

## Łukasz MACIOSZEK

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej  
ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra

# Ograniczenia cyfrowego przetwornika impedancji AD5933

Mgr inż. Łukasz MACIOSZEK

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego (2009). Po studiach pracował na stanowisku konstruktor-programista w ośrodku badawczo-rozwojowym. Obecnie, jako asystent w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego, zajmuje się badaniem właściwości materiałów z zastosowaniem spektroskopii impedancyjnej.



e-mail: L.Macioszek@ime.uz.zgora.pl

### Streszczenie

W pracy podjęto próbę zbadania przydatności układu AD5933 do współpracy z czujnikami impedancyjnymi o charakterze pojemnościowym. Nakreślono główne ograniczenia przetwornika AD5933 wynikające z jego konstrukcji. Porównano wyniki pomiarów modułu impedancji dwójników równoległych RC otrzymane za pomocą układu AD5933 i miernika HP4284A. Wyniki badań wskazują, że błąd pomiaru modułu impedancji maleje wraz z zawężaniem przedziałów wartości mierzonych. Przy dopuszczalnym błędzie pomiaru sięgającym kilku procent, przetwornik AD5933 może być zastosowany w urządzeniu docelowym.

**Słowa kluczowe:** AD5933, cyfrowy przetwornik impedancji, pomiar impedancji.

## Limitations of the digital impedance converter (AD5933)

### Abstract

In the paper there is made an attempt to verify the suitability of using the AD5933 impedance converter with capacitive-type impedance sensors. For this reason the levels of measurement errors of an impedance varying in a wide range were determined. The structure (Fig. 1) and the principle of operation of the AD5933 converter are presented. There are described the main limitations resulting from its construction and the available current measurement in the AD5933 converter (without simultaneous measurement of voltage), which forces making the calibration measurement before the real measurement of an unknown impedance. The accuracy of the impedance modulus measurement of chosen parallel RC circuits by means of the AD5933 was examined by comparison with the results obtained with use of the precise HP4284A LRC meter. The values of resistance and capacitance in the exemplary circuits were selected in such a way that the resultant impedance modulus changed in the possibly wide range along with changes of the measurement frequency. The results of the tests made on three chosen RC circuits are presented in the text (Figs. 2 - 4). Fig. 5 shows the impedance modulus relative error. Based on the findings of the tests one can conclude that the impedance measurement error decreases as the ranges of the measured values become narrower. The AD5933 impedance converter can be used in a measuring system when assuming that the measurement error of a few percent is acceptable.

**Keywords:** AD5933, digital impedance converter, impedance measurement.

## 1. Wprowadzenie

Za pomocą czujników impedancyjnych mogą być mierzone różnego typu wielkości fizyczne. W niektórych przypadkach otrzymanie szukanej informacji wymaga jedynie pomiaru impedancji przy jednej, określonej częstotliwości. Często jednak o właściwościach badanych obiektów mówią dopiero pomiary dokonane w szerokim paśmie częstotliwości. Dodatkowo, jeżeli mierzone obiekty mają charakter pojemnościowy, ich impedancja może zmieniać się w szerokim zakresie.

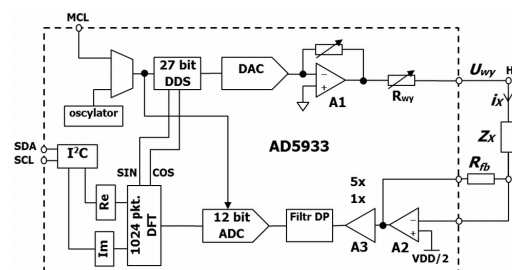
Do analizy obiektów, których zmiany modułu impedancji w dziedzinie częstotliwości niosą najważniejsze informacje, można użyć rozbudowanych systemów spektroskopii impedancyjnej.

Nie zawsze jednak jest to możliwe. W zależności od niezbędnej dokładności pomiaru może się okazać, że potrzebnej analizy można dokonać również prostszymi urządzeniami, których budowę, w celu minimalizacji kosztów, można oprzeć na przykład na scalonym mikrosystemie. Układ taki powinien umożliwiać zadawanie sygnału pomiarowego o ustalonym zakresie częstotliwości i amplitudzie oraz pomiar impedancji badanego obiektu. Wymienione zadanie można zrealizować za pomocą przetwornika impedancji AD5933 [1]. Układ ten znalazł już szereg zastosowań, między innymi w wirtualnym mierniku RLC [2], systemie do badań wiroprądowych [3] oraz systemie służącym do biopomiarów [4]. Brak opublikowanych badań przedstawiających dokładność pomiaru impedancji w szerokim zakresie częstotliwości skłonił autora do przeprowadzenia własnych. Celem badań była ocena przydatności układu AD5933 do współpracy z czujnikami, których wartości modułu impedancji mogą się zawierać w szerokim zakresie, a ich analiza wymaga pomiarów w szerokim paśmie częstotliwości.

## 2. Budowa i zasada działania układu AD5933

Strukturę układu AD5933 (rys. 1) można podzielić na trzy główne bloki funkcjonalne:

- blok generujący sygnał pomiarowy, składający się z syntezy DDS, który może być taktowany oscylatorem wewnętrznym o stałej częstotliwości  $f_{osc} = 16,67$  MHz lub zewnętrznym sygnałem podanym przez użytkownika, przetwornika cyfrowo-analogowego (DAC), wzmacniacza A1 o programowalnym wzmacnieniu i rezystancji wyjściowej  $R_{wy}$ ;
- blok pomiarowy, do którego można zaliczyć wzmacniacz A2, który wraz z zewnętrznym rezystorem  $R_b$  pełni funkcję przetwornika prąd-napięcie, wzmacniacz A3 o programowalnym wzmacnieniu (1 lub 5), filtr dolnoprzepustowy oraz 12-bitowy szybki (1 MSPS) przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC);
- blok obliczeniowy, oparty na procesorze sygnałowym realizującym algorytm dyskretnej transformaty Fouriera na danych zebranych z przetwornika ADC.



Rys. 1. Schemat blokowy układu AD5933  
Fig. 1. Functional block diagram of the AD5933

Przetwornik AD5933 posiada jedynie tor pomiaru prądu, zaś do wyznaczenia impedancji z definicji potrzebna jest również znajomość napięcia na badanym obiekcie. Stąd przewidziane przez producenta są dwa pomiary – kalibracyjny oraz właściwy.

Pomiar kalibracyjny wymaga podłączenia do zacisków miernika impedancji kalibracyjnej  $Z_{kal}$  w miejsce mierzonej impedancji  $Z_x$ . Poprzez pomiar prądu płynącego przez impedancję  $Z_{kal}$  wyznaczana jest wartość napięcia wyjściowego  $U_{wy}$ . W tym etapie napięcie próbkowane przez przetwornik ADC i poddawane transformacji DFT wyrażone jest zależnością [2]:

$$U_{kal} = -\frac{R_b}{Z_{kal}} U_{wy} H(f), \quad (1)$$

gdzie:  $H(f)$  – transmitancja filtra dolnoprzepustowego.

W trakcie pomiaru właściwego, przy założeniu, że amplituda napięcia  $U_{wy}$  nie uległa zmianie, realizowany jest pomiar prądu  $i_x$  płynącego przez mierzoną impedancję  $Z_x$ . Napięcie przetwarzane przez blok obliczeniowy ma postać:

$$U_{wt} = -\frac{R_{fb}}{Z_x} U_{wy} H(f). \quad (2)$$

Przez wyznaczenie z równania (1)  $U_{wy}$  i podstawienie do (2) otrzymuje się zależność opisującą moduł mierzonej impedancji:

$$Z_x = Z_{kal} \frac{U_{kal}}{U_{wt}}. \quad (3)$$

W celu minimalizacji przesunięcia fazowego w torze pomiarowym impedancja  $Z_{kal}$  powinna mieć charakter rezystywny. Pomiar kalibracyjny musi być powtarzany przy każdej zmianie amplitudy i częstotliwości napięcia  $U_{wy}$ , wartości rezystora  $R_{fb}$  oraz wzmocnienia wzmacniacza A3.

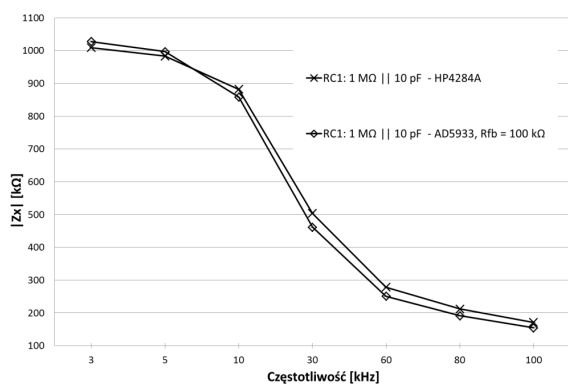
Przy  $Z_x \approx Z_{kal} \approx R_{fb}$  otrzymywane wyniki pomiaru impedancji są najdokładniejsze, ponieważ wzmocnienie toru pomiarowego jest wtedy zbliżone do jedności. Wybór wartości rezystora  $R_{fb}$  definiuje zakres pomiarowy, dla którego pomiary impedancji obciążone są najmniejszym błędem. Z zależności (2) wynika, że wraz ze wzrostem modułu impedancji  $Z_x$  maleje napięcie przetwarzane przez przetwornik ADC, zaś przy  $|Z_x| < R_{fb}$  może dojść do przesterowania przetwornika.

### 3. Wyniki badań

Celem badań była ocena dokładności pomiarów modułu impedancji za pomocą układu AD5933. Za odniesienie posłużyły wyniki uzyskane miernikiem HP4284A, którego zakres wartości mierzonych jak i częstotliwości w pełni pokrywa zakresy pomiarowe przetwornika AD5933, a niedokładność pomiaru modułu impedancji nie przekracza 0,15%.

Wykonano pomiary modułów impedancji dwójników równoległych RC ze względu na ich podobieństwo do charakterystyk impedancyjnych czujników pojemnościowych. Dobrano wartości rezystancji i pojemności w taki sposób, by wraz ze zmianą częstotliwości moduły wypadkowej impedancji przyjmowały wartości z szerokiego zakresu.

Przed pomiarami właściwymi dokonywano kalibracji przetwornika AD5933 dla całego pasma częstotliwości, zawsze przy  $Z_{kal} = R_{fb}$ . Z zależności (1) wynika, że tak dobrana impedancja kalibracyjna powinna zapewniać możliwie najdokładniejsze odzwierciedlenie charakterystyki przetwarzania toru pomiarowego.



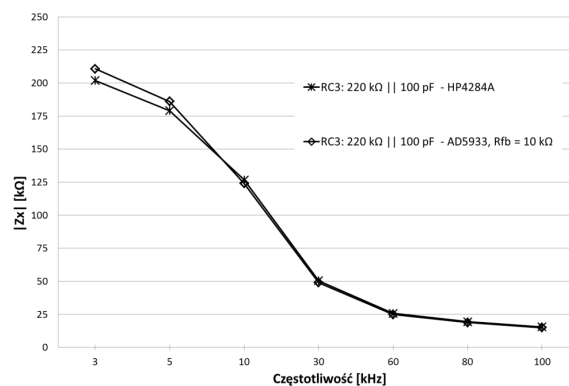
Rys. 2. Wyniki pomiarów modułu impedancji dwójników RC za pomocą miernika HP4284A oraz układu AD5933: RC1 (1 MΩ || 10 pF) przy  $R_{fb}=100$  kΩ

Fig. 2. Results of impedance modulus measurement of parallel RC circuits: RC1 (1 MΩ || 10 pF) with  $R_{fb}=100$  kΩ by HP4284A and AD5933

Na rys. 2, 3 oraz 4 przedstawiono wyniki pomiarów modułu impedancji za pomocą miernika HP4284A oraz przetwornika AD5933 dla trzech wybranych dwójników RC.

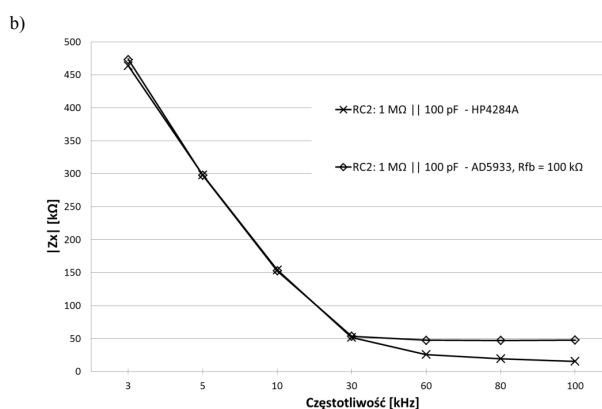
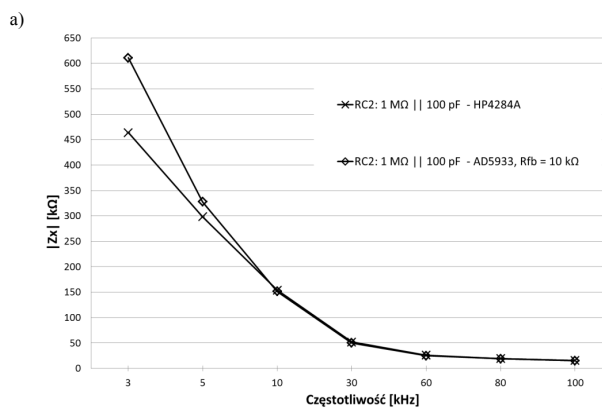
Moduł impedancji dwójnika RC1 (1 MΩ || 10 pF) został zmierzony za pomocą układu AD5933 przy  $R_{fb}=100$  kΩ (rys. 2). Błąd względny pomiaru został przedstawiony na rys. 5. Dla całego pasma nie przekracza on  $\pm 10\%$ , przy czym jest mniejszy dla częstotliwości poniżej 30 kHz, mimo, że wartość  $|Z_{RC1}|$  jest wtedy bardziej oddalona od  $R_{fb}$ , w porównaniu do  $|Z_{RC1}|$  dla wyższych częstotliwości.

Rys. 3 przedstawia wynik pomiaru modułu impedancji dwójnika RC3 (220 kΩ || 10 pF). Mimo, że  $|Z_{RC3}| > 20R_{fb}$  przy częstotliwości 3 kHz, błąd pomiaru nie przekracza 4,5% (rys. 5).



Rys. 3. Wyniki pomiarów modułu impedancji dwójników RC za pomocą miernika HP4284A oraz układu AD5933: RC3 (220 kΩ || 10 pF) przy  $R_{fb}=10$  kΩ

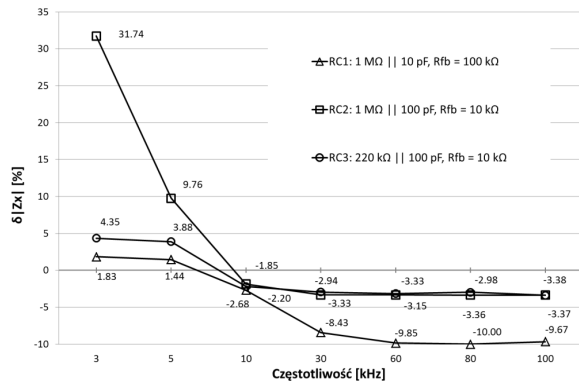
Fig. 3. Results of impedance modulus measurement of parallel RC circuits: RC3 (220 kΩ || 10 pF) with  $R_{fb}=10$  kΩ by HP4284A and AD5933



Rys. 4. Wyniki pomiarów modułu impedancji dwójników RC za pomocą miernika HP4284A oraz układu AD5933: a) RC2 (1 MΩ || 100 pF) przy  $R_{fb}=10$  kΩ, b) RC2 (1 MΩ || 100 pF) przy  $R_{fb}=100$  kΩ

Fig. 4. Results of impedance modulus measurement of parallel RC circuits: a) RC2 (1 MΩ || 100 pF) with  $R_{fb}=10$  kΩ, b) RC2 (1 MΩ || 100 pF) with  $R_{fb}=100$  kΩ by HP4284A and AD5933

Na rys. 4 zamieszczono wyniki pomiaru modułu impedancji tego samego dwójnika RC2 ( $1\text{ M}\Omega \parallel 100\text{ pF}$ ) przy użyciu różnych rezystorów w pętli sprzężenia zwrotnego (rys. 4a –  $R_{fb}=10\text{ k}\Omega$ , rys. 4b –  $R_{fb}=100\text{ k}\Omega$ ). Zilustrowane są tu wcześniej wspomniane ograniczenia dotyczące relacji wartości  $|Z_x|$  z  $R_{fb}$ .



Rys. 5. Błąd względny pomiaru modułu impedancji dwójników RC za pomocą przetwornika impedancji AD5933

Fig. 5. The relative error of impedance modulus measurement of parallel RC circuits by the AD5933 impedance converter

Błędy towarzyszące pomiarowi dwójnika RC2 ( $1\text{ M}\Omega \parallel 100\text{ pF}$ , rys. 4a) przy  $R_{fb}=10\text{ k}\Omega$  są duże, ponieważ moduł mierzonej impedancji  $|Z_{RC2}|$  przy niższych częstotliwościach jest już znacznie większy ( $463,7\text{ k}\Omega$  zmierzone przy  $3\text{ kHz}$  przez miernik HP4284A) od wartości rezystora  $R_{fb}$ . Wynika z tego, że przetwornik ADC w układzie AD5933 pracował z ponad 46-krotnie mniejszą amplitudą sygnału pomiarowego. Skutkuje to błędem pomiaru sięgającym niemal 32%. Zupełnie inna sytuacja miała miejsce przy użyciu  $R_{fb}=100\text{ k}\Omega$  (rys. 4b). Przy częstotliwościach wyższego rzędu, dla których wartość  $|Z_{RC2}|$  spadała poniżej wartości użytego rezystora w pętli sprzężenia zwrotnego, następowało przesterowanie przetwornika ADC, a w konsekwencji brak możliwości obliczenia przez układ AD5933 wartości modułu mierzonej impedancji. Z zależności (2) wynika, że w najgorszym przypadku, czyli przy zadanej największej możliwej amplitudzie sygnału pomiarowego  $U_{wy} \approx 2 V_{p-p}$ , możliwy jest pomiar modułu impedancji  $|Z_x| < 0,6R_{fb}$ , ponieważ przetwornik ADC pracuje z napięciem referencyjnym  $V_{ref}=3,3\text{ V}$ . Stąd, mimo wciąż zmniejszającego się modułu impedancji wraz ze wzrostem częstotliwości, przetwornik AD5933 zwracał stałą wartość  $|Z_x|$  (rys. 4b).

Na rys. 5 przedstawiono względne błędy pomiaru modułu impedancji wybranych dwójników równoległych RC za pomocą przetwornika AD5933. Można zaobserwować, iż niezależnie od przedziału mierzonych wartości największa dokładność pomiaru możliwa jest do uzyskania przy częstotliwościach 10...30 kHz. W nocie katalogowej producent podaje dokładność pomiaru sięgającą 0,5% właśnie przy 30 kHz ( $Z_x=200\text{ k}\Omega$ ) [1].

Mimo deklarowanej przez Analog Devices możliwości pomiaru przez przetwornik AD5933 modułów impedancji już od  $1\text{ k}\Omega$ , nie udało się autorowi uzyskać zadowalających wyników pomiarów  $|Z_x| < 10\text{ k}\Omega$  bez dodatkowego wzmacniacza sygnału pomiarowego. Widoczna była niewystarczająca wydajność prądowa układu objawiająca się zanizonym o stałą wartość (15% dla mierzzonego  $Z_x=4,7\text{ k}\Omega$  przy  $R_{fb}=1\text{ k}\Omega$ ) modułem impedancji w całym paśmie częstotliwości. Pomiaru  $|Z_x| \geq 10\text{ k}\Omega$  były już pozbawione tego efektu.

Trudności w oszacowaniu pojemności pasożytniczych testowego układu pomiarowego uniemożliwiły zbadanie błędu pomiaru modułu impedancji wyższego rzędu ( $1\text{ M}\Omega < |Z_x| < 10\text{ M}\Omega$ ).

#### 4. Wnioski

Dokładność pomiaru impedancji za pomocą układu AD5933 zależy od szeregu czynników, w tym w głównej mierze od doboru przez użytkownika rezystancji  $R_{fb}$ . Należy pamiętać, że wraz ze zmianą modułu mierzonej impedancji  $Z_x$  zmienia się amplituda

napięcia przetwarzanego przez 12-bitowy przetwornik ADC. Pomiar  $|Z_x| < R_{fb}$  może być niewykonalny ze względu na możliwość przesterowania przetwornika, zaś pomiary  $|Z_x| \gg R_{fb}$  będą skutkowały powiększonym błędem wynikającym z ograniczonej rozdzielczości przetwornika ADC.

Podawaną przez producenta dokładność pomiaru rzędu 0,5% należy traktować jedynie jako dokładność samego mikrosystemu (wewnętrzne obliczenia wyniku pomiaru, jakość generowania i próbkowania sygnału, zapewnienie synchronizacji procesów). W szerokim zakresie częstotliwości i wartościach modułu impedancji zmieniających się ponad trzynastokrotnie (od  $15,5\text{ k}\Omega$  do  $201,9\text{ k}\Omega$ , przy dwójniku RC3) możliwe są pomiary z błędem nieprzekraczającym  $\pm 4,5\%$ .

W celu zwiększenia dokładności pomiaru impedancji za pomocą układu AD5933 zostały opracowane różnego typu udoskonalenia. Aby wyeliminować wpływ zmieniającej się amplitudy sygnału wyjściowego i konieczność wykonywania pomiarów kalibracyjnych, zastosowano w układzie docelowym dwa przetworniki AD5933 [2, 3]. W innym przypadku dodano układ analogowy ze wzmacniaczem w torze pomiarowym [4]. Podobną modyfikację zaleca producent układu, firma Analog Devices w nodzie aplikacyjnej [5]. Proponowane jest w niej zastosowanie dwóch wzmacniaczy operacyjnych w torze pomiarowym. Jeden zwiększa wydajność prądową źródła sygnału pomiarowego, drugi zaś zwiększa impedancję wejściową systemu.

Przed wykorzystaniem układu AD5933 do budowy urządzenia współpracującego z czujnikami impedancyjnymi należy sprawdzić akceptowalny poziom błędów pomiaru. W zależności od oczekiwań okaże się, czy konieczne jest kondycjonowanie sygnału pomiarowego poprzez na przykład użycie wzmacniacza. Przy odpowiednim doborze rezystancji w przetworniku prąd-napięcie układ AD5933 jest jak najbardziej użyteczny, ale w stosunkowo wąskich zakresach mierzonych impedancji, których rząd musi być wstępnie znany. Stąd w urządzeniu przeznaczonym do współpracy z konkretnym typem czujnika impedancyjnego przetwornik AD5933 może być z powodzeniem zastosowany.

#### 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono główne ograniczenia cyfrowego przetwornika impedancji AD5933, które należy wziąć pod uwagę budując system pomiarowy oparty o ten układ. Otrzymane wyniki badań dokładności pomiaru modułu impedancji wskazują na możliwość zastosowania przetwornika AD5933 przy założeniu, że względny błąd pomiaru w systemie pomiarowym może sięgać kilku procent. Spełnienie tak określonego wymagania jest możliwe bez opracowywania dodatkowych układów kondycjonujących sygnał pomiarowy. Wraz z zawężaniem przedziału spodziewanych mierzonych wartości modułu impedancji możliwe jest zwiększanie dokładności pomiaru przez układ.

#### 6. Literatura

- [1] AD5933 Data Sheet (Rev. D): 1 MSPS, 12-bit Impedance Converter. Analog Devices, 2011.
- [2] Hoja J., Kiwiłszo M.: Ograniczenia wirtualnego miernika RLC zrealizowanego na układzie AD5933. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 25, 2008.
- [3] Wrzusczyk M., Khoma V.: System komputerowy do badań wirowych z zastosowaniem cyfrowego przetwornika impedancji. Pomiar Automatyka Kontrola Nr 5, Vol. 57, 2011, s. 456-459.
- [4] Seoane F., Ferreira J., Sanchez J.J., Bragos R.: An analog front-end enables electrical impedance spectroscopy system on-chip for biomedical applications. Physiological Measurement Issue 6, 2008.
- [5] Circuit Note CN-0217: High Accuracy Impedance Measurements Using 12-Bit Impedance Converters. Analog Devices, 2011.