

Wirtualna cyfrowa spektroskopia impedancji

Plan wykładu

- 1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna**
- 2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej**
- 3. Metoda pomiaru składowych impedancji z wykorzystaniem cyfrowej detekcji synchronicznej**
- 4. Wirtualny spektroskop impedancji**
- 5. Wpływ liczby przetworników A/C w kanałach wejść analogowych karty pomiarowej**
- 6. Przykład**
- 7. Podsumowanie**

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

- **Spektroskopia impedancyjna** to technika umożliwiająca badanie właściwości materiałów w szerokim paśmie częstotliwości.
- Spektroskopia impedancyjna szeroko stosowana jest podczas nieniszczących badań właściwości obiektów konstrukcyjnych, biologicznych lub monitorowaniu korozji materiałów, itp.
- Metoda polega na pobudzeniu obiektu badanego sygnałem zmiennoprądowym o częstotliwości, która zmieniają w szerokim paśmie, i zwykle stałej amplitudzie oraz pomiarach i analizie odpowiedzi obiektu badanego wywołanej tym pobudzeniem.

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

- Współczesne układy bazujące na idei spektroskopii impedancyjnej realizują pomiary zarówno fizycznie, jak i wirtualnie. Przykładami analizatorów FRA (frequency response analyzer) są: układ M5200 firmy Doble Engineering czy FRA32M firmy Metrohm Autolab. Oba moduły zapewniają precyzyjne pomiary, ale charakteryzują się wysoką ceną.
- **Wirtualny pomiar impedancji** realizuje mikrosystem AD5933 firmy Analog Devices, którego korzystna cena wiąże się z pewnymi ograniczeniami dotyczącymi: pomiaru wyłącznie prądu przepływającego przez badany obiekt oraz wpływu rezystancji wyjściowej na dokładność wyników.

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

Analizator serii M5200 firmy Doble Engineering



Główne parametry pomiarowe:
liczba kanałów: 2
pobieranie próbek: jednoczesne
zakres częstotliwości: 10 Hz - 25 MHz
maksymalna częstotliwość próbkowania: 100 MS / s
impedancja wejściowa: 50 omów

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

1 mHz to 5 MHz
Impedance Analyzers

Starting at
\$10,890



Key Features

- 0.00% basic accuracy
- 1 mΩ to 1 TΩ
- Compensation Advisor
- Fast LCR measurements
- Full MFII Lock-in Amplifier functionality

Applications

- Sensors, supercapacitors, semiconductor characterization, DUTs, display technology
- Dielectrics, ceramics and composites, solar materials, thin-film characterization
- Tissue impedance analysis

Accurate, precise and fast. Excellent measurement repeatability and high temperature stability to ensure swift and reliable results.

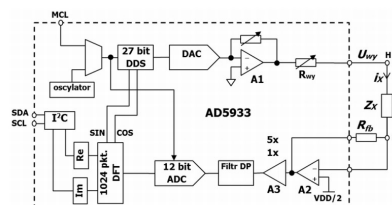
The included LabOne® software package offers a complete signal analysis toolset with oscilloscope, parametric sweeper, DAQ module, spectrum analyzer, and empowering programming interfaces for Python, C, MATLAB®, LabVIEW® and .NET.

 Zurich Instruments

Find out more today
www.zhinst.com

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

Układ AD5933



Główne cechy modułu:

programowalne wyjściowe napięcie szczytowe do
maksymalnej częstotliwości 100 kHz,
rozdzielczość częstotliwości 27 bitów (<0,1 Hz),
zakres pomiaru impedancji od 1 kΩ do 10 MΩ,
dokładność systemu 0,5%,
zasilanie 2,7 V do 5,5 V

Głównymi ograniczeniami przedstawionego układu są:
pomiar jedynie prądu przepływającego przez badaną impedancję,
wpływ rezystancji wyjściowej na dokładność pomiaru oraz
konieczność kalibracji przy każdej zmianie częstotliwości.

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

- **Powstaje pytanie:**
czy nie wystarczy jedną z metod (np. bazująca na detekcji synchronicznej, czy 2-ch częstotliwości, z przesuwem współrzędnych itp.) na pewnej czy pewnych częstotliwościach wyznaczyć składowe impedancji obiektu badanego i na tej podstawie wyznaczyć impedancje tego obiektu na dowolnej częstotliwości?

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

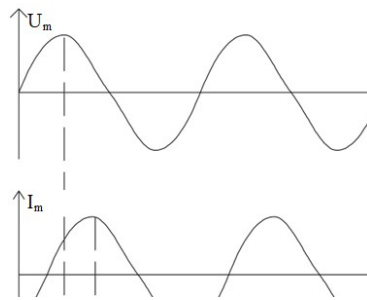
- Okazuje się że nie wystarczy, dlatego że uproszczone układy zastępcze z dwóch elementów są odpowiednie tylko do elementów elektrotechnicznych (kondensatory i cewki) i to tylko w ograniczonym zakresie częstotliwości.
- Różne materiały przy badaniach na różnych częstotliwościach charakteryzują się różnymi złożonymi układami zastępczymi i dlatego ich impedancja jest złożoną funkcją częstotliwości.
- Właśnie pomiar impedancji takich obiektów w szerokim paśmie częstotliwości pozwala na wyznaczenie ich pewnych właściwości.

1. Wstęp. Spektroskopia Impedancyjna

- Nawet w przypadku badań materiałów elektrotechnicznych, na przykład stratności blach transformatorowych, do wyznaczenia których są wykorzystywane zestawy cewek (aparatury Epszajna) stratność oraz impedancja zależy od częstotliwości sygnału wymuszającego. Ten efekt związany jest z zależnością od częstotliwości strat w blachach od prądów wirowych.
- Właściwości wielu materiałów technicznych oraz produktów spożywczych, w których występują różne składniki, przy badaniach w szerokim zakresie częstotliwości charakteryzują się zmienną przenikalnością dielektryczną lub magnetyczną. Pomiar impedancji takich materiałów zapewnia możliwość wyznaczenia zawartości odpowiednich komponentów.

2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

- Odpowiedź obiektu impedancyjnego na falę sinusoidalną o amplitudzie napięcia U_m (lub prądu I_m) o częstotliwości f jest sinusoidą prądu (lub napięcia) przemiennego o amplitudzie I_{mx} (napięcia U_{mx}) tej samej częstotliwości f , ale przesuniętą w fazie φ :



2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

- Przy wymuszeniu napięciowym o częstotliwości f impedancja obiektu badanego wyznaczana jest jako:

$$Z(f) = \frac{U_{wym}(f)}{I_{odp}}$$

gdzie

U_{wym} – wartość skuteczna napięcia wymuszającego,

I_{odp} – wartość skuteczna prądu odpowiedzi obiektu

Przy wymuszeniu prądowym impedancja obiektu badanego wyznaczana jest jako:

$$Z(f) = \frac{U_{odp}(f)}{I_{wym}}$$

gdzie

I_{wym} – wartość skuteczna prądu wymuszającego,

U_{odp} – wartość skuteczna prądu odpowiedzi obiektu.

2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

- Przy zastosowaniu **wymuszenia prądowego** utrzymanie stałej wartości prądu wymuszającego zapewnia wyznaczenie impedancji poprzez **miar wartości skutecznej napięcia odpowiedzi**.
- Jeśli utrzymanie stałej wartości prądu nie jest możliwe lub złożone, wtedy oprócz pomiaru napięcia należy też mierzyć wartość skuteczną prądu oraz kąt przesuwu fazy.
- Na ogół, jeśli zadaniem jest tylko pomiar impedancji (modułu impedancji), wtedy wystarczy mierzyć wartości skuteczne prądu i napięcia i nie ma potrzeby w pomiarze przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem

2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

- Jednak w praktyce często wymagany jest **miar obydwu składowych impedancji**.

Wiadomo jest, że impedancja obiektu badanego składa się z dwóch składowych:

$$Z(f) = \sqrt{R^2 + X^2(f)}$$

Gdzie:

R jest rezystancją obiektu, X(f) jest reaktancją obiektu.

W tym przypadku (miar oddzielnie składowej R oraz X(f)) należy **bezpośrednio lub pośrednio mierzyć przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami wymuszającym i odpowiedzi**.

2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

Przesunięcie fazowe pomiędzy odpowiedzią i wymuszeniem zależy od dwóch składowych (R , $X(f)$):

$$\varphi(f) = \operatorname{arctg}\left(\frac{X(f)}{R}\right)$$

Dlatego przy znanej wartości $Z(f)$ oraz $\varphi(f)$ można zapisać:

$$R = Z(f) \cdot \cos[\varphi(f)] \quad X(f) = Z(f) \cdot \sin[\varphi(f)]$$

Przy wyznaczonej wartości $X(f)$ mogą być wyznaczone zastępcze indukcyjność lub pojemność obiektu na częstotliwości, na które są prowadzone pomiary:

$$L = \frac{X(f)}{2\pi f} \quad C = \frac{1}{2\pi f \cdot X(f)}$$

2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

Podstawowym problemem jest pomiar przesuwu fazy pomiędzy prądem a napięciem w szerokim zakresie częstotliwości.

Najdokładniejsze pomiary składowych impedancji są wykonywane na zasadzie detekcji synchronicznej.

Ponieważ częstotliwość sygnału wymuszającego jest znana, dlatego wartości składowych impedancji otrzymują się na wyjściach dwóch detektorów synchronicznych w jednym z których zrealizowano dodatkowe przesunięcie sygnału o 90 stopni.

2. Podstawowe zależności dla spektroskopii impedancyjnej

Jednak przy realizacji spektroskopu impedancji na bazie kart pomiarowych pojawiają się pewne problemy, związane z tym, że:

- Karta pomiarowa zwykle ma wyjście napięciowe a nie prądowe;
- Dla wygładzenia schodkowego napięcia na wyjściu analogowym karty należy zastosować filtr, który wprowadza przesunięcie fazowe różne na różnych częstotliwościach.

To powoduje, że bezpośrednio zastosowanie w detekcji synchronicznej próbek sygnałów cyfrowych nie jest możliwe.

W tym celu można zastosować modyfikowaną metodę z wykonywaniem dwóch detekcji synchronicznych prądu i napięcia.

3. Metoda pomiaru składowych impedancji z wykorzystaniem cyfrowej detekcji synchronicznej

Pośredni pomiar prądu wymuszającego.

- Przy wykorzystaniu kart pomiarowych bezpośrednio są wyjścia analogowe w postaci generatorów napięć, a nie prądów. Dla pomiaru wartości prądu wymuszającego należy wykorzystać szeregowo włączony rezystor R_n , na którym mierzyć spadek napięcia U_{Rn} :

$$I_{wym} = \frac{U_{Rn}}{R_n}$$

- Wartość chwilową prądu przepływającego przez element impedancyjny dla częstotliwości f_s , można zapisać w postaci:

$$i(t) = I_m \cos(2\pi f_s t + \phi)$$

gdzie: I_m – amplituda prądu, ϕ - faza początkowa.

3. Metoda pomiaru składowych impedancji z wykorzystaniem cyfrowej detekcji synchronicznej

Pośredni pomiar prądu wymuszającego.

Podczas próbkowania sygnału odpowiedzi (częstotliwość próbkowania sygnału f_p) wartości próbek u_{0i} spadku napięcia na rezystorze R_n są równe:

$$u_{0i} = I_m R_n \cos(2\pi f_s t_i + \phi) = I_m R_n \cos\left(2\pi i \frac{f_s}{f_p} + \phi\right),$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N$; N - liczba zarejestrowanych próbek w czasie jednego okresu,

f_s – konkretna częstotliwość sygnału wymuszającego.

3. Metoda pomiaru składowych impedancji z wykorzystaniem cyfrowej detekcji synchronicznej

Pomiar napięcia odpowiedzi.

Analogicznie wartości próbek u_{1i} spadku napięcia na obiekcie badanym, na przykład o charakterze indukcyjnym (szeregowy układ zastępczy R_x , $X_L = 2\pi f_s L_x$) są równe:

$$u_{1i} = I_m \left[R_x \cos\left(2\pi i \frac{f_s}{f_p} + \phi\right) - X_x \sin\left(2\pi i \frac{f_s}{f_p} + \phi\right) \right].$$

Dla obiektu badanego o charakterze pojemnościowym przy szeregowym układzie zastępczym

$$X_C = -1/(2\pi f_s C_x).$$

3. Metoda pomiaru składowych impedancji z wykorzystaniem cyfrowej detekcji synchronicznej

Cyfrowa detekcja synchroniczna .

Wykorzystując cyfrowe wartości funkcji $\cos(2\pi i f_s / f_p)$ oraz $\sin(2\pi i f_s / f_p)$, odpowiednie wartości średnie iloczynów zarejestrowanych próbek oraz tych funkcji są równe (wyjścia czterech detektorów synchronicznych) :

$$\bar{u}_{0\cos} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{0i} \cos(2\pi i f_s / f_p) = I_m R_n \cos(\phi);$$

$$\bar{u}_{0\sin} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{0i} \sin(2\pi i f_s / f_p) = -I_m R_n \sin(\phi);$$

$$\bar{u}_{1\cos} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{1i} \cos(2\pi i f_s / f_p) = I_m (R_x \cos(\phi) - X_x \sin(\phi));$$

$$\bar{u}_{1\sin} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{1i} \sin(2\pi i f_s / f_p) = -I_m (R_x \sin(\phi) + X_x \cos(\phi));$$

3. Metoda pomiaru składowych impedancji z wykorzystaniem cyfrowej detekcji synchronicznej

Wyniki pomiarów:

Z wartości średnich napięć opisywanych tymi wzorami otrzymuje się: impedancję Z_x , reaktancję X_x , rezystancję R_x oraz indukcyjność L_x lub pojemność C_x :

$$Z_x = R_n \sqrt{\frac{\bar{u}_{1\cos}^2 + \bar{u}_{1\sin}^2}{\bar{u}_{0\cos}^2 + \bar{u}_{0\sin}^2}};$$

$$X_x = R_n \frac{\bar{u}_{1\cos} \bar{u}_{0\sin} - \bar{u}_{1\sin} \bar{u}_{0\cos}}{\bar{u}_{0\cos} + \bar{u}_{0\sin}};$$

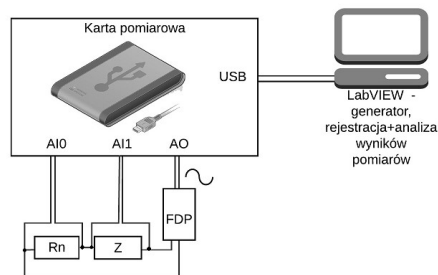
$$R_x = R_n \frac{\bar{u}_{1\cos} \bar{u}_{0\cos} + \bar{u}_{1\sin} \bar{u}_{0\sin}}{\bar{u}_{0\cos} + \bar{u}_{0\sin}};$$

$$L_x = \frac{X_x}{2\pi f_s};$$

$$C_x = \frac{-1}{2\pi f_s X_C}.$$

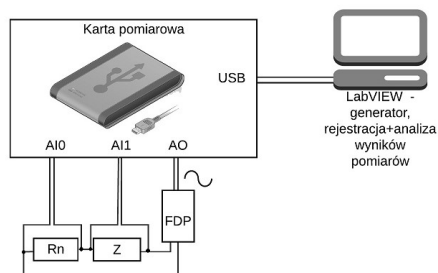
4. Wirtualny spektroskop impedancji

Wirtualny spektroskop impedancji wykorzystuje generator oraz dwukanałowy rejestrator napięć (do pośredniego pomiaru prądu wymuszającego przez spadek napięcia na rezystorze R_n i napięcia odpowiedzi obiektu) na bazie modułu akwizycji danych oraz komputer z oprogramowaniem LabVIEW



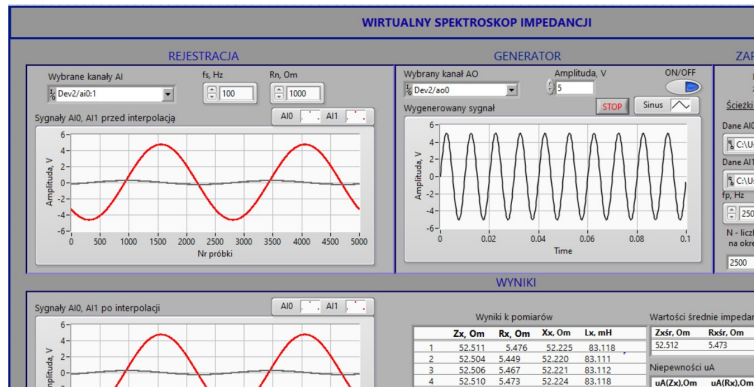
4. Wirtualny spektroskop impedancji

Moduł akwizycji danych wykorzystuje złącze USB do komunikacji z komputerem, umożliwiając generowanie sygnału na wyjściu analogowym przy przetwarzaniu cyfrowo-analogowym oraz przetwarzanie analogowo-cyfrowe sygnałów podanych na wejścia analogowe (różnicowe).



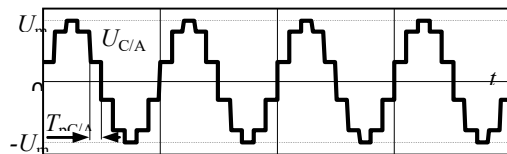
4. Wirtualny spektroskop impedancji

Opracowanie sygnałów wykonuje się w środowisku LabView, przykładowy panel czołowy aplikacji jest podany na rysunku.



4. Wirtualny spektroskop impedancji

Wymuszający badany obiekt sygnał $U_{C/A}$, który generowany jest na wyjściu przetwornika C/A, ma postać analogową o przebiegu „schodkowym” z okresem próbkowania $T_p, C/A$, gdzie U_m – amplituda napięcia.



Do wygładzenia takiego sygnału wykorzystuje się filtr dolnoprzepustowy.

4. Wirtualny spektroskop impedancji

Parametry filtra, zwłaszcza charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa $A_{FDP}(f)$, zależą od wymaganego poziomu tłumienia składowych harmoniczných oraz od wartości częstotliwości generowanego sygnału oraz częstotliwości próbkowania przy generowaniu.

Przy cyfrowym generowaniu napięcia na wyjściu analogowym modułu dla dobrego następnego (przez filtr dolnoprzepustowy) wygładzenia sygnału częstotliwość próbkowania ma być rzędu 50-100 razy większą od częstotliwości sygnału wymuszającego. Tzn., że cyfrowe generowanie ma zapewnić 50-100 próbek na okres sygnału.

5. Wpływ liczby przetworników A/C w kanałach wejść analogowych karty pomiarowej

Według przedstawionej metody karta pomiarowa powinna zapewnić rejestrację dwóch sygnałów: napięcia z obiektu oraz z rezystora wzorcowego (do pośredniego pomiaru prądu).

Są karty pomiarowe DAQ, które są wyposażone w oddzielny przetwornik A/C w każdym kanale wejść analogowych. W tym przypadku mówi się że karta zapewnia równoległe próbkowanie sygnałów w kilku kanałach.

Wykorzystanie takiej karty pod względem realizacji podanej metody spektroskopii impedancyjnej jest najkorzystniejszym. Jednak karty z równoległym próbkowaniem są stosunkowo drogie.

5. Wpływ liczby przetworników A/C w kanałach wejść analogowych karty pomiarowej

Najczęściej stosunkowo tanie karty pomiarowe DAQ zawierają tylko jeden przetwornik A/C, a odpowiednia liczba wejść analogowych zapewniana jest poprzez multiplexer wejściowy.

Jeśli wykorzystywana jest karta pomiarowa z jednym przetwornikiem A/C, wtedy sygnały na rezystorze R_n i obiekcie badanym są próbkowane na przemian, stąd częstotliwość próbkowania $f_{pA/C}$ przetwornika A/C musi być 2 razy większa od potrzebnej częstotliwości próbkowania f_p sygnałów: $f_{pA/C} = 2f_p$.

5. Wpływ liczby przetworników A/C w kanałach wejść analogowych karty pomiarowej

Ponieważ próbkowanie w obu kanałach sygnały są przesunięte w czasie o jeden okres $T_{pA/C}$ próbkowania przetwornika A/C, powstaje dodatkowe przesunięcie fazy pomiędzy obydwoma rejestrowanymi sygnałami, które wynosi:

$$\Delta\phi_p = 2\pi f_s T_{pA/C} = 2\pi \frac{f_s}{f_{pA/C}}.$$

Jeżeli w każdym kanale rejestruje się N próbek, tj.

f_p/f_s , przesunięcie fazy pomiędzy sygnałami wynosi: $\Delta\phi_p = \pi/N$

Przesunięcie fazowe może mieć istotny wpływ na dokładność wyznaczania składowych impedancji według podanych wyżej wzorów, a zwłaszcza reaktancji. Wartości względnego błędu przesunięcia fazowego wyznaczania indukcyjności oraz pojemności wynoszą:

$$\delta_L(\Delta\phi_p) = \frac{\Delta L(\Delta\phi_p)}{L_x} \approx \frac{R_x}{X_L} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right); \quad \delta_C(\Delta\phi_p) = \frac{\Delta C(\Delta\phi_p)}{C_x} \approx \frac{\frac{R_x}{X_c} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}{1 + \frac{R_x}{X_c} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}.$$

5. Wpływ liczby przetworników A/C w kanałach wejść analogowych karty pomiarowej

- Zgodnie z tymi wzorami wartości błędów zależą od stosunku rezystancji i reaktancji obiektu. Jeśli rezystancja jest bliska reaktancji, wartości błędów mogą osiągnąć duże wartości, zwłaszcza dla małej liczby próbek.

Mianowicie, przy $N = 25$ i $X_L = R_x$ wartość $\delta L(\Delta\phi_p) \approx 12,5\%$ oraz $\delta L(\Delta\phi_p) \approx 3\%$ przy liczebności $N = 100$, co jest relatywnie dużą wartością.

- Korekcja wpływu przesunięcia fazowego**

Korekcja tego przesunięcia fazowego na wartość wyników wyznaczania parametrów impedancji może zostać istotnie zmniejszony poprzez liniową interpolację dwóch sąsiednich próbek jednego z sygnałów, np. sygnału reprezentującego spadek napięcia na R_n :

$$u_{0i}' = \frac{u_{0i} + u_{0(i+1)}}{2} \approx u_0 (i2T_{pA/C} + T_{pA/C})$$

5. Wpływ liczby przetworników A/C w kanałach wejść analogowych karty pomiarowej

- Korekcja wpływu przesunięcia fazowego**

Dla przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości f_s względny (w stosunku do wartości szczytowej sygnału) maksymalny błąd wynosi:

$$\delta u_{\max} = \frac{\pi^2}{4N^2}$$

Maksymalny błąd wynosi: $\approx 0,8\%$ przy $N = 25$, $\approx 0,2\%$ przy $N = 50$ oraz $\approx 0,05\%$ przy $N = 100$ i zmniejsza się czterokrotnie przy dwukrotnym zwiększaniu liczby próbek w jednym okresie sygnału.

Przy maksymalnej częstotliwości próbkowania $f_{pA/C}$ przetwornika A/C oraz rejestracji N próbek, maksymalna częstotliwość sygnału wynosi:

$$f_{s\max} \leq \frac{f_{pA/C}}{2N}$$

6. Przykłady

Wirtualny spektroskop impedancji został zbudowany na karcie **USB-6003**. Karta USB-6003 zapewnia maksymalną częstotliwość próbkowania w kanale wyjścia analogowego (przetwornik C/A) $f_{pC/A} = 5 \text{ kHz}$ oraz częstotliwość próbkowania jednego przetwornika A/C $f_{pA/C} = 100 \text{ kS/s}$ w kanałach wejść analogowych.

Wyznaczyć zakres częstotliwości wirtualnego spektroskopu impedancji, przyjmując, że przy generowaniu i rejestracji liczba próbek sygnału na okres $N=50$.

Rozwiązanie:

- 1) Zakres częstotliwości generowania sygnału wymuszającego

$$f_s(C/A) = \frac{f_{pC/A}}{50} = \frac{5 \text{ kHz}}{50} = 100 \text{ Hz}$$

- 2) Zakres częstotliwości sygnału przy rejestracji:

$$f_s(A/C) = \frac{f_{pA/C}}{2 \cdot N} = \frac{100 \text{ kHz}}{2 \cdot 50} = 1 \text{ kHz}$$

- 3) Otóż zakres częstotliwości zbudowanego na karcie USB-6003 spektroskopu impedancji równa się **100 Hz** (wartość mniejsza z tych dwóch częstotliwości).

6. Przykłady

Inna wersja wirtualnego spektroskopu impedancji została zbudowana na karcie **Personal DAQ/3000**. Karta Personal DAQ/3000 zapewnia maksymalną częstotliwość próbkowania w kanale wyjścia analogowego $f_{pC/A} = 1 \text{ MHz}$ oraz taką samą częstotliwość próbkowania jednego przetwornika A/C $f_{pA/C} = 1 \text{ MS/s}$ w kanałach wejść analogowych.

Wyznaczyć zakres częstotliwości wirtualnego spektroskopu impedancji, przyjmując, że przy generowaniu i rejestracji liczba próbek sygnału na okres $N=50$.

Rozwiązanie:

- 1) Zakres częstotliwości generowania sygnału wymuszającego

$$f_s(C/A) = \frac{f_{pC/A}}{50} = \frac{1 \text{ MHz}}{50} = 20 \text{ kHz}$$

- 2) Zakres częstotliwości sygnału przy rejestracji:

$$f_s(A/C) = \frac{f_{pA/C}}{2 \cdot N} = \frac{1 \text{ MHz}}{2 \cdot 50} = 10 \text{ kHz}$$

- 3) Otóż przy rejestracji 50 próbek na okres każdego z dwóch sygnałów zakres częstotliwości zbudowanego na karcie **Personal DAQ/3000** spektroskopu impedancji równa się **10 kHz** (wartość mniejsza z tych dwóch częstotliwości).

7. Podsumowanie

- Przy cyfrowym generowaniu napięcia na wyjściu analogowym modułu dla dobrego następnego wygładzenia sygnału częstotliwość próbkowania ma być rzędu 50-100 razy większą od częstotliwości sygnału wymuszającego. Tzn., że częstotliwość próbkowania w przetworniku C/A :

$$f_{p,C/A} = (50 \div 100) f_s$$

- Przy częstotliwości sygnału f_s i rejestracji N próbek częstotliwość próbkowania $f_{p,A/C}$ przetwornika A/C wynosi:

$$f_{p,A/C} = 2 f_s \cdot N$$

- Rozszerzenie zakresu częstotliwości (2-4 razy) możliwe jest przy zmniejszeniu liczby próbek do około 20-25 na okres, jednak w tym przypadku wymagania do filtru wygładzającego istotnie większe.
- Zastosowanie karty z równoległym próbkowaniem dwóch sygnałów powiększa zakres częstotliwości 2 razy.