typach wzmacniaczy operacyjnych CMOS wykazały, że użyte w badaniach wzmacniacze zachowywały swoje właściwości wzmacniające aż do 30 K [3].

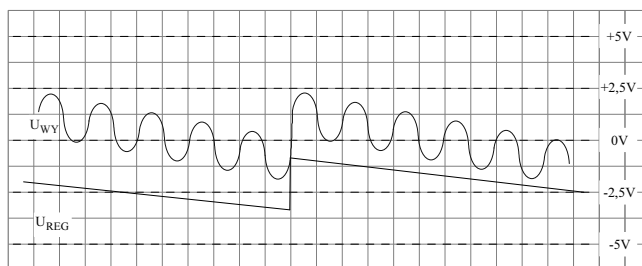
2. Konfiguracja wzmacniacza

Najważniejszym parametrem determinującym poprawną pracę wzmacniacza jest wzmocnienie różnicowe K_{UR} . Wzmocnienie różnicowe definiujemy jako wzmocnienie wolnozmiennego sygnału wejściowego przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Ponieważ wzmacniacze operacyjne CMOS w układzie z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego wykazują pływający *offset* (rys. 1), a dla małych częstotliwości sygnału wzmacnianego niemożliwe jest określenie amplitudy sygnału wyjściowego, badania prowadzono dla wzmacniacza

objętego pętlą sprzężenia zwrotnego z zadaniem dużym wzmocnieniem (rys. 2).



Rys. 1. Praca wzmacniacza operacyjnego CMOS w układzie otwartej pętli
Fig. 1. Performance of the CMOS operational amplifiers with open loop circuit



Rys. 2. Praca wzmacniacza operacyjnego CMOS objętego słabym sprzężeniem zwrotnym
Fig. 2. Work of the CMOS operational amplifiers with weak negative feedback

Założone wzmocnienie podyktowane jest stosunkowo małą dokładnością pomiaru napięcia wyjściowego, które w dalszej części przeliczane jest na wzmocnienie różnicowe, zgodnie z zależnością przedstawioną we wzorze (1):

$$K_{UR} = \frac{(1 + \alpha)}{\left(\frac{1 + \alpha}{K} - 1\right)} \quad (1)$$

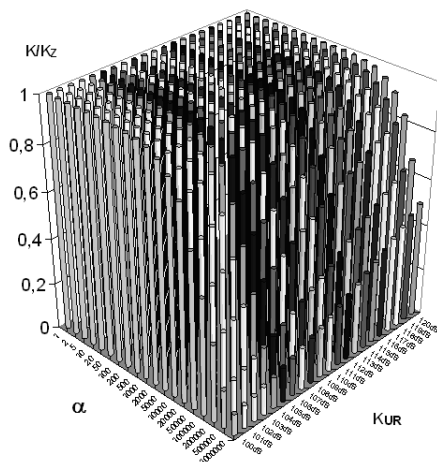
gdzie: K_{UR} – to wzmocnienie różnicowe z otwartą pętlą, K – zmierzone wzmocnienie wzmacniacza, α - stosunek R_2 do R_1 .

Analiza wzoru (1) przedstawiona jest na rys. 3. Widoczne jest, że dla $\alpha = \text{ok. } 10^5$ i spodziewanego wzmocnienia na poziomie 120dB, stosunek K mierzonego do K_z zadanego jest mniejszy od 0,9.

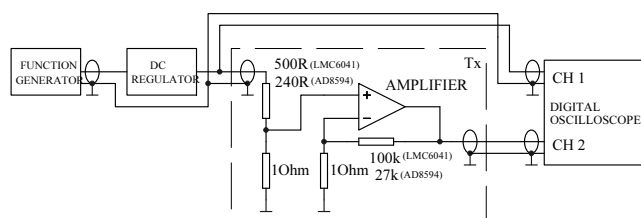
Należy zatem dobierać wartość wzmocnienia zadanego taką samą, jak wartość katalogowa wzmocnienia wzmacniacza, wówczas stosunek K/K_z przyjmuje wartość 0,5 i możliwy jest bardziej precyzyjny odczyt pośredni wzmocnienia różnicowego K_{UR} .

Wzmocnienie różnicowe - K_{UR} , zostało przebadane na stanowisku pokazanym na rys.4. Jako sygnał wejściowy przyjęto sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1Hz (AD8594), 0,2Hz (LMC6041) i amplitudzie odpowiednio małej, aby po podzieleniu przez odpowiednio 240 i 500 w dzielniku napięciowym, na wejściu wzmacniacza (w konfiguracji nieodwracającej o wzmocnieniu odpowiednio $27 \cdot 10^3$ i 10^5 V/V) były dziesiąte części mikrowolta. Wartości częstotliwości sygnału testowego dobrano tak, aby była dwukrotnie mniejsza od częstotliwości, przy której występuje trzydecybelowy spadek wzmocnienia.

Z powodu silnej dążności do nasycania się wzmacniacza, do sygnału z generatora dodawano napięcie stałe równoważące wzmacniacz operacyjny.



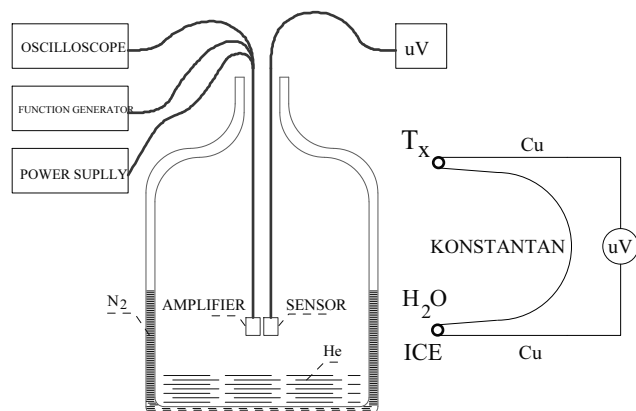
Rys. 3. Analiza graficzna wzoru na wzmożenie napięciowe wzmacniacza operacyjnego w układzie nieodwracającym
Fig. 3. Graphical analysis of voltage gain formula of the non-invertible operational amplifiers



Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska do badania K_{UR}
Fig. 4. Block diagram of the position for measuring K_{UR}

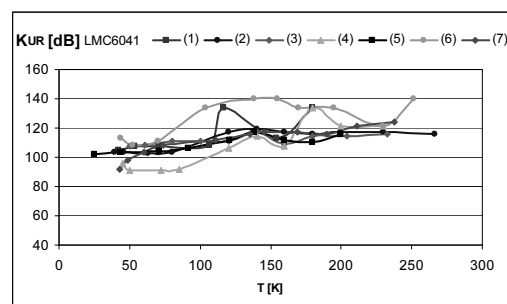
3. Pomiar

Pomiary zostały przeprowadzone w Zakładzie Krioterometrii Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu. Pomiarów dokonano w zbiorniku z ciekłym heliem. Na schemacie blokowym (rys. 5) widoczne są: zbiornik z ciekłym heliem w otoczeniu ciekłego azotu oraz - jako czujnik temperatury - termopara Miedź-Konstantan ze spoiną odniesienia zanurzoną w wodzie z lodem. Temperatury pośrednie między temperaturą ciekłego helu, a otoczenia uzyskiwano poprzez utrzymywanie czujnika temperatury i elementu badanego na odpowiedniej wysokości nad lustrem cieczy.



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego
Fig. 5. Block diagram of the measuring position

Na rys. 6 przedstawione są wykresy zależności K_{UR} wzmacniaczy LMC6041 w funkcji temperatury. Dla temperatur w całym zakresie pracy wzmacniacze LMC6041(2), LMC6041(3), LMC6041(5) i LMC6041(6) mają współczynnik wzmocnienia z otwartą pętlą mieszczący się w granicach 100 ÷ 120 dB (wartość katalogowa to 120 dB). Wzmacniacz LMC6041(1) w całym zakresie temperatur, w których pracował, charakteryzował się K_{UR} równym ok. 110 dB, przy czym w temperaturach 117 K i 180 K K_{UR} zwiększyło się do wartości 133 dB. Wzmacniacz LMC6041(4) miał największe wahania K_{UR} w funkcji temperatury, jego wartość wynosiła bowiem od 90 dB do 133 dB. Największym wzmocnieniem charakteryzował się egzemplarz LMC6041(6), którego K_{UR} , w zależności od temperatury, mieściła się w granicach od 110 dB do 140 dB.



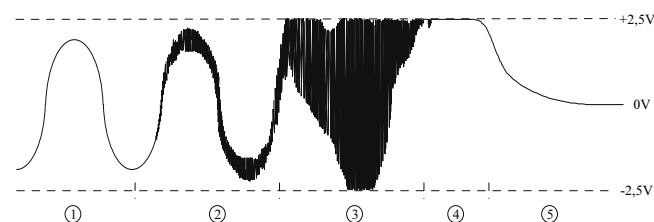
Rys. 6. Wykres zależności K_{UR} wzmacniaczy LMC6041 w funkcji temperatury
Fig. 6. Open loop gain K_{UR} of LMC6041 amplifiers versus temperature

Przebadane wzmacniacze LMC6041 przestawały wzmacniać w różnych temperaturach w zależności od egzemplarza. W tabeli 1 przedstawiony jest wykaz zbadanych wzmacniaczy typu LMC6041 i ich temperatur granicznych. Temperatura graniczna T_g jest to ostatni punkt charakterystyki $K_{UR} = f(T)$ i określona jest jako taka wartość, poniżej której w odstępnie 2 K wzmacniacz przestaje pracować.

Tab. 1. Temperatury graniczne T_g wzmacniaczy operacyjnych LMC6081
Tab. 1. Limiting temperature T_g of the LMC6081 operational amplifiers

LMC6041	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
T_g [K]	42	39,5	43	50	25	44	43,3

Na rys. 7 przedstawiony jest wykres czasowy sygnału na wyjściu wzmacniacza w chwili zakończenia pracy po przekroczeniu temperatury granicznej T_g . Jest on podzielony na pięć faz. Faza (1) jest to stan poprawnej pracy wzmacniacza operacyjnego.



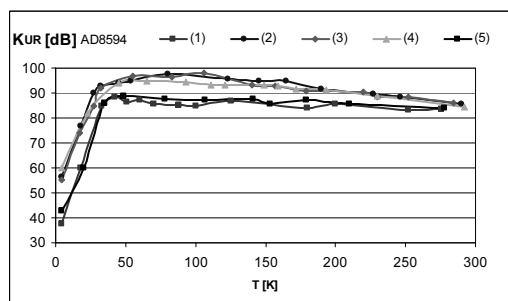
Rys. 7. Sygnał na wyjściu wzmacniacza w chwili zakończenia pracy
Fig. 7. Signal on the output of amplifiers at the operation finish

Faza (2) występuje, gdy wzmacniacz jest w temperaturze $T = T_g - 1$ K.

W fazie (3) temperatura otoczenia wzmacniacza jest równa $T = T_g - 1,5$ K. Faza (4) występuje, gdy wzmacniacz jest w temperaturze $T = T_g - 2$ K i wchodzi w stan nasycenia +2,5 V lub -2,5 V.

W fazie (5) wzmacniacz nie pracuje i napięcie na jego wyjściu jest równe 0 V. Temperatury przyporządkowane poszczególnym fazom zostały określone empirycznie, w oparciu o obserwacje prowadzone podczas badań parametrów wzmacniaczy. Zjawisko to znane jest jako *latch-up*. Jest to niestabilna praca przy przekroczeniu temperatury wymrożenia *freeze-out* [4].

Na rysunku 8 przedstawione są wykresy zależności K_{UR} wzmacniaczy AD8594 w funkcji temperatury. Wartość katalogowa czynnika wzmacniającego wynosi $K_{UR} = 90$ dB TYP. W temperaturze pokojowej wzmocnienie różnicowe z otwartą pętlą waha się, w zależności od egzemplarza, od 83 dB do 85 dB. Wzmocnienie wzmacniaczy AD8594(1) i AD8594(5) ma wartość ok. 83 dB a następnie, wraz z obniżaniem temperatury zwiększa się do ok. 88 dB w temperaturze 42 K, poniżej temperatury 42 K silnie zmniejsza się, przyjmując wartości K_{UR} odpowiednio 37,5 dB i 43 dB w temp 4,2 K. Wzmocnienie K_{UR} wzmacniaczy AD8594(2), ... (3) i AD8594(4) wraz z obniżaniem temperatury zwiększa się z wartości ok. 85 dB w temperaturze pokojowej do wartości 95 dB w temperaturze 55 K.



Rys. 8. Wykres zależności K_{UR} wzmacniaczy AD8594 w funkcji temperatury
Fig. 8. Open loop gain K_{UR} of AD8594 amplifiers versus temperature

Poniżej 55 K następuje zmniejszenie wzmocnienia do ok. 90 dB przy 30 K a przy dalszym obniżaniu temperatury wartości ta zmniejsza się do 56 dB, 55 dB i 60 dB w temperaturze wrzenia ciekłego helu.

4. Wnioski

Opisany został sposób, który pomimo wystąpienia histerezy wejściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych CMOS, pozwolił na przebadanie wybranych wzmacniaczy operacyjnych w temperaturach z zakresu (4,2÷300 K). Wyniki doświadczeń pokazują, że wzmacniacz AD8594 zachowuje swoje właściwości wzmacniające w temperaturze 4,2 K.

5. Literatura

- [1] W. Nawrocki, S. Michalak, J. Pająkowski; Operational Amplifiers and Bipolar Transistors at 77K. Eighteenth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC18), Mumbai, India, 2000
- [2] W. Nawrocki, J. Pająkowski; Operational Amplifiers in the Temperature Range from 300 to 4K. XX International Cryogenic Engineering Conference, Pekin 2004, Elsevier 2005, Oxford.
- [3] J.A. Swenson, K.D. Baker; CMOS operational amplifier performance at cryogenic temperatures, Cryogenics, no. 2, vol. 33, 1993.
- [4] E.A. Gutierrez-D., M. Jamal Deen, C.L. Claeys; Low temperature electronics, physics, devices, circuits and applications, Academic Press San Diego, 2001

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Cennik publikacji reklam w miesięczniku naukowo-technicznym PAK

Reklama	Czarno-biała	Kolorowa
I okładka	-	1 800,00 PLN netto
II okładka	-	1 600,00 PLN netto
III okładka	-	1 500,00 PLN netto
IV okładka	-	1 700,00 PLN netto
1 strona (175x250 mm)	900,00 PLN netto	1 100,00 PLN netto
½ strony (175x125mm) - pozioma	500,00 PLN netto	700,00 PLN netto
½ strony (85x250 mm)- pionowa	500,00 PLN netto	700,00 PLN netto
⅓ strony (175x85 mm)	400,00 PLN netto	-
¼ strony (85x125 mm)	300,00 PLN netto	-

Do podanych cen należy doliczyć podatek VAT w wysokości 22%.