

# Pomiarowa estymacja parametrów modeli ułamkowego rzędu nowej klasy symetrycznych superkondensatorów polimerowych

**Streszczenie.** W artykule opisano wyniki badań nad nowymi materiałami polimerowymi elektroprzewodzącymi do budowy superkondensatorów, skonstruowanych na bazie polipirolu. Wykonano pomiary ich charakterystyk częstotliwościowych zespolonej impedancji metodą elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (EIS). Do zamodelowania impedancji tych elementów przyjęto wybrane, znane w literaturze modele ułamkowego rzędu. Do estymacji parametrów tych modeli wykorzystano algorytm optymalizacyjny roju cząstek (z ang. Particle Swarm Optimization – PSO).

**Abstract.** The paper presents the results of research on new electroconductive polymer materials, based on polypyrrole, for the construction of supercapacitors. Measurements of the complex impedance frequency characteristics were performed for these elements using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method. Selected fractional-order models, known from literature, have been used to model the impedance of these elements. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has been used to estimate parameters of these models. (**Measurement estimation of fractional-order model parameters for a new class of symmetrical polymer supercapacitors.**)

**Słowa kluczowe:** superkondensatory, modele ułamkowego rzędu, elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna EIS, polipirol.

**Keywords:** supercapacitors, fractional-order models, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), polypyrrole.

## Wstęp

Metody pomiarów urządzeń do magazynowania energii możemy podzielić na dwa rodzaje – są to metody stałoprądowe i zmiennoprądowe. Podczas pomiarów metodami stałoprądowymi występują silne zakłócenia, spowodowane zjawiskami polaryzacyjnymi. Wyniki pomiarów oporności tymi metodami są zawyżone, a w przypadku pomiarów niskim napięciem, dochodzi do blokowania przepływu prądu, jeśli zastosowano elektrody blokujące. Znaczenie poznawcze takich pomiarów jest niewielkie. Drugim rodzajem pomiarów są metody zmiennoprądowe, do których należy elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna (z ang. EIS – *Electrochemical Impedance Spectroscopy*). Omawiana metoda pomiaru pozwala na uzyskanie wysokiej precyzji podczas pomiarów oraz jest często stosowana do oceny heterogenicznych parametrów przeniesienia ładunku i do badania struktury dwuwarstwowej. Ta technika ma zastosowanie w badaniu akumulatorów, rozwoju ogni paliwowych, czujnikach, korozji i elektrochemii fizycznej, a także może również dostarczać informacji na temat parametrów reakcji, szybkości korozji, porowatości powierzchni elektrod, właściwości powłoki, transportu masy i pomiarów pojemności międzyfazowej. Jest używana w wielu dziedzinach nauki, takich jak chemia, inżynieria materiałowa, elektrotechnika oraz elektronika [1, 2, 3, 4].

Elektrochemiczne kondensatory dwuwarstwowe (EDLC), które są również nazywane superkondensatorami cieszą się coraz większym zainteresowaniem przemysłu transportowego. Ich pozytywne aspekty, takie jak wysoka gęstość mocy, długi cykl życia oraz praca przy niskim napięciu sprawiają, że są atrakcyjnymi urządzeniami dla tego sektora przemysłu. Układy o wysokiej gęstości mocy znajdują zastosowanie w układach hamowania rekuperacyjnego w pojazdach elektrycznych. Pierwotnie były one stosowane w jednostkach trakcyjnych, ale wraz z rozwojem elektromobilności znalazły zastosowanie w samochodach i autobusach elektrycznych. Oprócz transportu, superkondensatory mają zastosowanie w systemach zasilania awaryjnego, które wykorzystuje się podczas braku zasilania ważnych obiektów teleinformatycznych. Głównym ograniczeniem elektrycznych kondensatorów dwuwarstwowych jest ich niska gęstość energii pola elektrycznego. Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie superkondensatorów oraz akumulatorów w jednym

układzie. W takim systemie kondensatory zapewniają wysoką gęstość mocy, natomiast akumulatory odpowiadają za wysoką gęstość energii [1, 5, 6, 7].

## Pomiary EIS i badane modele superkondensatorów

Tradycyjne superkondensatory bazują na podwójnej elektrycznej warstwie Helmholtza. Warstwa Helmholtza powstaje na granicy elektrolitu oraz elektrody. W konstrukcji tego typu urządzeń jako elektrody stosuje się materiały charakteryzujące się dużą powierzchnią wewnętrzną. Konieczność zastosowania takich rozwiązań materiałowych wynika z zależności fizykochemicznej, która stanowi, iż wzrost pojemności urządzenia jest wprost proporcjonalny do wzrostu powierzchni elektrod. Superkondensatory polimerowe są specjalną grupą tego typu urządzeń charakteryzującą się nieco odmiennym mechanizmem magazynowania energii niż tradycyjne kondensatory dielektryczne. Tego typu urządzenia mają dwa mechanizmy magazynowania energii – podwójną warstwę Helmholtza oraz reakcje redukcji i utleniania polimerów przewodzących. Energia w tym przypadku generowana jest podczas przeniesienia ładunku, który występuje w reakcji redoks. Przy doborze materiałów aktywnych potrzebnych do wykonania urządzenia, należy zwrócić szczególnie uwagę na substancje zdolne do wytwarzania powierzchniowych reakcji redukcji i utleniania. Materiałami wykazującymi takie właściwości są polimery skoniugowane [8, 9, 10].

Idealne tworzywo, z którego zostanie wykonana elektroda powinno mieć niską rezystancję, wysoką odporność na oddziaływania mechaniczne oraz rozwiniętą powierzchnię. W kontekście pożądaných cech energetycznych, mają je nanorurki węglowe oraz polimery przewodzące. Kompozyty składające się z materiału węglowego oraz polimerów przewodzących tworzą doskonały materiał pełniący funkcję elektrody. Niektóre polimery skoniugowane mają tak dobre właściwości elektrochemiczne oraz wytrzymałościowe, iż stosuje się je jako elektrody jednoskładnikowe [11].

Badane superkondensatory zostały wykonane na płytkach stalowych. W wyniku procesu elektropolimeryzacji realizowanej za pomocą woltamperometrii cyklicznej, na powierzchni płytek został nałożony polipirol. Masa polimeru, która znajduje się na obu kolektorach wynosi ok. 35  $\mu\text{g}$  w każdym urządzeniu. Odległość między dwoma kolektorami zawierającymi polimer wynosi około 70  $\mu\text{m}$  [12].

W badanych układach zostały zastosowane elektrolity zawierające poli(metakrylan metylu) (Alfa Aesar, MW=550000), acetonitryl (Acros, 99%), węgiel propylenowy (Prosynth, 99%) oraz zmienny składnik aktywny w postaci soli litowych oraz tetrabutyleniowych. W roli składników aktywnych elektrolitów wykorzystano następujące sole: nadchloran litu ( $\text{LiClO}_4$ ) (Acros, czysty), nadchloran tetrabutylamonu ( $\text{NBu}_4\text{ClO}_4$ ) (Fluka, 98%) oraz trifluorometanosulfonian tetrabutylamonu ( $\text{NBu}_4\text{CF}_3\text{SO}_3$ ) (Fluka, 98%).

Układy zostały zbadane metodą EIS przy pomocy potencjostatu Bio-Logic SP-150 w laboratorium Katedry Fizykochemii i Technologii Polimerów Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej (rys. 1 i 2).



Rys.1. Potencjostat Bio-Logic SP-150



Rys.2. Badany superkondensator zawierający elektrolit z solą  $\text{LiClO}_4$

### Modele superkondensatorów

Bazując na wielu pracach naukowych dotyczących superkondensatorów, można zauważyć, że zarówno charakterystyki częstotliwościowe, jak i przebiegi w układach je zawierających, różnią się od charakterystyk i przebiegów występujących w obwodach z klasycznymi kondensatorami dielektrycznymi [13, 14]. Wynika to z takich ich cech, jak: duża pojemność, rzędu nawet kilku tysięcy faradów, elektrochemiczna budowa i stosunkowo duża szeregowa rezystancja wewnętrzna (ESR) [15]. Dlatego coraz częściej wykorzystuje się do ich opisu rachunek różniczkowy ułamkowego rzędu. W pracach [15, 16] otrzymano wartości parametrów modeli ułamkowego rzędu dla wybranych komercyjnych superkondensatorów. Jednocześnie, trwają ciągle badania nad nowymi realizacjami kondensatorów ułamkowego rzędu [17].

Na bazie pomiarów metodą elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej EIS opracowano kilka modeli

superkondensatorów w dziedzinie częstotliwości. W opisanych w artykule badaniach uwzględniono modele obowiązujące dla szerokiego zakresu częstotliwości.

Przykładem takich modeli jest model oparty o bieguny i zera impedancji ułamkowego rzędu, opisany jako:

$$(1) \quad Z_C(j\omega) = R_C + k \frac{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^\alpha}{(j\omega)^\beta},$$

gdzie:  $R_C$  – szeregową rezystancja zastępcza (ESR) superkondensatora,  $\omega_0$  – pulsacja graniczna,  $k$  – parametr związany z odwrotnością pojemności (elastancją) superkondensatora,  $\alpha, \beta$  – parametry ułamkowe (bezwymiarowe).

Poszczególne parametry modelu (1) –  $R_C, \omega_0, \alpha, \beta$  oraz  $k$  – można z dobrą dokładnością wyznaczyć z charakterystyk częstotliwościowych Nyquista i Bode'go.

Dzięki wykorzystaniu metody elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej, wyprowadzono również bardziej złożone modele superkondensatorów ułamkowego rzędu. Opisują one pojedyncze elektrochemiczne struktury, które odpowiadają zjawiskom występującym w superkondensatorach dla różnych zakresów częstotliwości [18]. Wprowadzono w tych modelach kilka elementów, których transmitancje opisane są zależnościami:

– impedancja Warburga:

$$(2) \quad W(j\omega) = \frac{Z_0}{\sqrt{j\omega}},$$

– ograniczona impedancja Warburga:

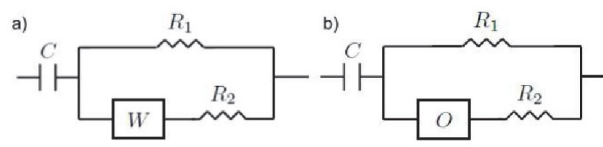
$$(3) \quad O(j\omega) = \frac{Z_0 \coth(B\sqrt{j\omega})}{\sqrt{j\omega}},$$

– funkcja Havriliaka - Negami:

$$(4) \quad H(j\omega) = \frac{1}{j\omega(C_0 - C_\infty)[1 + (j\omega\tau)^\mu]^\phi},$$

gdzie:  $Z_0, B$  – parametry,  $C_0, C_\infty$  – pojemność kondensatora przy niskich ( $f \rightarrow 0$ ) i wysokich częstotliwościach ( $f \rightarrow \infty$ ),  $\tau$  – parametr związany z temperaturą pracy,  $\mu, \phi$  – parametry ułamkowego rzędu.

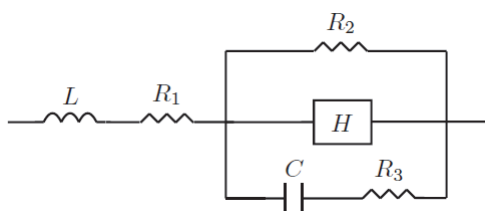
Impedancja Warburga reprezentuje liniową dyfuzję w przestrzeni półnieskończonej, zależną od częstotliwości i od potencjału zakłóceń. Ograniczony element Warburga opisuje liniową dyfuzję w jednolitej warstwie o ograniczonej grubości. Przykładowe topologie modeli ułamkowego rzędu wykorzystujące elementy: impedancję Warburga i ograniczoną impedancję Warburga, odpowiednio z czterema lub pięcioma parametrami, pokazano na rys. 3.



Rys.3. Topologie modeli superkondensatora ułamkowego rzędu [18]: a) czteroparametrowa struktura z impedancją Warburga, b) pięcioparametrowa struktura z ograniczoną impedancją Warburga

Funkcja Havriliak'a-Negami jest elementem najbardziej uniwersalnego modelu superkondensatora w dziedzinie częstotliwości. Model superkondensatora uwzględniający 5 parametrów ( $L, R_1, R_2, R_3, C$ ) oraz pięcioparametrową funk-

cję  $H$  przedstawiono na rys. 4. Stanowi on najdokładniejszy opis rzeczywistego superkondensatora w szerokim zakresie częstotliwości.



Rys.4. Topologia modelu superkondensatora ułamkowego rzędu, wykorzystująca funkcję Havriliak'a- Negami [13]

Trwają również prace nad nowymi modelami superkondensatorów ułamkowego rzędu, między innymi, nad opracowaniem modelu łączącego część rzędu całkowitego pojemności superkondensatora oraz części rzędu ułamkowego, które wspólnie opisywałyby wszystkie zjawiska zachodzące wewnątrz superkondensatorów [19].

Osobną kwestią jest identyfikacja parametrów poszczególnych modeli superkondensatorów. Opracowano różne metody identyfikacji, wykorzystujące np. zjawisko rezonansu w obwodzie szeregowym [20]. Natomiast w przypadku uzyskania widm częstotliwościowych Nyquista lub Bode'go dobrym rozwiązaniem jest estymacja parametrów modeli przy pomocy metod i algorytmów optymalizacyjnych.

#### Metoda estymacji parametrów modeli

Wykorzystana metoda estymacji parametrów modeli superkondensatorów polega na aproksymacji pomiarowych charakterystyk modułu  $|Z(f)|$  oraz argumentu  $\varphi(f)$  impedancji charakterystykami obliczonymi na podstawie równania wybranego modelu.

Aproksymacja charakterystyk polega na minimalizacji funkcji celu, określonej jako błąd średniokwadratowy, występujący między charakterystyką pomiarową i aproksymującą. Zastosowano normalizację charakterystyk pomiarowych i aproksymujących w celu uzyskania podobnych rzędów wielkości ich wartości:

$$(5) \quad \left| \tilde{Z}(f) \right| = \frac{|Z(f)|}{\max_f(|Z(f)|)}, \quad \tilde{\varphi}(f) = \frac{\varphi(f)}{\max_f(|\varphi(f)|)},$$

przy czym, jako wielkości odniesienia dla charakterystyk pomiarowych i aproksymujących wykorzystywano wartości maksymalne odpowiednich charakterystyk pomiarowych, które nie ulegają zmianie w procesie aproksymacji.

Funkcja celu  $\varepsilon$  ma więc postać:

$$(6) \quad \varepsilon(\mathbf{K}) = \sum_{i=1}^n \left( \left| \tilde{Z}_m(f_i) \right| - \left| \tilde{Z}_a(f_i, \mathbf{K}) \right| \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left( \tilde{\varphi}_m(f_i) - \tilde{\varphi}_a(f_i, \mathbf{K}) \right)^2,$$

gdzie:  $\mathbf{K}$  – wektor poszukiwanych parametrów modelu,  $i$  – numer punktu charakterystyki częstotliwościowej,  $n$  – liczba punktów charakterystyki częstotliwościowej, taka sama dla  $|Z(f)|$  oraz  $\varphi(f)$ , indeks  $m$  oznacza charakterystykę pomiarową, a indeks  $a$  – charakterystykę aproksymującą, obliczoną na podstawie poszukiwanych parametrów modelu.

Do minimalizacji tak określonej funkcji celu wykorzystano algorytm optymalizacyjny roju cząstek (ang. *particle swarm algorithm*) [21, 22]. Pozwala on na znalezienie minimum globalnego funkcji celu z zadowalającą dokładnością i szybkością, mimo stosunkowo dużego

obszaru poszukiwań oraz występowania minimów lokalnych funkcji celu.

#### Przykładowe obliczenia

W badaniach przeanalizowano dokładność aproksymacji charakterystyk częstotliwościowych superkondensatorów za pomocą wszystkich modeli opisanych w artykule. Przedstawiono wyniki badań dla modeli, które najdokładniej aproksymują charakterystyki badanych superkondensatorów, przy różnych wartościach napięcia offsetu  $U$  (składowej stałej napięcia na zaciskach badanego układu).

W tab. 1 i 2 zestawiono wyniki estymacji parametrów wybranych modeli oraz wartości błędu średniokwadratowego  $\varepsilon$  między charakterystykami pomiarowymi i aproksymującymi. Dzięki normalizacji charakterystyk według wzoru (5), można wykorzystać wartość błędu  $\varepsilon$  do porównania dokładności aproksymacji charakterystyk dla superkondensatorów zawierających elektrolity z różnymi solami aktywnymi.

Tabela 1. Wyniki estymacji parametrów modelu opartego o bieguny i zera impedancji ułamkowego rzędu

$U, V$	$k$	$\omega_0$	$\alpha$	$\beta$	$R_c$	błąd $\varepsilon$
nadchloran litu ( $LiClO_4$ )						
-0,2	8504	211,6	-0,5697	0,2789	147,3	0,07021
0	8423	185,5	-0,5637	0,2740	146,8	0,05864
0,8	13411	105,4	-0,5357	0,2946	147,5	0,05864
nadchloran tetrabutylamonu ( $NBu_4ClO_4$ )						
-0,2	1111	14,23	0,6330	0,9075	63,78	0,009338
0	1201	14,65	0,5144	0,9214	67,60	0,006505
0,8	1029	10,45	0,5565	0,8928	69,73	0,009320
trifluorometanosulfonian tetrabutylamonu ( $NBu_4CF_3SO_3$ )						
-0,2	2127	2757	-0,4884	0,3965	184,6	0,04323
0	2168	2441	-0,4795	0,3938	184,6	0,06227
0,8	4944	308,1	-0,3734	0,3736	187,6	0,07021

Tabela 2. Wyniki estymacji parametrów modelu z ograniczoną impedancją Warburga

$U, V$	$C$	$R_1$	$R_2$	$Z_0$	$B$	błąd $\varepsilon$
nadchloran litu ( $LiClO_4$ )						
-0,2	0,06751	13422	157,3	21382	320921	2,2986
0	0,06834	13763	158,6	21198	274413	2,3005
0,8	0,04078	38207	182,5	26462	594487	2,6146
nadchloran tetrabutylamonu ( $NBu_4ClO_4$ )						
-0,2	$9,28 \cdot 10^{-4}$	207,5	121,1	1453	333238	0,03537
0	$8,68 \cdot 10^{-4}$	250,2	105,2	797,2	140505	0,01344
0,8	0,001029	278,2	113,9	1072	24900	0,02947
trifluorometanosulfonian tetrabutylamonu ( $NBu_4CF_3SO_3$ )						
-0,2	$4,19 \cdot 10^{-4}$	1406	198,9	5934	51443	0,1776
0	$4,46 \cdot 10^{-4}$	1494	196,1	5923	102156	0,2156
0,8	0,1042	7879	169,7	9135	141283	0,7835

Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki pomiarowe badanych superkondensatorów, przykładowo dla napięcia offsetu  $U = 0 V$ .

Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki pomiarowe dla badanych wartości napięcia offsetu  $U$ , przykładowo dla superkondensatora z elektrolitem zawierającym sól  $NBu_4CF_3SO_3$ .

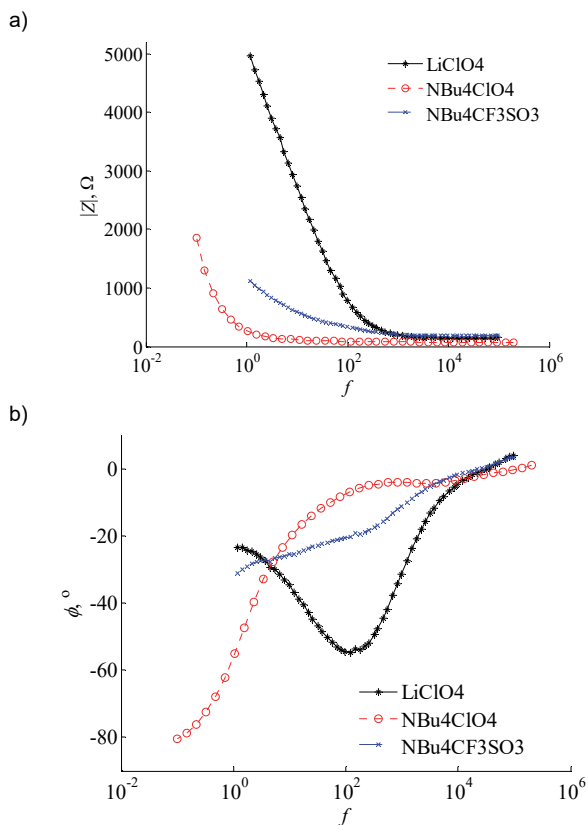
Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki pomiarowe i aproksymujące, przykładowo dla superkondensatora z elektrolitem zawierającym sól  $LiClO_4$  i napięcia offsetu  $U = 0 V$ .

#### Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

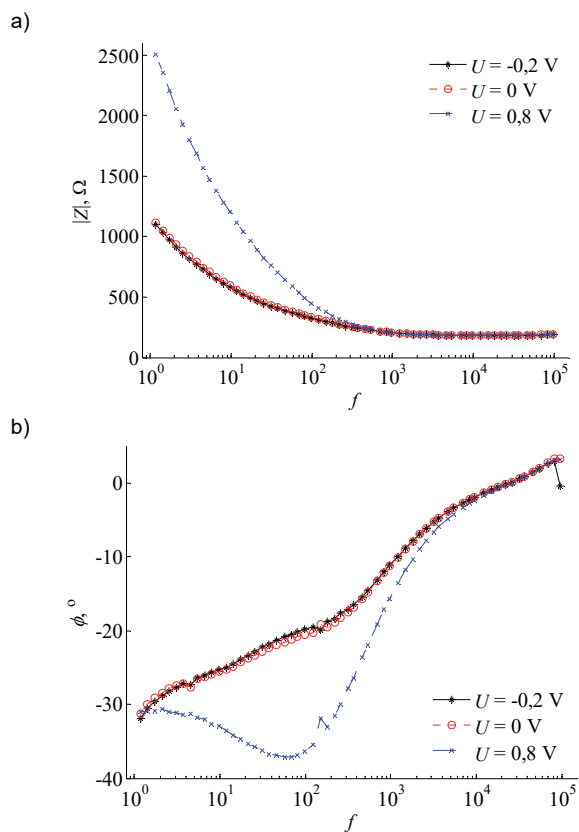
– Zastosowanie normalizacji charakterystyk pomiarowych i aproksymujących pozwala na wykorzystanie wartości błędu  $\varepsilon$  do porównania dokładności aproksymacji charakterystyk różnych superkondensatorów, mimo, że te

charakterystyki mają różne zakresy wartości. Przykładowo z rys. 7 wynika, że dokładność aproksymacji argumentu impedancji superkondensatora z elektrolitem  $\text{LiClO}_4$  dla napięcia offsetu  $U = 0 \text{ V}$  jest zadowalająca dla modelu opartego o bieguny i zera impedancji, czemu odpowiada mała wartość błędu  $\varepsilon$  w tab. 1. Z kolei, dokładność aproksymacji argumentu impedancji tego superkondensatora jest niezadowalająca dla modelu z ograniczoną impedancją Warburga, czemu odpowiada duża wartość błędu  $\varepsilon$  w tab. 2.

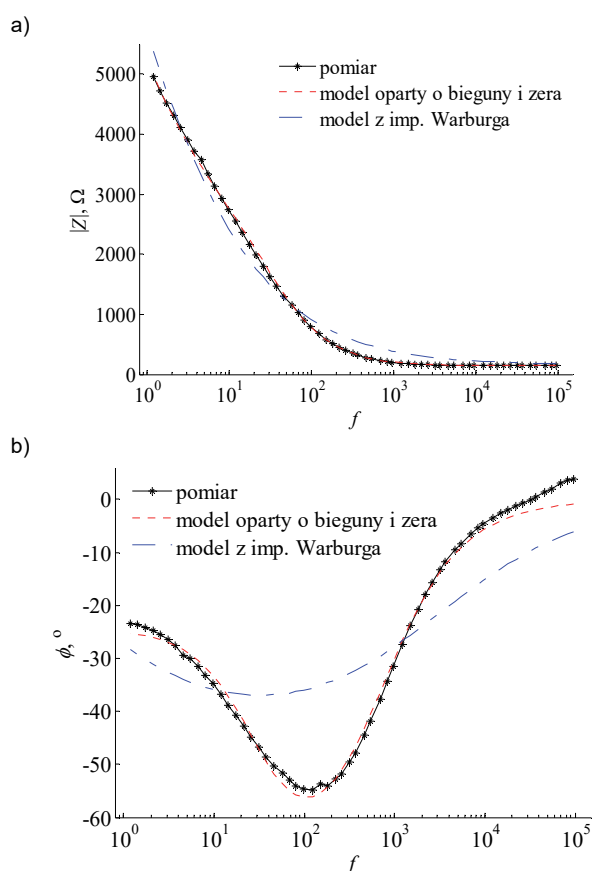


Rys.5. Pomiarowe charakterystyki częstotliwościowe: modułu (a) i argumentu (b) impedancji badanych superkondensatorów dla napięcia offsetu  $U = 0 \text{ V}$

- Dla wszystkich badanych modeli dokładność aproksymacji jest lepsza dla modułu impedancji, niż dla argumentu impedancji.
- W przypadku wszystkich badanych superkondensatorów najlepszą dokładność aproksymacji charakterystyk uzyskano dla modelu z zerami i biegunami impedancji. Dla modelu z ograniczoną impedancją Warburga udało się uzyskać zadowalającą dokładność aproksymacji tylko dla superkondensatora z solą  $\text{NBu}_4\text{ClO}_4$ .
- Charakterystyki impedancji badanych superkondensatorów różnią się w zależności od wartości napięcia offsetu  $U$ . Szczególnie charakterystyki dla  $U = 0,8 \text{ V}$  różnią się znacząco od charakterystyk dla pozostałych wartości offsetu. Można to zauważyć w tab. 1 i 2, porównując wyniki estymacji parametrów modeli, oraz przykładowo na rys. 6.
- Dla wszystkich przypadków otrzymano bardzo dużą wartość parametru  $B$  modelu z ograniczoną impedancją Warburga. Dlatego we wzorze (3) wartość funkcji  $\coth$  jest zawsze bliska 1 i model ten można sprowadzić do modelu z impedancją Warburga (2), przy czym wartości pozostałych parametrów nie ulegną zmianie. W badaniach estymowano także parametry modelu (2) i otrzymano wartości jego parametrów bardzo zbliżone do wartości parametrów modelu (3).



Rys.6. Pomiarowe charakterystyki częstotliwościowe modułu (a) i argumentu (b) impedancji superkondensatora z elektrolitem zawierającym sól  $\text{NBu}_4\text{CF}_3\text{SO}_3$  dla badanych wartości napięcia  $U$



Rys.7. Pomiarowe i aproksymujące charakterystyki częstotliwościowe: modułu (a) i argumentu (b) impedancji superkondensatora z elektrolitem zawierającym sól  $\text{LiClO}_4$  dla napięcia  $U = 0 \text{ V}$

– Parametr  $k$  w modelu opartym o bieguny i zera impedancji ułamkowego rzędu związany jest z odwrotnością pojemności superkondensatora. Na podstawie wyników z tab. 1 można zauważyć zależność pomiędzy wzrostem napięcia offsetu  $U$ , a zmniejszeniem pojemności  $C$  oraz zwiększeniem szeregowej rezystancji wewnętrznej  $R_C$ , co zaobserwowano w przypadku wszystkich badanych superkondensatorów, niezależnie od elektrolitu. Przy czym błąd aproksymacji nie uległ znaczącemu zwiększeniu. Może to oznaczać, że przy badaniach impedancji zadawanie zbyt dużej wartości składowej stałej napięcia  $U$  na superkondensator, negatywnie wpłynie na wartości jego parametrów pracy.

– W przypadku modelu z ograniczoną impedancją Warburga nie zaobserwowano podobnej zależności jak w przypadku modelu opartego o bieguny i zera impedancji ułamkowego rzędu, dlatego należałoby wykonać więcej pomiarów i badań porównawczych, aby zweryfikować hipotezę o takiej zależności.

– Na podstawie wyników estymacji parametrów modelu opartego o bieguny i zera impedancji ułamkowego rzędu, można stwierdzić, że najlepszymi właściwościami elektrycznymi (największą pojemnością będącą odwrotnością parametru  $k$  oraz najmniejszą rezystancją wewnętrzną  $R_C$ ) wykazuje się superkondensator wypełniony elektrolitem  $\text{NBu}_4\text{ClO}_4$  (nadchloran tetrabutylamonu).

**Autorzy:** mgr inż. Michał Gocki, E-mail: [michal.gocki@polsl.pl](mailto:michal.gocki@polsl.pl), Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice, dr inż. Agnieszka Jakubowska-Ciszek, E-mail: [agnieszka.jakubowska-ciszek@polsl.pl](mailto:agnieszka.jakubowska-ciszek@polsl.pl), dr inż. Piotr Pruski, E-mail: [piotr.pruski@polsl.pl](mailto:piotr.pruski@polsl.pl), Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice.

#### LITERATURA

- [1] Geng Z., Mannerhagen F., Thiringer T., Characterization of lithium ion supercapacitors, *IEEE, EPE'20 ECCE Europe*, 2020, ISBN: 978-9-0758-1536-8
- [2] Pullanchiyodan A., Manjakkal L., Dahiya R., Metal coated fabric based asymmetric supercapacitor for wearable applications, *IEEE Sensors Journal*, No. 21(23), (2021) 26208-26214, doi: 10.1109/JSEN.2021.3058894
- [3] Bogusz W., Krok F., Elektrolity stałe, właściwości elektryczne i sposoby ich pomiaru, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995
- [4] Gocki M., Badania nad zastosowaniem wybranych polimerów przewodzących do magazynowania energii elektrycznej, praca magisterska, Katedra Fizykochemii i Technologii Polimerów Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej, 2021
- [5] Woźniak P., Dualny system zasobników energii w aucie hybrydowym: optymalizacja systemu zarządzania energią oraz analiza wpływu typu zasobnika na osiągi pojazdu, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4 (2022), 113-118, doi:10.15199/48.2022.04.24
- [6] Plebankiewicz I., Przybył W., Solarny Magazyn Energii – rozwiązanie oparte na komercyjnych krzemowych ogniwach słonecznych i superkondensatorach, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1 (2022), 139-142, doi:10.15199/48.2022.01.28
- [7] Rogowski S., Sibiński M., Garlikowski K., Zastosowanie superkondensatorów w instalacjach fotowoltaicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 12 (2021), 173-178, doi:10.15199/48.2021.12.36
- [8] Krajewska A., Opracowanie sensorów elektrochemicznych do oznaczania zawartości akrylamidu i kwasu akrylowego w produktach żywnościowych, rozprawa doktorska, Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska, 2009
- [9] Geiger W. E., Barriere F., Organometallic Electrochemistry Based on Electrolytes Containing Weakly-Coordinating Fluoroarylboration Anions, *Accounts of Chemical Research*, tom 43, 2010
- [10] Lisowska-Oleksiak A., Nowak A. P., Wilamowska M., Superkondensatory elektrochemiczne jako urządzenia do magazynowania energii, *Acta Energetica*, R. 2, nr 3 (2010), 71-79
- [11] Kozdra S., Opaliński I., Leś K., Chauveau J., Modyfikacja mechanochemiczna kompozytu z polifluorku winylidenu jako składników elektrolitów akumulatorów litowo-jonowych, *Inżynieria i aparatura chemiczna*, nr 6, 2016, 233-236
- [12] Gocki M., Nowak A.J., Analiza charakterystyki polimerów elektroprzewodzących metodą Elektrochemicznej Spektroskopii Impedancyjnej, *Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa TalentDetector2022\_Winter*, Seria wydawnicza: Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska, s. 231-238, Gliwice, 2022
- [13] Buller S., Karden E., Kok D., De Doncker R.W., Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38 (6), 2002, 1622-1626
- [14] Freeborn T.J., Elwakil A.S.: Measurement of Supercapacitor Fractional-Order Parameters from Voltage-Excited Step Response, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in CAS*, Vol. 3, 2013, 367-376
- [15] Martin R., Quintana J.J., Ramos A., Nuez I., Modeling electrochemical double layer capacitor, from classical to fractional impedance, *The 14th Mediterranean Electrotechnical Conf.*, Ajaccio, 2008, 61-66
- [16] Martin R., Quintana J.J., Ramos A., Nuez I., Fractional equivalent impedance of electrochemical double layer capacitors combinations, *Journal European des Systemes Automatises*, RS-JESA, Vol. 42, 2008, 923-928
- [17] Semary M.S., Fouda M. E., Hassan H.N., Radwan A. G., Realization of fractional-order capacitor based on passive symmetric network, *Journal of Advanced Reseach*, Vol. 18 (2019), 147-159
- [18] Martin R., Quintana J.J., Ramos A., Nuez I., Modeling electrochemical double layer capacitor, from classical to fractional impedance, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 3 (2008), 61-66, doi: 10.1109/MELCON.2008.4618411
- [19] Hidalgo-Reyes J.I., Gomez F., Escobar Jimenez R.F., et al., Determination of supercapacitor parameters based on fractional differential equations, *International Journal of Circuit Theory and Application*, Vol. 47, Is. 8 (2019), 1225-1253
- [20] Jakubowska-Ciszek A., Walczak J., Frequency method for determining the equivalent parameters of fractional-order elements  $L_\beta C_\alpha$ , *Conf. on Non-Integer Order Calculus and Its Applications RRNR 2018, Advances in Non-Integer Order Calculus and Its Applications*, Springer Nature (2020), 250-267, doi: 10.1007/978-3-030-17344-9\_19
- [21] Poli R., Kennedy J., Blackwell T., Particle swarm optimization. An overview., *Springer, Swarm Intell*, vol. 1 (2007), 33-57, doi: 10.1007/s11721-007-0002-0
- [22] Fernandes C., Fachada N., Laredo J., Merelo J., Particle Swarm and Population Structure. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation, *Conference Companion CECCO*, July 2018, 85–86, doi: 10.1145/3205651.3205779