

doi:10.15199/48.2024.12.31

Spektroskopia impedancyjna wybranych elektrochemicznych źródeł napięcia

Streszczenie. Elektrochemiczne źródła napięcia stały się powszechnym elementem życia codziennego. Dla zachowania ich wysokiej sprawności i bezawaryjnej pracy, bardzo ważne jest monitorowanie bieżącego stanu źródeł. Metoda spektroskopii impedancyjnej umożliwia między innymi oszacowanie rezystancji wewnętrznej badanego źródła. W pracy podjęto próbę przeglądu możliwości oraz ograniczeń stosowania spektroskopii impedancyjnej w badaniach wybranych źródeł elektrochemicznych.

Abstract. Electrochemical voltage sources have become a common part of everyday life. In order to maintain their high efficiency and trouble-free operation, it is very important to monitor the current state of the sources. The impedance spectroscopy method makes it possible, among others, to estimate the internal resistance of the source under investigation. In the paper an attempt was made to review the possibilities and limitations of using impedance spectroscopy in the study of selected electrochemical sources. (**Impedance spectroscopy study of electrochemical voltage sources**).

Słowa kluczowe: spektroskopia impedancyjna, elektrochemiczne źródła napięcia, ocena stanu źródeł, system pomiarowy.

Keywords: impedance spectroscopy, electrochemical voltage sources, source condition assessment, measurement system.

Wstęp

Elektrochemiczne źródła napięcia, zwane także ogniwami elektrochemicznymi lub galwanicznymi, stanowią niezwykle ważny element każdego przenośnego urządzenia elektrycznego. Bez ich rozwoju nie byłoby możliwe opracowywanie coraz bardziej: wydajnych, skomplikowanych, ale również zminiaturyzowanych systemów, do których działania niezbędna jest energia elektryczna. Nowoczesny sprzęt elektroniczny powszechnego użytku, taki jak telefony komórkowe, komputery przenośne, jak i elektryczne samochody osobowe, a nawet elektryczne wersje ciężarówek – są zasilane różnego rodzaju elektrochemicznymi ogniwami.

W ogniwach elektrochemicznych zachodzą reakcje chemiczne, polegające na przyłączaniu i/lub oddawaniu elektronów. Skutkują one zamianą skumulowanej w nich energii chemicznej na elektryczną [1]. W ogólności ogniwa elektrochemiczne dzielone są na trzy główne grupy [2]:

- Ogniwa pierwotne, które posiadają zmagazynowaną energię i umożliwiają jedynie jej pobieranie. Zachodzące w nich reakcje chemiczne są nieodwracalne – nie ma możliwości uzupełnienia energii przy użyciu zewnętrznego źródła prądu. Innymi słowy, po wyczerpaniu energii nie jest możliwe ich dalsze wykorzystywanie.
- Ogniwa odwracalne (inaczej ładowalne), w których zachodzące procesy są odwracalne, a zatem jest możliwe ich naładowanie po wyczerpaniu zgromadzonej w nich energii. Ładowanie takich ogniw odbywa się poprzez podłączenie zewnętrznego źródła prądowego, które wywołuje szereg zmian elektrochemicznych. Dostarczana energia elektryczna konwertowana jest wówczas na energię chemiczną.
- Ogniwa paliwowe, w których energia elektryczna generowana jest na skutek dostarczania paliwa (np. wodoru w tzw. ogniwach wodorowych) do anody, a tlenu, jako formy utleniacza, do katody. Ogniwa paliwowe wyróżniają się na tle ogniw galwanicznych tym, że energia nie musi być w nich wcześniej gromadzona – może być wytwarzana na bieżąco, pod warunkiem dostarczania paliwa.

Pomimo różnic w charakterze i mechanizmie działania ogniw elektrochemicznych, do oceny ich stanu możliwe jest użycie tych samych podstawowych parametrów, takich jak [1]:

- Siła elektromotoryczna ogniwa (SEM) – określająca wydajność i skuteczność wytwarzania energii elektrycznej przez źródło, wyrażana w woltach. Możliwa do przybliżonego oszacowania na podstawie pomiaru napięcia wyjściowego nieobciążonego źródła woltomierzem o wystarczająco dużej rezystancji wejściowej.
- Rezystancja wewnętrzna – wyrażany w omach opór wewnętrzny źródła, jaki musi pokonać energia chemiczna, aby dotrzeć do zacisków ogniwa. Obniża skuteczność pracy źródła napięcia poprzez tworzenie spadku napięcia, który jest iloczynem prądu płynącego ze źródła oraz jego rezystancji wewnętrznej.
- Pojemność elektryczna ogniwa – wyrażana w amperogodzinach ilość energii elektrycznej zgromadzona w ogniwie.
- Współczynnik samorozładowania – miara spadku ilości dostępnej energii w funkcji czasu, przy braku obciążenia źródła.

Warto w tym miejscu nadmienić, że używane w języku potocznym określenia „bateria” i „akumulator” odnoszą się często do zespołu ogniw (tworzących pakiet), połączonych najczęściej szeregowo, w celu zwiększenia wyjściowego, wypadkowego napięcia. Pojęcie „bateria” częściej stosowane jest do ogniw pierwotnych, zaś „akumulator” do ogniw odwracalnych.

Badanie stanu źródeł jest niezwykle ważne z wielu powodów, wśród których należy wymienić możliwość uniknięcia nagłej przerwy w działaniu urządzenia spowodowanej zaistnieniem niespodziewanej potrzeby wymiany/ładowania zasilających go ogniw. Wiedza o aktualnym stanie źródła napięcia umożliwia wcześniejsze zaplanowanie takich zabiegów oraz często zapobieżenie nieodwracalnym uszkodzeniom ogniw w wyniku ich zbyt głębokiego rozładowania.

Do szacowania stanu elektrochemicznych źródeł stosuje się powszechnie:

- Pomiar napięcia i prądu: Mierzone jest napięcie w obwodzie otwartym (ang. *open circuit potential*, OCV), które umożliwia ocenę stanu naładowania (ang. *state of charge*, SoC), a także napięcie pod obciążeniem. Zlicza się także gromadzoną i oddawaną energię w celu określenia tzw. „stanu zdrowia” ogniwa (ang. *state of health*, SoH).

- Elektrochemiczną spektroskopię impedancyjną (ang. *electrochemical impedance spectroscopy*, EIS): Pomiar impedancji ogniw w możliwie szerokim zakresie częstotliwości umożliwia między innymi oszacowanie ich rezystancji wewnętrznej i analizę procesów zachodzących wewnątrz źródła.
- Testy cykliczne.
- Analizę termiczną i termograficzną.
- Metody łączone, stosowane w systemach działających online, zwanych BMS (ang. *battery management system*).

Niniejsza praca miała na celu określenie możliwości, ale i ograniczeń związanych z zastosowaniem spektroskopii impedancyjnej do oceny bieżącego stanu elektrochemicznych źródeł napięcia. Przeprowadzone badania miały charakter wstępnych i pozwoliły także nakreślić wymagania stawiane systemowi pomiarowemu, a także zestawić je z możliwościami dostępnego w laboratorium Instytutu Metrologii, Elektroniki i Informatyki Uniwersytetu Zielonogórskiego systemu do elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej. System ten był dotychczas z powodzeniem wykorzystywany między innymi w badaniach właściwości olejów napędowych [3,4], wykrywania śladowych zawartości wody w oleju mineralnym [5] oraz badaniu stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego piwa niepasteryzowanego [6]. Warto jednak zaznaczyć, że mierzone dotąd wartości modułów impedancji mieściły się w zakresie od pojedynczych kiloomów do kilku gigaomów, a zatem były wiele razy większe niż te, jakich należy się spodziewać w przypadku elektrochemicznych źródeł napięcia.

Spektroskopia impedancyjna elektrochemicznych źródeł napięcia

Spektroskopia impedancyjna (ang. *impedance spectroscopy*, IS) jest bardzo szeroko stosowaną metodą badawczą. Swoją popularność zawdzięcza między innymi stosunkowo prostej zasadzie działania – badanie polega na pomiarze impedancji próbki w możliwie najszerszym paśmie częstotliwości. Sygnałem wymuszającym elektryczną odpowiedź badanej materii może być zarówno napięcie, jak i prąd o określonej, znanej wartości, przy czym wartość ta powinna być na tyle niewielka, żeby nie wywoływać dodatkowych, niepożądanych zjawisk. Zmierzona impedancja próbki służy do oceny jej właściwości statycznych, jak i ewentualnych zjawisk w niej zachodzących. Ocena taka dokonywana jest za pomocą obliczonej na podstawie zmierzonej impedancji względnej przenikalności elektrycznej próbki, przeważnie dla częstotliwości pomiarowych powyżej 1 MHz. W takich przypadkach metoda IS nazywana bywa spektroskopią dielektryczną lub dielektryczną spektroskopią impedancyjną. Alternatywnym podejściem jest posiłkowanie się elektrycznym obwodem zastępczym badanej materii, które stosowane jest przy pomiarach impedancji wykonywanych przy niższych częstotliwościach. Obwód taki jest analogiem badanej materii i/lub zjawisk w niej zachodzących, zaś parametry obwodu wyznaczane są na podstawie zmierzonych wartości impedancji. Takie podejście do zebranych wyników pomiarów impedancji nazywane jest elektrochemiczną spektroskopią impedancyjną (EIS).

Spektroskopia impedancyjna zalicza się do badań nieniszczących, co jest jej dodatkową, bardzo ważną zaletą. Jednak zapewnienie pełnego braku wpływu przeprowadzonego badania na próbkę nie jest zadaniem trywialnym. Dla przykładu, czas trwania pomiaru jest niezwykle istotny w badaniach elektrochemicznych źródeł metodą IS. Pomimo stosowania bardzo małej amplitudy

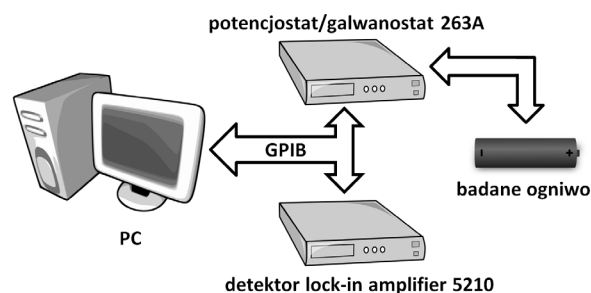
sygnału pomiarowego, trudno jest uniemożliwić przyjęcie przez badane źródło energii w trakcie pomiarów. Stąd im dłużej trwa pomiar, tym więcej energii źródło zgromadzi. Dodatkowym wyzwaniem staje się wybór odpowiedniego elektrycznego obwodu zastępczego, który miałby odpowiednio imitować elektrochemiczne właściwości źródła [7]. Wspomniane trudności nie zniechęcają jednak zespołów badawczych, które wciąż prowadzą prace nad możliwością stosowania IS w badaniach ogniw. Świadczą o tym nowe, wciąż pojawiające się pozycje literaturowe [8-12]. Producenci systemów pomiarowych również stale poszerzają i dostosowują swoją ofertę do coraz trudniejszych warunków pomiarowych, jakie tworzą współcześnie produkowane ogniwa. W zależności od typu i rozmiaru badanego ogniwa, w wielu przypadkach użyta aparatura pomiarowa musi mieć możliwość zmierzenia bardzo małych wartości modułu impedancji, rzędu 100 $\mu\Omega$ [13].

Materiał do badań

Materiał do badań stanowiły akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion) typu 18650 o napięciu znamionowym 3,7 V oraz akumulatory nikielowo-metalowo-wodorkowe (Ni-MH) typu AA o napięciu znamionowym 1,2 V. Badano ogniwa różnych producentów i o różnym stopniu rozładowania. Oba rodzaje źródeł mają różne właściwości – po ogniwach Li-Ion (w ogólności) należy się spodziewać większych pojemności i możliwego do uzyskania prądu wyjściowego, niż w przypadku ogniw Ni-MH. Akumulatory podłączano do systemu pomiarowego przy użyciu specjalnie do tego celu zaprojektowanych koszyków, wytworzonych w technologii druku 3D. Umożliwiały one kontakt wyprowadzeń źródeł z przewodami pomiarowymi poprzez osadzone w koszykach miedziane blaszki.

System pomiarowy

Do badań ukazanych w pracy użyto komercyjnego, laboratoryjnego systemu do elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej firmy Princeton Applied Research. W skład systemu wchodził potencjostat/galwanostat 263A, detektor fazoczuły typu lock-in amplifier 5210 oraz oprogramowanie PowerSINE pracujące na komputerze klasy PC. Uproszczony schemat użytego systemu pomiarowego ukazano na rysunku 1.



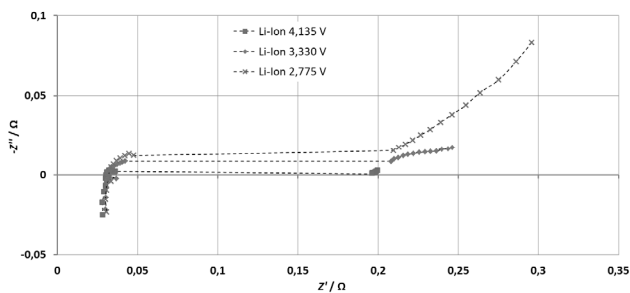
Rys. 1. Schemat systemu pomiarowego użytego do badań

Impedancję źródeł badano dla 30 nastaw częstotliwości w zakresie 0,1 Hz – 5 kHz w odstępach logarytmicznych, przy sinusoidalnym napięciu pomiarowym o wartości skutecznej 15 mV. Pomiaru rozpoczynały się od najwyższej częstotliwości wybranego zakresu i kończyły na najniższej, co jest standardem w tego typu badaniach. Przed każdym badaniem przeprowadzana była autokalibracja systemu pomiarowego, zgodnie z zaleceniami producenta. Dodatkowo każdy pomiar impedancji (dla zadanej częstotliwości pomiarowej) wykonywany był trzykrotnie w celu uśrednienia uzyskanych wyników – uśrednianie to jest

możliwe do ustawienia bezpośrednio w aplikacji PowerSINE. Jedno badanie (rozumiane jako seria pomiarów) impedancji źródeł przy trzydziestu wspomnianych nastawach częstotliwości trwało niespełna 15 minut. Na początku każdej serii pomiarowej mierzony był tzw. potencjał stacjonarny celki, który w tym przypadku był równy wartości OCV źródeł. Następnie, w trakcie wykonywania pomiarów impedancji, był on podtrzymywany przez system pomiarowy jako składowa stała nałożona na napięciowy sygnał pomiarowy. Temperatura otoczenia, szczególnie istotna w badaniach impedancji, była w trakcie badań stale monitorowana i utrzymywana na poziomie $23 \pm 0,5$ °C.

Wyniki pomiarów i dyskusja

W trakcie wykonywania wstępnych pomiarów elektrochemicznych źródeł napięcia napotkano problemy, które nie występowały w trakcie wcześniejszych prowadzonych badań z wykorzystaniem wspomnianego systemu pomiarowego. Dotąd badano o wiele większe moduły impedancji, które system był w stanie mierzyć poprawnie. Jednak w przypadku bardzo małych wartości jakimi charakteryzują się ogniwa elektrochemiczne, każdy aspekt elektrycznego połączenia badanego źródła z systemem pomiarowym zaczyna odgrywać bardzo dużą rolę. Problem ten został opisany między innymi w tzw. „białej księdze” (ang. *white paper*) firmy Keysight Technologies [13], która także wskazuje powtarzalność geometrii połączeń jako kluczowy aspekt badań źródeł elektrochemicznych metodą IS. Dodatkowo jest w niej wspomniana konieczność uwzględniania poprawek do wykonanych pomiarów, których wartości możliwe są do poznania dopiero po przebadaniu odpowiednich wzorców impedancji. Napotkane przez autorów problemy znajdują zatem potwierdzenie w trudnościach formułowanych przez jednego z bardziej znaczących producentów systemów pomiarowych na świecie. W przedstawianym przypadku oraz wskazanym systemie pomiarowym dotyczyły one braku spójności uzyskanych wyników pomiarów wykonanych dla wyższych (≥ 10 Hz) i niższych częstotliwości (< 10 Hz), kiedy używany (lub nie) jest detektor fazoczuły typu lock-in amplifier. Na rysunku 2 przedstawiono wybrane wykresy Nyquista badanych ogniw litowo-jonowych o różnym stopniu naładowania, bez uwzględnienia poprawek.

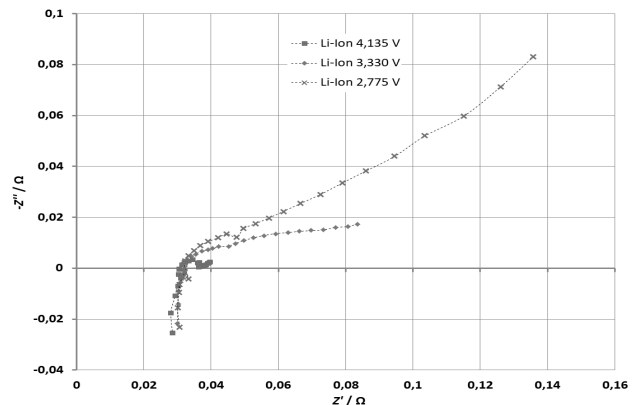


Rys.2. Wyniki pomiarów impedancji wybranych ogniw Li-Ion przed naniesieniem poprawek

Na wykresie widoczne są charakterystyczne kształty przyjmowane przez charakterystyki impedancyjne źródeł napięcia, które różnią się od siebie znacząco w funkcji stopnia naładowania źródła. Zauważalne jest także stosunkowo duże przesunięcie części wykresów w dziedzinie części rzeczywistej impedancji, które następowało w momencie zmiany częstotliwości pomiarowej na wartość poniżej 10 Hz.

W celu wyeliminowania uwidocznionych niespójności wprowadzono stosowne poprawki do uzyskanych wyników pomiarów. Wartości poprawek były możliwe do poznania poprzez przebadanie systemem pomiarowym rezystora wzorcowego o rezystancji 219,232 mΩ. Proces szacowania i nakładania poprawek okazał się zagadnieniem, które stanowi zdaniem autorów ciekawy temat na osobną pracę i z tego względu nie został w niniejszym manuskrypcie przedstawiony.

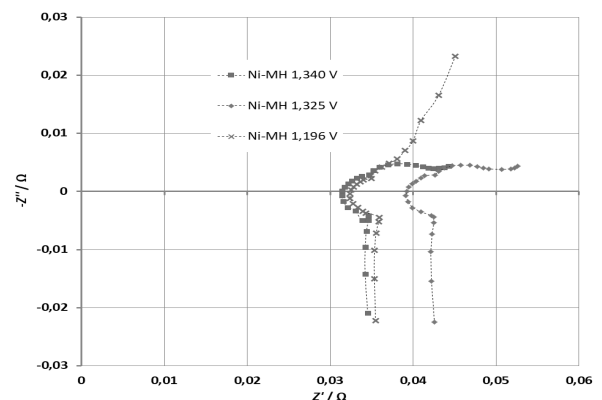
Uwzględnienie poprawek w wynikach pomiaru impedancji źródeł umożliwiło uzyskanie wykresów Nyquista zdecydowanie bardziej zbliżonych do tych, które spotkać można w zbliżonej tematycznie literaturze. Impedancja badanego zestawu ogniw z rysunku 2, ale po uwzględnieniu poprawek, została przedstawiona na rysunku 3.



Rys.3. Wyniki pomiarów impedancji wybranych ogniw Li-Ion po naniesieniu poprawek

Warto zauważyć, że przedstawione na rysunkach 2 i 3 charakterystyki dotyczyły źródeł o bardzo różnym stopniu rozładowania – skrajne wartości OCV, tj. 4,135 V i 2,775 V odpowiadają ogniwom Li-Ion o nominalnym napięciu 3,7 V odpowiednio w pełni naładowanemu oraz w pełni rozładowanemu. Widoczne znaczne różnice w przebiegach charakterystyk znajdują także potwierdzenie w modułach impedancji źródeł – ogniwo w pełni rozładowane cechowało się modułem impedancji o czterokrotnie większej wartości (0,16 Ω) niż ogniwo w pełni naładowane (0,04 Ω) przy częstotliwości 0,1 Hz.

Na rysunku 4 ukazane zostały wartości impedancji wybranych ogniw Ni-MH.

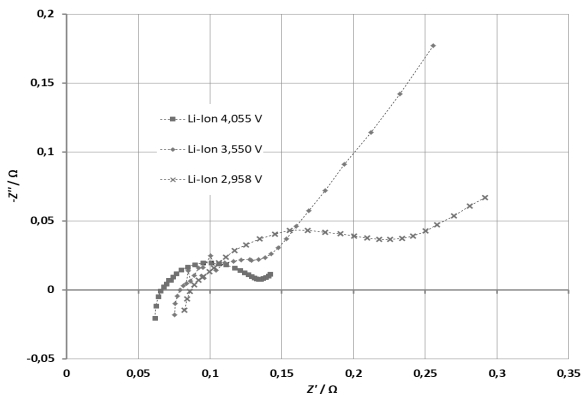


Rys.4. Wyniki pomiarów impedancji wybranych ogniw Ni-MH

W tym przypadku stan naładowania dwóch z ukazanych ogniw był niemal identyczny (wartości OCV 1,340 V oraz 1,325 V). Ich charakterystyki, mimo bardzo zbliżonego

kształtu, są przesunięte względem osi części rzeczywistej impedancji. Uwidacznia to skutek braku powtarzalności geometrii połączeń ogniw z systemem pomiarowym, to jest pojawienia się nadmiarowej rezystancji szeregowej, niezwiązanej z badanym ogniwem.

Na rysunku 5 ukazano impedancję zestawu ogniw Li-Ion innego producenta, niż na rysunkach 2 i 3.



Rys.5. Wyniki pomiarów impedancji wybranych ogniw Li-Ion innego producenta

Charakterystyki źródeł tworzą odmienne kształty, pomimo zbliżonego stopnia rozładowania poszczególnych ogniw (4,055 V do 2,958 V w tym przypadku). Tutaj także źródło o największej zgromadzonej energii cechuje się najmniejszym modulem impedancji, niemniej rozróżnienie ogniwa niemal całkiem rozładowanego od tego o średnim stopniu rozładowania (jak mogłoby się wydawać po wartości napięcia OCV) nie jest już tak oczywiste, jak na poprzednich rysunkach. Tutaj jednak warto zwrócić uwagę na to, że wartość 3,550 V znajduje się już poniżej wartości nominalnej źródła, zatem również jest ono już znacznie wyczerpane.

Ważnym, niepożądanym zjawiskiem zaobserwowanym w trakcie badań było (nieukazane na wykresach) ładowanie badanych ogniw w trakcie trwania pomiarów impedancji. Powtórzenie serii pomiarów dla tego samego ogniwa skutkowało nieco odmiennymi charakterystykami oraz nieznacznie powiększoną wartością napięcia OCV (rzędu kilku miliwoltów). Przyczyny ładowania należy upatrywać w samym fakcie podtrzymywania w trakcie badań zmierzonego (przed badaniem) napięcia stacjonarnego ogniwa. Okazuje się zatem, że czas trwania pomiaru wynoszący niespełna 15 minut jest zbyt długi, aby pomiary zupełnie nie wpłynęły na badane ogniwo. Rekomendowane byłoby więc znaczące skrócenie czasu trwania badania w przypadku konieczności wykonania kolejnych serii pomiarów tego samego źródła zaraz po sobie. Wspomniany stopień naładowania źródeł po badaniu był jednak na tyle niewielki, że pomiary ogniw o różnym stopniu rozładowania zdołały za każdym razem ukazać znaczne różnice w ich impedancjach.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wskazanym systemem pomiarowym do EIS zdecydowanie potwierdzają możliwość wykonywania pomiarów elektrochemicznych źródeł napięcia. Jednak ze względu na specyfikę źródeł, zwłaszcza o większej pojemności elektrycznej, uwidaczniają się pewne trudności w uzyskaniu zadowalających i powtarzalnych rezultatów. Podkreśla to szczególnie istotność wzorców, dzięki którym możliwe jest

uwzględnianie stosownych poprawek w wynikach pomiarów, także tych uzyskanych specjalistyczną aparaturą do badań ogniw. Równie ważnym aspektem prowadzenia badań źródeł napięcia metodą IS jest zapewnienie w pełni powtarzalnych warunków pomiaru ogniw w kontekście geometrii połączeń elektrycznych. Nawet najmniejsze różnice w polach powierzchni styku wyprowadzeń ogniw z systemem pomiarowym oraz w odległościach do przewodów pomiarowych muszą być całkowicie wyeliminowane, aby zapewnić pozbawione przekłamań wyniki pomiarów. Dopiero po uwzględnieniu wszystkich wspomnianych rekomendacji możliwa będzie analiza właściwości źródeł z wykorzystaniem ich elektrycznego obwodu zastępczego.

Autorzy: dr inż. Łukasz Macioszek, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: l.macioszek@imei.uz.zgora.pl; prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: r.rybski@imei.uz.zgora.pl; mgr inż. Łukasz Hawrylczak, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: 98802@stud.uz.zgora.pl.

LITERATURA

- [1] Buchmann I., Batteries in a Portable World, *Cadex Electronics Inc.* (2000)
- [2] Czerwiński A., Akumulatory, baterie, ogniwa. WKŁ, Warszawa (2005)
- [3] Macioszek Ł., Temperature influence on parameters of summer diesel fuel measured with the use of impedance spectroscopy, *Przegląd Elektrotechniczny* (2016), nr 12, 213-216
- [4] Macioszek Ł., Sobczyński D., Moisture Content Assessment of Commercially Available Diesel Fuel Using Impedance Spectroscopy, *Energies*, 17 (2024), iss. 8, 1903
- [5] Macioszek Ł., Matuszak M., Wagner P., Włodarczak S., Zastosowanie metody spektroskopii impedancyjnej do szacowania bardzo małych zawartości wody w oleju mineralnym typu 20-70, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 12, 60-63
- [6] Macioszek Ł., Andrzejczak-Grządka S., Urbaniak J., Dembińska K., Zmodyfikowana metoda impedymetryczna w ocenie zanieczyszczeń mikrobiologicznych piwa niepasteryzowanego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 11, 147-150
- [7] Gaberšček M., Impedance spectroscopy of battery cells: Theory versus experiment, *Curr. Opin. Electrochem.*, 32 (2022), 100917
- [8] Middlemiss L. A., Rennie A. J. R., Sayers R., West A. R., Characterisation of batteries by electrochemical impedance spectroscopy, *Energy Reports*, 6 (2020), sup. 5, 232-241
- [9] Zhang M. i in., Electrochemical Impedance Spectroscopy: A New Chapter in the Fast and Accurate Estimation of the State of Health for Lithium-Ion Batteries, *Energies*, 16 (2023), iss. 4, 1599
- [10] Stolz L., Gaberšček M., Winter M., Kasnatscheew J., Different Efforts but Similar Insights in Battery R&D: Electrochemical Impedance Spectroscopy vs Galvanostatic (Constant Current) Technique, *Chem. Mater.*, 34 (2022), nr 23, 10272-10278
- [11] Qu D., Ji W., Qu H., Probing process kinetics in batteries with electrochemical impedance spectroscopy, *Commun. Mater.*, 3 (2022), nr 61
- [12] Hu W., Peng Y., Wei Y., Yang Y., Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Degradation and Aging Research of Lithium-Ion Batteries, *J. Phys. Chem. C*, 127 (2023), nr 9, 4465-4495
- [13] Kasper M., Kienberger F., Popov A., Advanced Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for Battery Testing, *Keysight Technologies* (2023)