

Marek NIEDOSTATKIEWICZ, Romuald ZIELONKO

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI,
KATEDRA OPTOELEKTRONIKI I SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH

Kryterium doboru częstotliwości w pomiarach identyfikacyjnych metodą odwrotnego przekształcenia biliniowego

mgr inż. Marek NIEDOSTATKIEWICZ

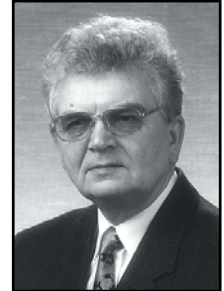
Absolwent (1999) Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, kierunku Elektronika, specjalności Elektroniczne Systemy Pomiarowe. Asystent w Katedrze Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych. Zainteresowania naukowe dotyczą pomiarów identyfikacyjnych parametrów obiektów technicznych modelowanych obwodami elektrycznymi za pomocą sygnałów o projektowanych kształtach, co jest przedmiotem realizowanej rozprawy doktorskiej.



e-mail: niedost@eti.pg.gda.pl

Prof. dr inż. Romuald ZIELONKO

Absolwent (1959) Wydziału Łączności Politechniki Gdańskiej. Profesor zwyczajny PG od 1990 r. Autor ponad 160 publikacji, 19 patentów i jednej książki z zakresu metrologii i diagnostyki elektronicznej. Promotor 10 doktorów. Kierownik Katedry Miernictwa Elektronicznego Politechniki Gdańskiej (1991–2007); wiceprzewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN; redaktor naczelny kwartalnika PAN „Metrology and Measurement Systems”.



Adres e-mail: zielonko@eti.pg.gda.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania porównawcze nowych kryteriów doboru częstotliwości dla pomiarów identyfikacyjnych obiektów technicznych modelowanych za pomocą dwójników wieloelementowych metodą odwrotnego przekształcenia biliniowego. Metoda pozwala skrócić czas identyfikacji w porównaniu z konwencjonalną spektroskopią impedancyjną. Badane kryteria są oparte na wrażliwości wielkoprzrostowej, reprezentowanej przez długości łuków krzywych identyfikacyjnych przekształcenia biliniowego.

Słowa kluczowe: pomiary identyfikacyjne obiektów technicznych, identyfikacja parametryczna, transformacja biliniowa, spektroskopia impedancyjna.

Frequencies selection criteria for parameter identification based on reverse bilinear transformation

Abstract

The paper presents the comparison of new frequency selection criteria for the method of parameter identification of technical objects modelled by two terminal networks, based on inverse bilinear transformation. The method allows to reduce the identification time as compared to conventional impedance spectroscopy based approach. The tested criteria have been based on high-signal sensitivity represented by the length of bilinear transform identification curves.

Keywords: identification measurement of technical objects, parameter identification, bilinear transformation, impedance spectroscopy.

1. Wprowadzenie

Ostatnio, coraz szerzej stosowane jest modelowanie obiektów technicznych i biologicznych za pomocą obwodów elektrycznych, najczęściej wieloelementowych dwójników impedancyjnych. Modelowanie takie umożliwia badania symulacyjne obiektów, ocenę ich jakości, monitorowanie i diagnozowanie stanu.

Do identyfikacji parametrów impedancyjnych obiektów stosowane są głównie metody spektroskopii impedancyjnej [1], polegającej na pomiarach widma impedancyjnego w szerokim zakresie częstotliwości. Na podstawie widma, w drugim etapie procesu identyfikacji następuje dopasowanie parametrów modelu obiektu do widma, najczęściej metodą CNLS (Complex Non-linear Least Square Fitting) [2]. Oba etapy konwencjonalnego procesu identyfikacji posiadają istotne wady. Ze względu na konieczność pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości,

wyznaczenie widma jest bardzo czasochłonne, szczególnie w przypadku np. powłok przeciwkorozyjnych, dla których należy mierzyć widmo już od częstotliwości rzędu mHz. Wadą CNLS jest jej optymalizacyjny algorytm który powoduje, że dla specyficznych kombinacji danych wejściowych możliwy jest brak zbieżności procesu wyznaczania parametrów.

Alternatywna metoda pomiarów identyfikacyjnych polega na sekwencyjnym wyznaczaniu parametrów krok po kroku z wykorzystaniem odwrotnego przekształcenia biliniowego [3]. Liczba potrzebnych pomiarów impedancji jest równa liczbie kroków metody, tożsamej z liczbą zidentyfikowanych parametrów.

Główne walory metody biliniowej to: skrócenie czasu identyfikacji, uproszczenie obliczeń oraz analityczny charakter zależności łączących obliczane parametry i wyniki pomiarów [4].

Warunkiem realizacji metody jest właściwy dobór częstotliwości pomiarowych impedancji na podstawie spodziewanych (nominalnych) wartości elementów dla zidentyfikowanego obiektu.

Prezentowana metoda i kryteria są zorientowane na zastosowanie do identyfikacji parametrów powłoki przeciwkorozyjnej we wczesnym stadium eksploatacji, modelowanej za pomocą 4-elementowego modelu Beauniera [3-4]. Planowany jest pomiar impedancji za pomocą pobudzania obiektu sygnałem wieloharmonicznym i analizy odpowiedzi metodą banku filtrów [5], co przyspiesza etap pomiarowy metody [6-7].

2. Metoda identyfikacji parametrów z wykorzystaniem transformacji biliniowej.

Do identyfikacji parametrycznej obiektów o znanej strukturze obwodu zastępczego można wykorzystać transformację biliniową, która umożliwia syntezę różnych wariantów metod diagnostycznych [8] i identyfikacyjnych [3].

2.1. Podstawy teoretyczne

Przekształcenie biliniowe umożliwia przedstawienie impedancji liniowego dwójnika wieloelementowego o stałych skupionych, dla pulsacji ω_i , jako funkcji biliniowej dowolnego parametru dwójnika p_i wybranego z wektora parametrów $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_k]^T$:

$$Z(j\omega_i, p_i) = \frac{A_i(j\omega_i)p_i + B_i(j\omega_i)}{C_i(j\omega_i)p_i + D_i(j\omega_i)}, \quad i=1,2,\dots,k, \quad (1)$$

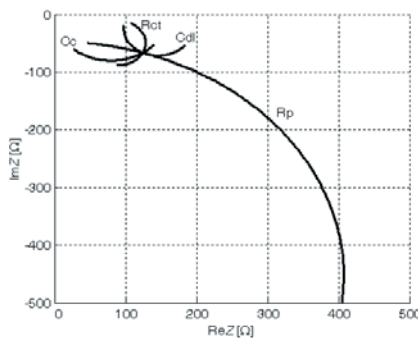
gdzie: A_i, B_i, C_i, D_i – współczynniki zespolone spełniające warunek $A_i D_i - B_i C_i \neq 0$.

Współczynniki te są zależne od pozostałych parametrów dwójnika $p_j, (j \neq i)$. Odwrotne przekształcenie biliniowe umożliwia obliczenie wartości nieznanego parametru p_i na podstawie współczynników A_i, B_i, C_i, D_i oraz zmierzonej wartości impedancji dwójnika $Z(j\omega_i)$ ze wzoru:

$$p_i = \frac{D_i(j\omega_i) \cdot Z(j\omega_i) - B_i(j\omega_i)}{A_i(j\omega_i) - C_i(j\omega_i) \cdot Z(j\omega_i)} \quad i=1,2,\dots,k. \quad (2)$$

Obrazem przekształcenia biliniowego na płaszczyźnie zespolonej $\text{Re } Z, \text{Im } Z$ jest fragment okręgu lub prostej, tzw. okrąg uogólniony nazywany krzywą homograficzną lub identyfikacyjną. Pęk krzywych wykreślonych dla wszystkich parametrów dwójnika, przy założonym zakresie ich zmienności, tworzy tzw. rodzinę krzywych identyfikacyjnych, przecinających się w punkcie nominalnej impedancji dwójnika.

Wzajemne położenie, kształt i długość krzywych identyfikacyjnych zależą od pulsacji ω_i , którą można tak dobrać iż dominować będzie jedna krzywa, o największej długości, a tym samym największej wrażliwości wielkoprzrostowej impedancji na zmiany parametru w zadanym zakresie.



Rys. 1. Przykładowe krzywe identyfikacyjne dla dwójnika Beauquiera, modelującego powłokę antykorozyjną we wczesnym stadium degradacji.
Fig. 1. Exemplary identification curves for Beauquier's equivalent circuit modeling anticorrosion coatings in early stage of degradation.

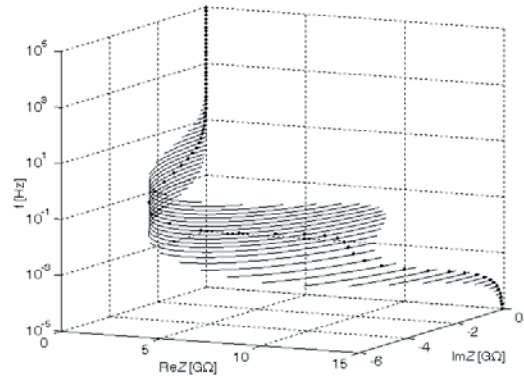
Przypadek taki, dla modelu Beauquiera (Rys. 3) zilustrowano na Rys. 1. Widoczna jest dominacja krzywej odpowiadającej elementowi R_p i mała długość pozostałych krzywych identyfikacyjnych, która świadczy o małej wrażliwości impedancji Z na zmiany wartości pozostałych elementów dwójnika. Charakter zależności krzywej identyfikacyjnej od częstotliwości pokazano na Rys. 2, na przykładzie krzywej elementu C_c . Jak widać, maksymalna długość krzywej występuje na częstotliwości ok. 10^{-1} Hz.

2.2. Identyfikacja parametrów krok po kroku

Koncepcja biliniowej metody identyfikacji [3], zakłada podział procedury identyfikacyjnej na trzy etapy: przedtestowy, pomiarowy i identyfikacyjny. W pierwszym etapie wyznaczany jest wektor optymalnych częstotliwości pomiarowych $f=[f_1, f_2, \dots, f_k]^T$ na podstawie wektora startowych wartości parametrów $p_s=[p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sk}]^T$, najczęściej nominalnych. W drugim etapie mierzone są wartości impedancji dwójnika na wybranych uprzednio częstotliwościach. W trzecim etapie, wykorzystując odwrotną transformację biliniową (2) przeprowadzana jest sekwencyjna identyfikacja parametrów na podstawie macierzy współczynników i zmierzonych wartości impedancji. Liczba pomiarów jest równa liczbie identyfikowanych parametrów i liczbie kroków etapu identyfikacji.

W pierwszym kroku identyfikacji, wyznaczany jest parametr p_1 na podstawie A_1, B_1, C_1, D_1 obliczonych dla wartości startowych $p_{s2} \dots p_{sk}$. W kolejnym kroku, wyznaczany jest p_2 . Współczynniki obliczane są z wartości startowych $p_{s3} \dots p_{sk}$ oraz zidentyfikowanej w poprzednim kroku wartości p_1 . Współczynniki A_k, B_k, C_k, D_k wyznaczania ostatniego parametru p_k są obliczane wyłącznie na podstawie uprzednio zidentyfikowanych wartości $p_1 \dots p_{k-1}$.

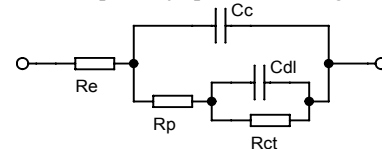
Istotnym zagadnieniem jest taki dobór częstotliwości pomiarowej impedancji dwójnika dla każdego identyfikowanego parametru p_i , aby wrażliwość impedancji na jego zmiany była jak największa oraz aby wrażliwość impedancji na zmiany pozostałych parametrów (a dokładniej parametrów jeszcze nie zidentyfikowanych $p_{i+1} \dots p_k$) była jak najmniejsza. Odpowiada to sytuacji, z Rys. 1, gdy długość krzywej identyfikowanego parametru R_p dominuje nad krzywymi pozostałych parametrów. W związku z tym, celowe jest poszukiwanie kryteriów doboru częstotliwości pomiarowych.



Rys. 2. Zmiana długości krzywej identyfikacyjnej w funkcji częstotliwości dla elementu C_c czteroelementowego dwójnika Beauquiera.
Fig. 2. Variation of identification curve length as a function of frequency for element C_c of 4-element Beauquier's equivalent model.

3. Obiekt testowy

Badania symulacyjne kryteriów przeprowadzono dla modelu Beauquiera powłoki antykorozyjnej na podłożu metalowym, we wczesnym stadium eksploatacji, przedstawionego na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat obwodu zastępczego Beauquiera powłoki przeciwkorozyjnej na podłożu metalowym.
Fig. 3. Beauquier's equivalent circuit of anticorrosion coating on a metal surface.

Parametr R_e reprezentujący rezystancję elektrolitu posiada wartość stałą, zależną np. od budowy celki pomiarowej. W związku z tym, identyfikowane są parametry uproszczonego, 4-elementowego obwodu zastępczego Beauquiera, którego impedancja ma postać:

$$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega \cdot C_c + \frac{1}{R_p + \frac{1}{j\omega \cdot C_{dl} + \frac{1}{R_{ct}}}}} \quad (3)$$

zależną od parametrów, przedstawionych w Tab. 1.

Tab. 1. Parametry 4-elementowego modelu Beauquiera dla różnych faz degradacji powłoki
Tab. 1. Parameters of 4-element Beauquier's model for different stages of coating's degradation

Dwójnik	R_p	R_{ct}	C_c	C_{dl}
A	100GΩ	100GΩ	10pF	100pF
B	10GΩ	10GΩ	100pF	1nF

Optymalne częstotliwości pomiarowe wyznaczano dla parametrów nominalnych (dwójnik A), natomiast proces identyfikacji symulowano dla powłoki w fazie eksploatacji na

etapie rozpoczęcia penetracji powłoki przez elektrolit (dwójnik B) [3]. Wrażliwość metody biliniowej na błędy pomiarowe dla testowanych kryteriów doboru częstotliwości zbadano metodą Monte Carlo. Symulowano pomiar impedancji na zadanych częstotliwościach, uwzględniając przypadkowy, multiplikatywny błąd wyznaczania części rzeczywistej i urojonej. Dla każdego z kryteriów wykonano serię 100 pomiarów z losowymi wartościami błędów pomiarowych. Następnie, obliczono wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów dwójnika identyfikowanych w danej serii. Obliczenia zrealizowano w środowisku Matlab.

4. Kryteria doboru częstotliwości

Zaproponowano i przebadano kryteria doboru częstotliwości pomiarowych, oparte na długościach łuków krzywych identyfikacyjnych, przybliżających wielkoprzrostową wrażliwość impedancji na zmianę parametru.

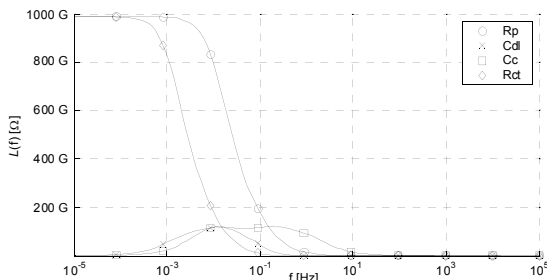
Długość krzywej L , dla częstotliwości f i zakresu zmienności parametru (od p_{min} do p_{max}) aproksymowano za pomocą sumy siecznych z punktu impedancji nominalnej do punktów odpowiadających wartościom impedancji dla p_{min} i p_{max} .

$$L = Z(f, p_{max}) - Z(f, p) + |Z(f, p_{min}) - Z(f, p)| \quad (4)$$

W dalszej części pracy założono:

$$p_{max} = k \cdot p, \quad p_{min} = \frac{1}{k} \cdot p, \quad k = 10. \quad (5)$$

Zależność długości krzywych identyfikacyjnych od częstotliwości dla badanego dwójnika przedstawia Rys. 4:



Rys. 4. Długość krzywych identyfikacyjnych modelu A w funkcji częstotliwości.
Fig. 4. Plot of identification curve length against frequency for model A.

Proponowane kryteria pozwalają wyznaczyć częstotliwości pomiarowe przez wyszukiwanie maksimum lub minimum funkcji celu $G_i(f)$, powiązanej z długościami krzywych identyfikacyjnych.

Dla pierwszego proponowanego kryterium K_1 funkcja celu jest równa długości krzywej identyfikacyjnej $L_i(f)$ parametru p_i w analizowanym przedziale częstotliwości (f_p, f_k). Kryterium wyznacza częstotliwość f_i optymalną dla wyznaczenia i -tego parametru p_i , dla której bezwzględna wrażliwość wielkoprzrostowa impedancji na zmiany parametru $|AZ| \sim L$ jest największa.

W przypadku, gdy krzywa posiada wyraźne maksimum, zapis formalny wygląda następująco:

$$f_x = f_i \Leftrightarrow G_i(f_x) = \max_{f_p < f < f_k} [G_i(f)]. \quad (6)$$

Dla krzywych nie posiadających wyraźnego maksimum (np. krzywych asymptotycznych), częstotliwość wyznacza się jako punkt, w którym wartość funkcji celu maleje o zadane ε , np. 1%:

$$f_x = f_i \Leftrightarrow G_i(f_x) = (1 - \varepsilon) \max_{f_p < f < f_k} [G_i(f)]. \quad (7)$$

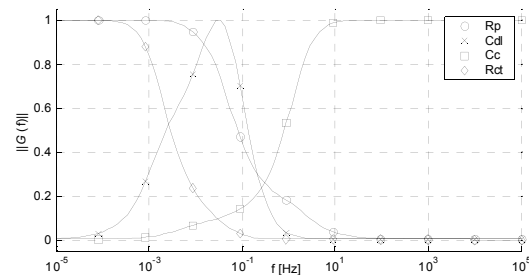
Proponowane kryterium K_2 wyszukuje maksimum długości krzywej identyfikacyjnej normalizowanej przez moduł z wartości nominalnej impedancji [3] - funkcja celu $G_i(f)$ ma postać:

$$G_i(f) = \frac{L_i(f)}{|Z_{nom}|}. \quad (8)$$

Normalizacja ta powoduje, że funkcja $G_i(f)$ przybliża względną wrażliwość wielkoprzrostową

$$S_{p_i} = \frac{\Delta Z / Z}{\Delta p_i / p_i}, \quad (9)$$

z jednakowym dla wszystkich parametrów współczynnikiem skali $\Delta p_i / p_i$ (5). Na Rys. 5 przedstawiono wykres funkcji $G_i(f)$, przy czym dla przejrzystości każdą z krzywych znormalizowano względem jej maksimum do przedziału [0,1].



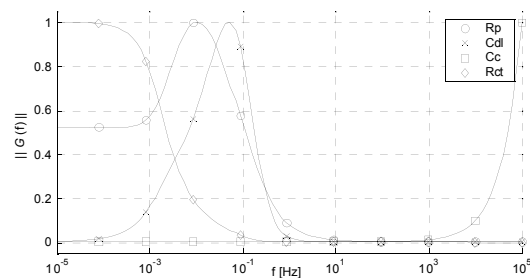
Rys. 5. Zależność znormalizowanej funkcji $G(f)$ dla kryterium K_2 od częstotliwości.
Fig. 5. Plot of normalized function $G(f)$ against frequency for criterion K_2 .

Oba powyższe pozwalają wyznaczyć częstotliwości na zasadzie wyszukiwania maksimum wrażliwości impedancji na dany parametr, ignorując wpływ pozostałych elementów.

Kolejne proponowane kryterium, K_3 , wyznacza częstotliwość, na której wrażliwość na wyznaczany w danym kroku parametr jest największa i jednocześnie wpływ pozostałych parametrów jest jak najmniejszy. Funkcję celu $G_i(f)$ dla tego kryterium sformułowano jako iloraz:

$$G_i(f) = \frac{L_i(f)}{L_1(f) + \dots + L_{i-1}(f) + L_{i+1}(f) + \dots + L_k(f)}. \quad (10)$$

Wykres znormalizowanej funkcji $G(f)$ przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Zależność funkcji $G(f)$ kryterium K_3 od częstotliwości.
Fig. 6. Plot of criterion K_3 function $G(f)$ against frequency.

Przeprowadzone badania wstępne wykazały nieprzydatność kryteriów K_1 - K_3 do wyznaczania częstotliwości dla biliniowej metody identyfikacji. Przyczyna tkwi w postaci macierzy współczynników odwrotnego przekształcenia biliniowego. Dla elementu R_p wyrażenia macierzy:

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + j\omega \cdot C_{dl} \cdot R_{ct} & R_{ct} \\ j\omega \cdot C_c - \omega^2 \cdot C_c \cdot C_{dl} \cdot R_{ct} & 1 + j\omega \cdot R_{ct} \cdot (C_{dl} + C_c) \end{bmatrix} \quad (11)$$

nie zależą od wartości startowej R_p lecz wyłącznie od pozostałych parametrów, z których część jest identyfikowana w poprzednich krokach, a część pochodzi z wektora wartości domyślnych (nominalnych). Ponieważ wartości domyślne mogą się znacznie różnić od rzeczywistych, implikuje to błąd identyfikacji.

Zaproponowano więc kryterium K_4 , ustalające częstotliwości pomiarowe z uwzględnieniem kolejności identyfikacji tak, by w każdym kroku minimalizować wpływ parametrów jeszcze nie zidentyfikowanych i pobieranych z wektora startowego. Formalnie, znalezienie częstotliwości wyznaczania i -tego parametru k -elementowego dwójnika ($i \neq k$) kryterium polega na znalezieniu **minimum** funkcji $G_i(f)$:

$$G_i(f) = L_{i+1}(f) + \dots + L_k(f), \quad (12)$$

odpowiednio wg wzorów dla krzywych posiadających minimum:

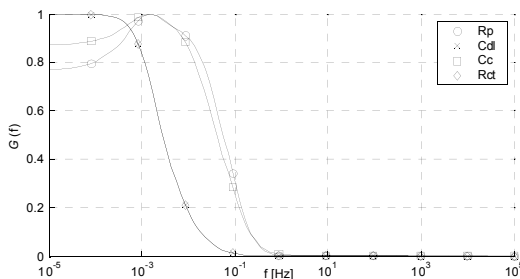
$$f_x = f_i \Leftrightarrow G_i(f_x) = \min_{f_p < f < f_k} [G_i(f)] \quad (13)$$

lub dla krzywych asymptotycznych:

$$f_x = f_i \Leftrightarrow G_i(f_x) = (1 + \varepsilon) \min_{f_p < f < f_k} [G_i(f)], \quad \varepsilon = 1\%. \quad (14)$$

Długość krzywych dla elementów zidentyfikowanych w poprzednich krokach $L_1(f) \dots L_{i-1}(f)$ nie jest w tym przypadku uwzględniana.

Dla elementu identyfikowanego jako ostatni ($i = k$), współczynniki macierzy obliczane są bez użycia danych startowych, więc przyjęto, że częstotliwość pomiarową wyznacza maksimum wrażliwości na ten element, analogicznie jak w K_1 .



Rys. 7. Zależność funkcji $G(f)$ kryterium K_5 od częstotliwości.
Fig. 7. Plot of criterion K_5 function $G(f)$ against frequency.

Zbadano także drugą wersję tego kryterium, oznaczoną K_5 , w której długości krzywych są przed sumowaniem normalizowane do przedziału $[0,1]$, aby wpływ parametrów startowych na współczynniki minimalizować z jednakową wagą. Funkcja celu przyjmuje wówczas postać:

$$G_i(f) = |L_{i+1}(f)| + \dots + |L_k(f)| \quad (15)$$

Tab. 2. Częstotliwości pomiarowe wyznaczone na podstawie różnych kryteriów
Tab. 2. Measurement frequencies selected by criterions

	C_c	R_p	C_{dl}	R_{ct}
K_1	0,2 Hz	1,8 mHz	12,1 mHz	217,3 μ Hz
K_2	11,2 Hz	3,1 mHz	31,7 mHz	219,5 μ Hz
K_3	97,8 kHz	10,5 mHz	49,5 mHz	89,1 μ Hz
K_4	763,7 mHz	274,0 mHz	96,2 mHz	217,3 μ Hz
K_5	813,4 mHz	596,4 mHz	94,9 mHz	217,3 μ Hz
K_{ref}	10 kHz	0,5 Hz	1 mHz	2 mHz

Częstotliwości wyznaczone za pomocą proponowanych w niniejszej pracy kryteriów przedstawiono w Tab. 2. Dla odniesienia, umieszczono także częstotliwości wyznaczone w pracy [3] dla podstawowej metody biliniowej PBIL.

Tab. 3. Błąd identyfikacji elementów dwójnika Beauliera
Tab. 3. Beaulier's circuit parameter identification error

	C_c	R_p	C_{dl}	R_{ct}
K_1	7.27%	-888.55%	-99.31%	888.62%
K_2	-0.03%	-866.56%	-99.74%	867.67%
K_3	-0.03%	-658.93%	-99.81%	659.01%
K_4	-0.42%	-2.99%	-8.60%	3.07%
K_5	-0.37%	-0.86%	-1.73%	0.95%
K_{ref}	-0.03%	-1.10%	-2.62%	1.17%

Wartości błędów względnych identyfikacji parametrów dwójnika B dla symulowanych serii 100 pomiarów na częstotliwościach wyznaczanych za pomocą omówionych kryteriów zawiera Tab. 3. Względne niepewności standardowe w

serii 100 pomiarów dla kryteriów K_4 , K_5 i K_{ref} wynosiły ok. 1% dla parametrów C_c i R_p , 2% dla R_{ct} oraz 4% dla C_{dl} .

5. Wnioski

Częstotliwości pomiarowe wyznaczone za pomocą badanych kryteriów posiadają wyraźną interpretację fizyczną. Najwyższą częstotliwość pomiarową należy stosować dla identyfikacji kondensatora C_c , gdyż bocznikuje on wówczas pozostałe elementy dwójnika i najbardziej wpływa na impedancję Z_x . Kondensator C_{dl} (o większej pojemności niż C_c) należy identyfikować na częstotliwościach niższych, tak aby jego reakcja była większa od R_p a mniejsza od R_{ct} . Rezystancję R_{ct} należy wyznaczać na częstotliwości jak najmniejszej. Natomiast dla identyfikacji rezystancji R_p istnieje optymalny przedział częstotliwości, w którym rezystor wpływa zarówno na składową rzeczywistą (zależną od R_{ct}) jak i urojoną (zależną od C_{dl}).

Obliczone błędy identyfikacji wskazują, że metoda biliniowa jest wrażliwa na dobór częstotliwości pomiarowych. Muszą one być wyznaczone z uwzględnieniem kolejności wyznaczania parametrów oraz właściwości macierzy współczynników A_i, B_i, C_i, D_i wykorzystywanych do sekwencyjnej identyfikacji parametrów.

Kryteria K_1, K_2 i K_3 , mimo iż uwzględniają wrażliwość funkcji impedancyjnej na parametr identyfikowany, wyznaczają wadliwie częstotliwości pomiarowe – metoda nie działa prawidłowo, osiągając błędy identyfikacji powyżej 100%.

Kryteria K_4, K_5 i K_{ref} wyznaczają właściwe częstotliwości pomiarowe i pozwalają na dokładniejszą identyfikację parametrów z wykorzystaniem odwrotnego przekształcenia biliniowego. Spośród nich, największą dokładność identyfikacji osiągnięto za pomocą nowo opracowanego kryterium K_5 .

Rozrzut wyników jest zależny od położenia elementu w strukturze dwójnika. Element leżący głębiej jest identyfikowany z większą względną niepewnością.

Metoda została przebadana w zakresie zmienności parametrów o rząd od wielkości nominalnych. Planowane jest jej zbadanie przy większych zakresach zmienności, np. o 2 rzędy. Kolejnym etapem badań będzie zastosowanie opracowanych kryteriów do optymalnego doboru częstotliwości składowych sygnału wielosinusoidalnego dla potrzeb nowej metody typu *one shot*, opartej na pobudzaniu obiektów takim sygnałem i analizie odpowiedzi za pomocą banku filtrów.

6. Literatura

- [1] Macdonald J.R.: Impedance spectroscopy: old problems and new developments, *Electrochimica Acta* vol. 35, 1990.
- [2] Boukamp B.A.: Nonlinear Least Square Fit for analysis of imittance data of electrochemical systems, *Solid State Ionics*, Vol. 20, 1986.
- [3] Hoja J., Lentka G., Zielonko R.: On the use of bilinear transformation for parameter identification of anticorrosion coatings. *Metrology and Measurement Systems* vol. 10, 2003.
- [4] Hoja J., Lentka G.: New Method Using Bilinear Transformation for Parameter Identification of Anticorrosion Coatings, XVII IMEKO World Congress, Dubrownik Chorwacja, czerwiec 2003.
- [5] Smekal Z.: Spectral Analysis by Digital Filter Banks, *Electronics Letters* vol. 10, 2001.
- [6] Lentka G., Niedostatkiwicz M.: The Goertzel filter-bank usage in the non-stationary impedance measurement, XIII. IMEKO TC-4, Ateny, Grecja, wrzesień 2004.
- [7] Niedostatkiwicz M., Zielonko R.: Accelerated multisine impedance spectrum measurement method directed at diagnosis of anticorrosion coatings, XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro, Brazylia, wrzesień 2006.
- [8] Czaja Z., Robotycki A.: Diagnosis of linear electronic systems using neural networks and bilinear transformation. X IMEKO TC-4 Neapol, Włochy 1998.