

**Jerzy HOJA, Grzegorz LENTKA**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, KATEDRA OPTOELEKTRONIKI I SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH

## Analizator do spektroskopii wysokoimpedancyjnej z wykorzystaniem CPS

Dr inż. Jerzy HOJA

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej w 1970 r. uzyskując dyplom magistra inżyniera o specjalności aparatura elektroniczna. W tym samym roku podjął pracę w Katedrze Miernictwa PG. W 1979 obronił pracę doktorską. Zajmuje się pomiarami impedancji i projektowaniem systemów pomiarowo-diagnostycznych układów elektronicznych oraz obiektów modelowanych obwodami elektrycznymi. Autor i współautor ponad 90 publikacji oraz 10 patentów.

e-mail: [hoja@eti.pg.gda.pl](mailto:hoja@eti.pg.gda.pl)



Dr inż. Grzegorz LENTKA

Ukończył studia na Wydziale ETI Politechniki Gdańskiej w 1996 r. uzyskując dyplom magistra inżyniera o specjalności aparatura elektroniczna. W tym samym roku podjął pracę w Katedrze Miernictwa Elektronicznego PG. W 2003 obronił pracę doktorską. Zajmuje się projektowaniem systemów pomiarowo-diagnostycznych układów elektronicznych i obiektów technicznych oraz wykorzystaniem DSP w pomiarach impedancji. Autor i współautor ponad 30 publikacji.

e-mail: [hoja@eti.pg.gda.pl](mailto:hoja@eti.pg.gda.pl)



### Streszczenie

W artykule przedstawiono opracowany i wdrożony do produkcji seryjnej analizator do spektroskopii wysokoimpedancyjnej. Dzięki zastosowaniu obwodu wejściowego w postaci sondy pomiarowej (2 i 3 zaciskowej) analizator umożliwia pomiary w zakresie  $100 \Omega < |Z_x| < 100 \text{ G}\Omega$ . Do wyznaczania składowych ortogonalnych sygnałów pomiarowych wykorzystano technikę cyfrowego przetwarzania sygnałów. Pozwoliła ona na pomiary w szerokim zakresie częstotliwości od bardzo niskich 100  $\mu\text{Hz}$  do 1 MHz. Analiza rzeczywistych parametrów sond, umożliwiła wyznaczenie zależności korygujących wyniki pomiaru, które zaimplementowane w oprogramowaniu analizatora, zwiększyły dokładność pomiaru impedancji.

**Słowa kluczowe:** pomiar impedancji, spektroskopia impedancyjna, cyfrowe przetwarzanie sygnałów.

### High impedance spectroscopy analyzer using DSP

#### Abstract

The paper presents the developed high impedance spectroscopy analyzer which was putted into production. The analyzer allows to measure in the range of  $100 \Omega < |Z_x| < 100 \text{ G}\Omega$  thanks to the usage of the input circuitry in form of the measurement probe (2 and 3 terminal). The digital signal processing technique was used to determine orthogonal parts of the measurement signals. This allows measuring in a wide frequency range from very low 100  $\mu\text{Hz}$  up to 1 MHz. The analysis of the real-life parameters of the probes made possible evaluation of correction formulas which were implemented in analyzer software and increased accuracy of the impedance measurement.

**Keywords:** impedance measurement, impedance spectroscopy, digital signal processing.

### 1. Wprowadzenie

Spektroskopia impedancyjna należy do podstawowych metod badawczych obiektów technicznych modelowanych obwodami elektrycznymi. Jest wykorzystywana w tak różnych dziedzinach jak elektrochemia [1], inżynieria materiałowa [2], geologia [3], budownictwo [4], czy medycyna i biologia [5]. Procedura pomiarowa spektroskopii składa się z fazy pomiarowej, polegającej na zmierzeniu impedancji  $Z_m$  obiektu w funkcji częstotliwości sygnału pomiarowego, a następnie fazy analitycznej, polegającej na identyfikacji parametrów elementów RC schematu zastępczego obiektu na podstawie widma impedancji  $Z_m(f)$ .

Postęp technologiczny powoduje, że obserwuje się stały wzrost potrzeby pomiaru obiektów osiągających bardzo wysokie impedancje ( $|Z_m| > 100 \text{ M}\Omega$ ) (np. powłoki antykorozyjne, materiały dielektryczne). Pomiary impedancji tych obiektów, jeżeli mają doprowadzić do identyfikacji elementów ich schematów zastępczych, wymagają pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości,

od bardzo niskich rzędu 100  $\mu\text{Hz}$  do 1 MHz. Dodatkowo, istnieje zapotrzebowanie na przenośną aparaturę do spektroskopii, umożliwiającą pomiary nie tylko w laboratoriach, ale także na obiektach w terenie. Dlatego, biorąc pod uwagę w/w wymagania, autorzy opracowali i wdrożyli do produkcji seryjnej analizator do spektroskopii wysokoimpedancyjnej.

W artykule zostaną przedstawione rozwiązania układowe i programowe nie spotykane w konwencjonalnej aparaturze do pomiarów parametrów impedancyjnych, a w szczególności: nowe rozwiązanie obwodu wejściowego, wykorzystanie techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów (CPS) do wyznaczania składowych ortogonalnych sygnałów pomiarowych oraz zastosowanie programowej korekty wyniku pomiaru modułu i argumentu mierzonej impedancji. Na zakończenie będą porównane błędy pomiaru impedancji uzyskane za pomocą zrealizowanego analizatora oraz laboratoryjnego zestawu pomiarowego firmy Solartron.

### 2. Architektura i zasada działania analizatora

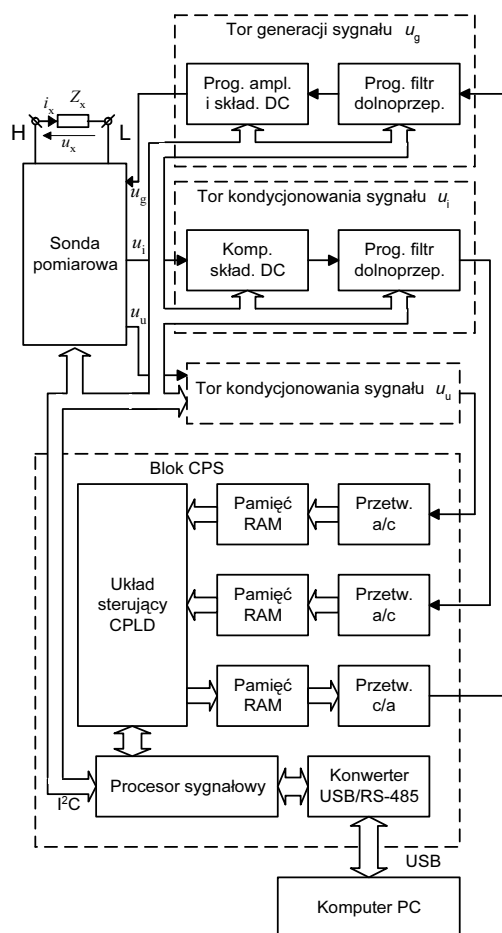
Spełnienie wymagania pomiaru bardzo dużych impedancji w szerokim zakresie częstotliwości wymusiło na autorach wprowadzenie nowych rozwiązań w opracowanym analizatorze impedancji. Dotyczy to zwłaszcza obwodu wejściowego, techniki detekcji fazoczułej i korekcji wyników pomiaru:

- Potrzeba pomiaru bardzo dużych impedancji, spowodowała konieczność przeniesienia obwodu wejściowego z jednostki centralnej analizatora do zewnętrznej sondy pomiarowej. Umożliwia ona bliskie połączenie obiektu mierzonego z obwodem wejściowym, eliminując do minimum oddziaływanie pojemności pasożytniczych na impedancję  $Z_m$ .
- Wymaganie pomiaru impedancji od bardzo niskich częstotliwości pomiarowych (100  $\mu\text{Hz}$ ), wykluczyło wykorzystanie klasycznych detektorów fazoczułych i wymusiło opracowanie metody bazującej na dyskretnej transformacji Fouriera do wyznaczania składowych ortogonalnych ( $\text{Re}(\cdot)$  i  $\text{Im}(\cdot)$ ) sygnałów pomiarowych, na podstawie zebranych ciągów próbek każdego sygnału.
- Analiza rzeczywistych parametrów obwodu wejściowego i torów pomiarowych, pozwoliła na wyznaczenie zależności korygujących wyniki pomiaru, które zaimplementowane w oprogramowaniu zrealizowanego analizatora, zwiększyły dokładność i maksymalną częstotliwość pomiaru impedancji.

Schemat blokowy analizatora, zrealizowanego według przedstawionej koncepcji, jest pokazany na rys. 1.

Obiekt mierzony dołączony do sondy pomiarowej, która jest zasilana sygnałem  $u_g$ . Służy ona do wydzielania dwóch sygnałów proporcjonalnych do prądu  $i_x \sim i_x$  i napięcia  $u_u \sim u_x$  na impedancji mierzonej  $Z_x$  (pozwalają one na wyznaczenie impedancji na podstawie definicji). W analizatorze można wyróżnić tor generacji sygnału  $u_g$  oraz dwa jednakowe tory kondycjonowania sygnałów wydzielonych w sondzie. Wymienione tory współpracują

z blokiem CPS. W torze generacji wytwarzany jest za pomocą przetwornika c/a przebieg sinusoidalny  $u_g$ , metodą bezpośredniej cyfrowej syntezy częstotliwości (DDS). W bloku CPS są także próbkowane i kwantowane przez przetworniki a/c sygnały pomiarowe  $u_i$  i  $u_u$ .



Rys. 1. Schemat blokowy analizatora do spektroskopii высокоимпедансной  
Fig. 1. Block diagram of high impedance spectroscopy analyzer

Na podstawie dwóch ciągów próbek napięć  $u_i$  i  $u_u$  zebranych w pamięciach RAM:

$$\begin{aligned} u_i[n] &= u_i(n \cdot T_s), \\ u_u[n] &= u_u(n \cdot T_s), \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , ( $N=65536$  – liczba zebranych próbek),  
 $T_s = 1/f_s$ ,  $f_s$  – częstotliwość próbkowania (6,5536 MHz, 655,36 kHz, 65,536 kHz...),

wyznaczana jest w procesorze sygnałowym z definicji transformacja DFT. Wynikiem obliczeń jest dyskretna reprezentacja spróbowanych sygnałów w dziedzinie częstotliwości. Są to odpowiednio ciągi  $U_i$  i  $U_u$ , dla których  $k$ -te prążki widm można opisać wzorami:

$$\begin{aligned} U_i[k] &= U_i(k \cdot \Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} u_i[n] \cdot e^{-jk \frac{2\pi}{N} n} \\ U_u[k] &= U_u(k \cdot \Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} u_u[n] \cdot e^{-jk \frac{2\pi}{N} n} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $k = 0, 1, \dots, N-1$ ,  
 $\Delta f = f_s/N$  – rozdzielczość częstotliwościowa widma.

Dla uzyskania prostego algorytmu wyznaczania transformacji DFT i nie dopuszczenia do wystąpienia przecieku widma, zastosowano układ programowalny CPLD zapewniający synchroniczną generację sygnału  $u_g$  (strobowanie przetwornika c/a) i próbkowanie sygnałów pomiarowych przez przetworniki a/c. W ten sposób spełniony jest warunek akwizycji próbek w całkowitej liczbie okresów sygnału mierzonego wyrażony równaniem:

$$N \cdot T_s = l \cdot T, \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – okres sygnału mierzonego,  
 $l$  – liczba całkowita (1-10000),

co oznacza, że dla sygnałów sinusoidalnych  $u_i$  i  $u_u$  ich widma częstotliwościowe mają postać pojedynczego ( $l$ -tego) prążka.

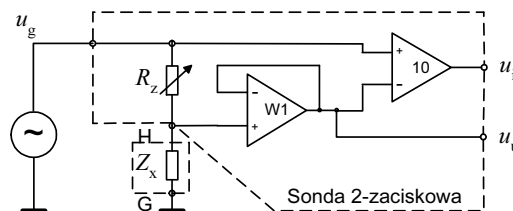
Po zakończeniu każdego cyklu pomiarowego procesor sygnałowy wyznacza również moduł i argument impedancji mierzonej na podstawie następujących zależności:

$$|Z_x| = 10 R_z \frac{|U_u[l]|}{|U_i[l]|}, \quad \varphi_{Z_x} = \arg\left(\frac{U_u[l]}{U_i[l]}\right), \quad (4)$$

gdzie:  $R_z$  – wzorcowy rezystor zakresowy w sondzie, realizujący przetwarzanie prądu  $i_x$  na napięcie  $u_i$ .

### 3. Sondy pomiarowe

Analiza obwodu wejściowego typowego miernika impedancji, przedstawiona w pracy [6], wykluczyła możliwość połączenia za pomocą długich przewodów ekranowanych impedancji obiektu mierzonego z wejściem analizatora высокоимпедансной dla  $|Z_x| > 100 \text{ M}\Omega$ . Dlatego autorzy zdecydowali się na zastosowanie sondy pomiarowej, która pozwala na bliskie połączenie obiektu mierzonego z obwodem wejściowym analizatora. Opracowano dwa rodzaje sond: 2-zaciskową przeznaczoną dla obiektów uziemionych oraz 3-zaciskową dla obiektów nieziemionych.



Rys. 2. Uproszczony schemat ideowy sondy przeznaczonej do pomiaru impedancji uziemionej

Fig. 2. Simplified diagram of the probe for the measurement of a grounded impedance

Rys. 2 przedstawia schemat sondy 2-zaciskowej, przeznaczonej do pomiaru impedancji obiektów uziemionych w terenie (na przykład powłok antykorozyjnych na mostach, rurociągach, itp.). Umożliwia ona wydzielenie dwóch sygnałów  $u_i$  i  $u_u$  proporcjonalnych do prądu i napięcia na impedancji  $Z_x$ . Połączony szeregowo z  $Z_x$  rezystor zakresowy  $R_z$  służy do pomiaru prądu  $i_x$  płynącego przez  $Z_x$ . Dla zapewnienia szerokiego zakresu mierzonych impedancji  $Z_x$  (zmiana zakresu pomiaru prądu  $i_x$  od 10 pA do 1 mA) zastosowano dekadowo przełączane za pomocą miniaturowanych kontaktronów rezystory  $R_z$  (100  $\Omega$  ... 100 M $\Omega$ , 1 G $\Omega$ ). Wartości rezystancji zakresowej  $R_z$  są dobrane w stosunku do  $|Z_x|$  mierzonego obiektu według kryterium:  $0,01|Z_x| < R_z \leq 0,1|Z_x|$ . Spełnienie warunku oznacza, że rezystancja  $R_z$  jest przynajmniej o rząd mniejsza od  $|Z_x|$  i powoduje przynajmniej dziesięciokrotne zmniejszenie impedancji widzianej z zacisku H w stosunku do masy. Jest to korzystne rozwiązanie ze względu na zmniejszenie zakłóceń powstających na impedancji  $Z_x$ , ale powoduje po-

trzebę dodatkowego, 10-krotnego, wzmocnienia sygnału z rezystora  $R_z$ . W ten sposób amplituda sygnału  $u_i$  jest współmierna z sygnałem  $u_u$ , pobieranym bezpośrednio za pomocą wtórnika  $W_1$  z impedancji  $Z_x$ .

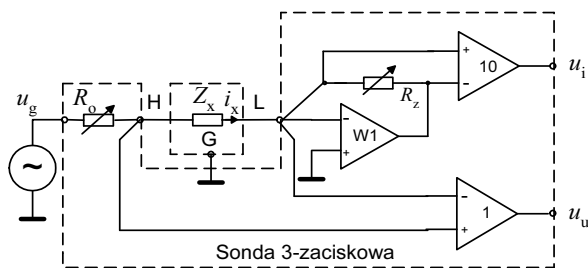
Wykorzystanie zależności (4) do wyznaczenia parametrów impedancji mierzonej jest poprawne pod warunkiem, że sygnały  $u_i$  i  $u_u$  wydzielone w sondzie pomiarowej, a następnie przetworzone na wartość cyfrową w jednostce centralnej analizatora, są zależne tylko od prądu  $i_x$  i napięcia  $u_x$  na  $Z_x$ . Z przeprowadzonej analizy sondy wynika [7], że na sygnały  $u_i$  i  $u_u$  wpływają także niepożądane czynniki (m. in. pojemności montażowe, rzeczywiste parametry wzmacniaczy operacyjnych) powodując błędy pomiaru impedancji. Dlatego istnieje konieczność uwzględnienia poprawek korygujących wydzielone sygnały w sondzie. Uwzględniając wpływ wszystkich istotnych źródeł błędów w sondzie 2-zaciskowej, wyprowadzono wzór wyznaczający mierzoną impedancję  $Z_m^{2z}$ :

$$Z_m^{2z} = 10 Z_z \left\{ 1 + \frac{11}{A_u} + \frac{U_u [I]}{U_i [I]} \right\}^{-1} \quad (5)$$

gdzie:  $Z_z$ - impedancja przedstawia równoległe połączenie rezystora zakresowego  $R_z$  oraz pojemności  $C_z$  pochodzącej od przekaźników kontaktronowych realizujących zmianę zakresu pomiarowego i pojemności montażowych,  $A_u$ - jest jednobiegunową funkcją przenoszenia wzmacniacza o wzmocnieniu 10,

$$Y = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_c} + j\omega(C_p + C_d + C_c) - \text{parametry różni-$$

cowej i wspólnej impedancji wejściowej ( $Z_d$ ,  $Z_c$ ) wtórnika  $W_1$  oraz  $C_p$  – sumaryczna pojemność przewodu łączącego impedancję  $Z_x$  z sondą oraz pojemności montażowe wewnątrz sondy,  $R_p$  – rezystancja upływności zacisku H do masy (m. in. upływność laminatu płytki drukowanej).



Rys. 3. Uproszczony schemat ideowy sondy przeznaczonej do pomiaru impedancji nieuziemionej

Fig. 3. Simplified diagram of the probe for the measurement of a non-grounded impedance

Rys. 3 przedstawia opracowaną sondę-3 zaciskową (H, L, G) przeznaczoną do pomiaru impedancji obiektów nieuziemiionych. Jest ona zrealizowana na bazie przetwornika prąd-napięcie (wzmacniacz  $W_1$ ), który umożliwia wydzielenie sygnału  $u_i$  proporcjonalnego do  $i_x$ . Zastosowanie przetwornika prąd-napięcie oraz zacisku masy G pozwala na eliminację wpływu pojemności pasożytniczej pomiędzy przewodem łączącym zacisk L, a masą ekranującą obiekt mierzony (ekranowanie obiektów o dużej impedancji jest konieczne w celu eliminacji zakłóceń pochodzących głównie od sieci energetycznej). Uzyskany efekt jest wynikiem wymuszenia pomiędzy zaciskami L i G napięcia bliskiego zeru przez połączenie do nich wejść wzmacniacza  $W_1$ . Dlatego między tymi zaciskami prąd nie płynie, a występująca między nimi pojemność pasożytnicza może być traktowana jako wirtualne rozwarcie. Dla zapewnienia pomijalnie małego napięcia między

wejściami „-” i „+” wzmacniacza  $W_1$ , konieczne jest utrzymanie wzmocnienia  $W_1$  w przedziale  $-0,01 < k_{W1} \leq -0,1$ . Dlatego, aby zapewnić szeroki zakres mierzonych impedancji  $Z_x$  zastosowano dekadowo przełączane rezystory zakresowe  $R_z$ . Wartości rezystancji  $R_z$  są identyczne jak w sondzie 2-zaciskowej.

Przy zmianie zakresu pomiarowego przełączana jest równocześnie rezystancja  $R_0$ . Zastosowanie rezystora  $R_0$  ( $R_0 = 0,1 R_z$ ) w przypadku zwarcia  $Z_x$  ogranicza prąd wpływający do przetwornika prąd-napięcie. Ponieważ wzmocnienie wzmacniacza  $W_1$  jest nie większe od 0,1, dlatego sygnał z przetwornika prąd-napięcie jest dodatkowo wzmacniany 10 razy i w ten sposób amplituda sygnału  $u_i$  jest współmierna z napięciem  $u_u$ , które jest pobierane bezpośrednio z impedancji mierzonej  $Z_x$ .

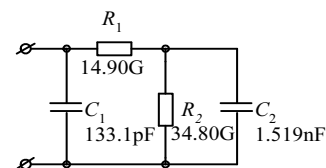
Analizę sondy przeprowadzono w dwóch etapach [8]. W pierwszym badano wpływ rzeczywistych parametrów zastosowanych wzmacniaczy natomiast w drugim etapie wpływ pojemności pasożytniczej  $C_z$  bocznikującej rezystor zakresowy. Analizę wpływu parametrów zmiennoprądowych wzmacniaczy ( $A_u$ ,  $Z_d$ ,  $Z_c$ ,  $\omega_{3dB}$ ) na błąd pomiaru impedancji, przeprowadzono dla górnego zakresu częstotliwości pomiarowych ( $>10$  kHz), kiedy ich znaczenie jest największe. Uwzględniając główne źródła błędów, pojemność  $C_z$  i parametry wzmacniacza o wzmocnieniu 10 ( $A_u$ ), wyprowadzono wzór wyznaczający mierzoną impedancję  $Z_m^{3z}$ :

$$Z_m^{3z} = \frac{10 Z_z}{1 + \frac{11}{A_u}} \frac{U_u [I]}{U_i [I]} \quad (6)$$

W rozdziale 4 zostaną przedstawione korzyści wynikające z zastosowania zależności (5) lub (6) przy wyznaczaniu modułu i argumentu impedancji testowego obiektu RC.

#### 4. Wyniki badań

W pracy [9] analizowano wpływ parametrów przetworników a/c w torach CPS na błąd pomiaru impedancji. Biorąc pod uwagę wynikające z analizy zalecenia, zastosowano w analizatorze 12-bitowe przetworniki z maksymalną częstotliwością próbkowania 10 MHz. Stąd, na błąd pomiaru impedancji decydujący wpływ mają parametry sond, które zostały przedstawione w rozdziale 3.

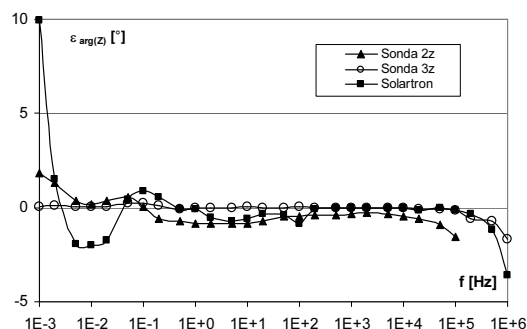
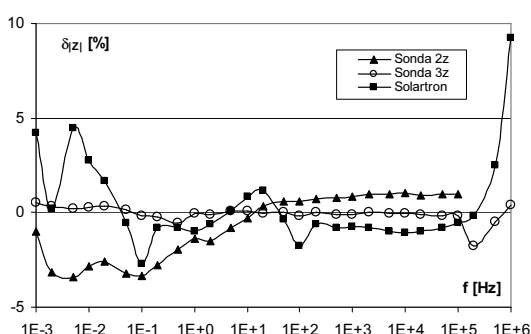


Rys. 4. Schemat elektryczny wzorcowego obiektu RC  
Fig. 4. Electrical circuit of the reference RC object

Dla pełnej oceny dokładności, przeprowadzono pomiary zrealizowanymi sondami oraz analizatorem. Obiektem dołączonym do zacisków wejściowych sond był wzorcowy dwójnik czteroelementowy RC pokazany na rys. 4. Konfiguracja dwójnika oraz wartości elementów są typowym przykładem układu zastępczego impedancji rzeczywistej powłoki antykorozyjnej w początkowym okresie eksploatacji, gdy maksymalna wartość modułu impedancji jest na poziomie 50 GΩ. Kondensatory dwójnika zmierzono analizatorem impedancji HP4192 z błędem nie przekraczającym 0,1 %, natomiast rezystory pomierzono metodą techniczną wykorzystując rezystor wzorcowy 10 MΩ ± 0,01 % i multimetr HP34401A.

Obiekt pomierzono również komercyjnym zestawem pomiarowym f-my Solatron (FRA 1255 i Impedance Interface 1294) w celu porównania dokładności obu analizatorów.

Przeprowadzono 10 serii pomiarowych impedancji dwójnika dla częstotliwości z przedziału 1 MHz ÷ 1 mHz (z krokiem 1-2-5), sygnałem o amplitudzie 1 V<sub>RMS</sub>. Wyznaczono średnie arytmetyczne z otrzymanych wyników modułu i argumentu impedancji. Dla poszczególnych punktów pomiarowych (poza częstotliwościami 500 kHz i 1 MHz) odchylenie standardowe modułu impedancji nie przekracza 0,15%, a dla argumentu jest mniejsze od 0,3°. Porównując uzyskaną charakterystykę widma impedancyjnego z pomiaru obiektu RC z charakterystyką wyznaczoną teoretycznie na podstawie wzorcowych elementów RC, trudno zauważyć różnice ze względu na szeroki zakres zmian impedancji mierzonej (modułu: 1 kΩ ÷ 47 GΩ i argumentu: 90° ÷ 15°). Aby była możliwa precyzyjna ocena dokładności obu analizatorów wyznaczono błędy względne modułu  $\delta_{|Z|}$  i bezwzględne argumentu  $\varepsilon_{\arg(Z)}$  impedancji (rys. 5). Określono je wykorzystując wyznaczone wzorcowe charakterystyki obiektu na podstawie wartości elementów RC z rys. 4 oraz zależności (5) i (6).

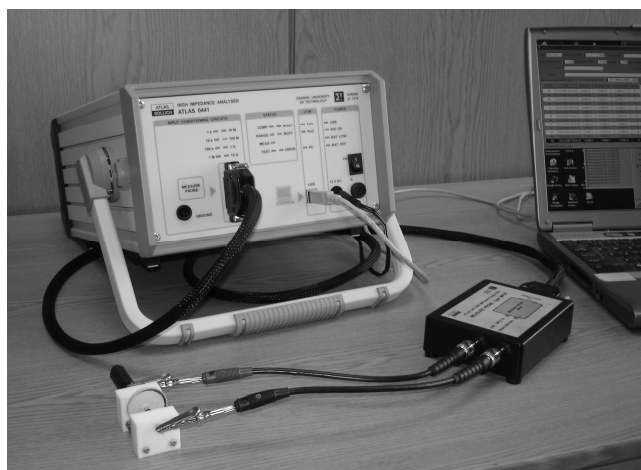


Rys. 5. Błąd pomiaru modułu i argumentu impedancji obiektu RC  
Fig. 5. Error of the measurement of the modulus and argument of the impedance of the RC object

Z analizy wykresów można zauważyć, że najmniejsze błędy występują w przypadku pomiaru zrealizowanym analizatorem z sondą 3-zaciskową. Dla częstotliwości poniżej 100 kHz błąd względny modułu i bezwzględny argumentu impedancji mieści się w przedziale  $\pm 0,5\%$  i  $\pm 0,5^\circ$ . Natomiast dla częstotliwości z zakresu 100 kHz ÷ 1 MHz wzrasta odpowiednio do 1,5% i 2°. W przypadku pomiaru sondą 2-zaciskową dla częstotliwości większych od 100 kHz błąd szybko rośnie, stąd dla obiektów uziemionych maksymalna częstotliwość pomiarowa została ograniczona do 100 kHz. Przeprowadzone badania zrealizowanego analizatora impedancji wykazały duże lepsze parametry metrologiczne w porównaniu z zestawem Solartron. Zwłaszcza w pomiarach dużych impedancji (dla modułu impedancji  $|Z_x| > 1 \text{ G}\Omega$ ), błędy względny modułu i bezwzględny argumentu impedancji wzrastają prawie o rząd wielkości. Reasumując, można stwierdzić, że opracowany przez autorów analizator, umożliwia pomiar impedancji do 100 GΩ ze znacznie mniejszym błędem w porównaniu z dużo droższym zestawem Solartrona: 1294 i 1255.

## 5. Podsumowanie

Opracowany w ramach projektu badawczo-wdrożeniowego UE Eureka E13174 analizator do spektroskopii impedancyjnej (rys. 6) został wdrożony do produkcji seryjnej w firmie ATLAS-SOLLICH. Do wyznaczania składowych ortogonalnych sygnałów pomiarowych zastosowano w nim technikę cyfrowego przetwarzania sygnałów. Pozwoliła ona na pomiary w szerokim zakresie częstotliwości od bardzo niskich 100 μHz do 1 MHz. Dzięki zastosowaniu obwodu wejściowego w postaci sondy pomiarowej (2 i 3 zaciskowej) analizator umożliwia pomiary w zakresie  $100 \Omega < |Z_x| < 100 \text{ G}\Omega$  (w 8 podzakresach).



Rys. 6. Widok analizatora do spektroskopii wysokoimpedancyjnej  
Fig. 6. View of the high impedance spectroscopy analyzer

Analizator zrealizowano w formie przyrządu wirtualnego na 7 eurokartach wykonanych w technologii SMD. Składa się on z jednostki centralnej połączonej za pomocą interfejsu USB z komputerem PC. Wykorzystując nowoczesne podzespoły elektroniczne, autorzy zrealizowali przystępny i tani analizator do spektroskopii wysokoimpedancyjnej, którego parametry użytkowe są porównywalne z laboratoryjną aparaturą komercyjną znanych firm.

## 6. Literatura

- [1] H. Andersson, I. Petersson: Modeling electrochemical impedance data for semi-bipolar lead acid batteries. *Journal of Applied Electrochemistry* 31, 2001.
- [2] K. Srinivas, P. Sarah: Impedance spectroscopy study of polycrystalline BiFe<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>18</sub>. *Bulletin of Material Science* 26, 2003.
- [3] J. Xiang, N. B. Jones, D. Cheng: Direct inversion of the apparent complex-resistivity spectrum. *Geophysics* 66, 2001.
- [4] R. T. Coverdale, B. J. Christensen, T. O. Mason, H. M. Jennings, E. J. Garboczi, D.P. Bentz: Interpretation of impedance spectroscopy of cement paste via computer modeling. *Journal of Material Science* 30, 1995.
- [5] S. Nebuya, B. H. Brown, R. H. Smallwood, P. Milnes, A. R. Waterworth: Measurement of high frequency electrical transfer impedances from biological tissues. *Electronics Letters* 35, 1999.
- [6] J. Hoja: A metrological analysis of the input circuit of an impedance objects. *Metrological and Measurement Systems*, vol X, no. 4, 2003.
- [7] J. Hoja, G. Lentka: An analysis of a measurement probe for a high impedance spectroscopy analyzer. *Measurement*, 2007.
- [8] J. Hoja, G. Lentka: New measurement probe for impedance spectroscopy. *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, Italy 2006.
- [9] J. Hoja, G. Lentka: Ograniczenia wirtualnego miernika impedancji opartego na karcie akwizycji danych. *Pomiary Automatyka Kontrola* vol. 53, nr 9 bis, 2007.