

Identyfikacja parametrów schematu zastępczego ogniw litowo-jonowych

Streszczenie. W artykule opisano zagadnienie identyfikacji parametrów modelu ogniw litowo-jonowych typu LFP. Przedstawiono model obwodowy 2 rzędu, służący do analizy sygnałów elektrycznych na zaciskach ogniwa. Przeprowadzono laboratoryjne badania eksperymentalne, które wykorzystano do identyfikacji. W celu uzyskania dopasowania modelu do przeprowadzonych pomiarów, opracowano autorską aplikację komputerową, która z wykorzystaniem algorytmu genetycznego znajduje optymalne rozwiązania w postaci zbioru parametrów elementów schematu zastępczego w funkcji stanu naładowania ogniwa. Uzyskane wyniki identyfikacji zwizualizowano oraz porównano do wyników uzyskanych podczas pomiarów.

Abstract. This paper presents the problem of identifying the parameters of the LFP-type lithium-ion cell model. A 2nd order circuit model is presented for the analysis of electrical signals at the terminals of the cell. Laboratory experimental tests were carried out and used for identification. In order to obtain a match between the model and the measurements, a proprietary computer application was developed, which, using a genetic algorithm, finds optimal solutions in the form of a set of parameters of the elements of the equivalent scheme as a function of the cell's state of charge. The identification results obtained were then visualized and compared to the measurements. (**Identification of equivalent circuit parameters of lithium-ion cells**).

Słowa kluczowe: ogniwa litowo-jonowe, modelowanie, identyfikacja parametrów modelu, algorytm genetyczny

Keywords: lithium-ion cells, modelling, parameters model identification, genetic algorithm

Wstęp

W ostatnich latach zauważyć można dynamiczny wzrost liczby urządzeń elektrycznych, które do zasilania wykorzystują wtórne ogniwa elektrochemiczne [1–4]. Związane jest to w dużej mierze z rozwojem technologii ogniw, w szczególności należących do grupy litowo-jonowych. Wyróżniają się one dużą gęstością mocy i energii (przekraczającą 250 Wh/kg), rosnącym napięciem (zbliżającym się do 4 V) i trwałością (rzędu kilku tysięcy cykli), a także zmniejszonym oporem wewnętrznym [1,3]. Zarówno duża ilość energii zgromadzona w niewielkiej masie, jak i mała rezystancja wewnętrzna są istotnymi zaletami akumulatorów. Dlatego w zastosowaniach mobilnych takich jak drony, samochody elektryczne, laptopy czy telefony komórkowe, od kilku lat stosuje się wyłącznie ogniwa bazujące na litie. Niestety zwiększona ilość energii wiąże się również z podwyższonym ryzykiem jej uwolnienia. Także mała rezystancja wewnętrzna potęguje konsekwencje ewentualnych zwarc. W rezultacie, podczas uszkodzeń, zwarc lub niewłaściwej eksploatacji ogniw może dojść do ich przyspieszonej degradacji, przegrzania, a nawet gwałtownych i niebezpiecznych pożarów [4].

Powodem wielu problemów podczas eksploatacji ogniw jest ich niejednorodność. Mimo starań producentów, ogniwa nie mają jednakowej pojemności ani rezystancji. Dlatego w trakcie pracy w pakiecie (baterii ogniw) nawet przy szeregowym połączeniu, ich parametry nie są jednakowe. Dotyczy to w szczególności napięcia i temperatury [1,2,5].

W praktyce rozwiązaniem problemu nierównomierności napięć i temperatur są systemy nadzorujące pracę baterii BMS (z ang. Battery Management System). Kontrolują one napięcia i temperaturę ogniw, nie dopuszczając do przekroczenia wartości zalecanych przez producentów (jak np. minimalne i maksymalne napięcie oraz temperatura). Ważnym czynnikiem jest także poprawne zaprojektowanie układów zasilania. Podczas projektowania układów zasilających, które wykorzystują akumulatory, należy dokonać analizy pracy ogniw i na tej podstawie dobrać ich liczbę, topologię połączeń oraz parametry. Do tego celu wykorzystuje się różne techniki modelowania, które najogólniej można podzielić na modele: elektrochemiczne, matematyczne oraz obwodowe (schematy zastępcze) [1,5].

Modele elektrochemiczne stosowane są głównie do analizy procesów chemicznych zachodzących wewnątrz

ogniw. Dzięki temu, że w modelach tych wykorzystuje się równania chemiczne opisujące rzeczywiste procesy zachodzące w ogniwach, wyróżniają się dużą dokładnością. Jednak ze względu na swoją złożoność i poziom szczegółowości wymagają one zaawansowanych technik identyfikacji. Dlatego rzadko wykorzystywane są w zastosowaniach elektrotechnicznych [5].

Modele matematyczne polegają na przedstawieniu wybranych sygnałów i wielkości za pomocą równań matematycznych, opisujących rozpatrywany problem na podstawie empirycznych zależności, z wykorzystaniem interpolacji czy aproksymacji, co sprawia, że często są przydatne wyłącznie w ograniczonych warunkach eksploatacyjnych [5].

Analizując obwody elektryczne zasilane z ogniw elektrochemicznych najczęściej wykorzystuje się schematy zastępcze (modele obwodowe) zawierające klasyczne elementy RLC. Z tego powodu w przedstawionym artykule do analizy pracy ogniw wykorzystano model obwodowy, który opisano w kolejnym rozdziale [1].

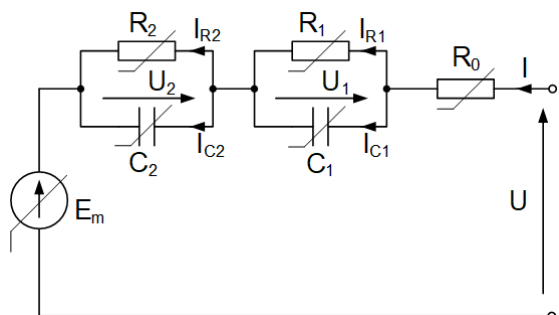
Model obwodowy baterii

Jednym z najczęściej wykorzystywanych schematów zastępczych jest model Thevenina pierwszego, drugiego lub trzeciego rzędu, rozumianego jako liczba bloków RC znajdujących się w obwodzie. Kolejne gałęzie zawierające równolegle połączone elementy RC odzwierciedlają różne grupy procesów elektrochemicznych (o różnych stałych czasowych) zachodzących w ogniwie. Ponadto model składa się z siły elektromotorycznej E_m , która odzwierciedla napięcie ogniwa, oraz rezystancji R_0 , reprezentującej opór separatora, elektrolitu, elektrod oraz połączeń. Procesy elektrochemiczne zachodzące w ogniwach charakteryzują się nieliniowością, dlatego elementy znajdujące się na schematach zastępczych również są nieliniowe [1,2,5].

W literaturze występują też modele z większą liczbą bloków RC. Są one stosowane gdy zachodzi potrzeba uwzględnienia większej ilości procesów zachodzących w ogniwie. Natomiast w przypadku modelowania ogniw w okresie wielu dni, wymagane jest uwzględnienie procesów pasożytniczych – efektów przeładowania, ubytków ładunku podczas samorozładowania itp. Można je modelować za pomocą dodatkowej gałęzi przyłączonej

równolegle do zacisków ogniwa z rezystancją o charakterze nieliniowym.

W niniejszej pracy do analizy ogniwa został wykorzystany model drugiego rzędu (z dwoma blokami RC), przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Model obwodowy 2 rzędu [1,5].

Wartości chwilowe sygnałów elektrycznych w badanym modelu wyznaczono z zależności obwodowych (układ równań (1)). Nieliniowość parametrów przestawionych na schemacie opisano w funkcji stanu naładowania, który wyznaczono z zależności (2).

$$(1) \quad \begin{cases} u = E_m + iR_0 + u_1 + u_2 \\ u_1 = i_{R1}R_1 \\ u_2 = i_{R2}R_2 \\ i_{C1} = C_1 \frac{du_1}{dt} \\ i_{C2} = C_2 \frac{du_2}{dt} \\ i = i_{C1} + i_{R1} \\ i = i_{C2} + i_{R2} \end{cases}$$

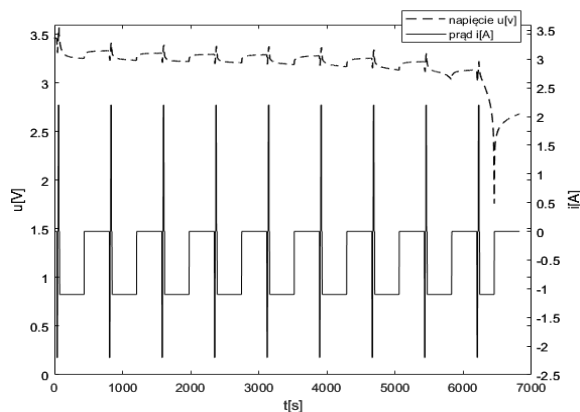
$$(2) \quad SOC = 1 - \frac{\int_0^{t_a} i dt}{C_n}$$

gdzie: C_n – pojemność ogniwa, t_a – czas analizy.

Identyfikacja parametrów modelu

W celu wyznaczenia parametrów modelu ogniwa w różnym stanie naładowania, przeprowadzono eksperyment, w którym dokonano pomiarów napięcia na zaciskach ogniwa typu LFP o pojemności 1100 mAh rozładowując je i ładując prądem stałym za pomocą systemu dedykowanego do badania ogniwo: CADEX C8000 Battery Testing System. Procedura polegała na rozładowaniu prądem 2C (-2,2 A) przez 10 s, następnie ładowaniu prądem 2C (+2,2 A) przez 10 s oraz rozładowaniu prądem 1C (-1,1 A) przez 360 s i relaksacji ogniwa przez 360 s. Cykl ten powtórzono 9 krotnie (dla SOC od 100% do 0%). Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2.

Następnie opracowano program, który wyznaczał parametry modelu przedstawionego na rysunku 1 na podstawie zarejestrowanego przebiegu prądu i napięcia w czasie. Do znalezienia optymalnego rozwiązania użyto algorytmu genetycznego z funkcją celu w postaci błędu średniokwadratowego (zależność (3)). Algorytm genetyczny skonfigurowano następująco: liczba osobników w populacji 1000, liczba pokoleń 30, metoda krzyżowania rozproszonego [6,7].



Rys. 2. Przebieg zarejestrowanego napięcia oraz prądu ogniwa.

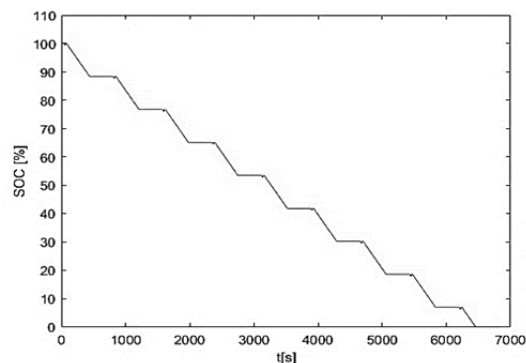
Założono, że w trakcie symulacji parametry pomiędzy badanymi punktami zmieniają się liniowo w funkcji stanu naładowania. A w celu udoskonalenia modelu zmiana parametru E_m przy niskim stanie naładowania (poniżej 20%) następuje wykładniczo. Zastosowano ograniczenia zakresu poszukiwań parametrów: $R_0 = [0, 1] \Omega$, $R_1 = [0, 1] \Omega$, $R_2 = [0, 1] \Omega$, $C_1 = [0, 3000] F$, $C_2 = [0, 6000] F$.

$$(3) \quad Err = \sum_{j=1}^N (u_p(j) - u_m(j))^2$$

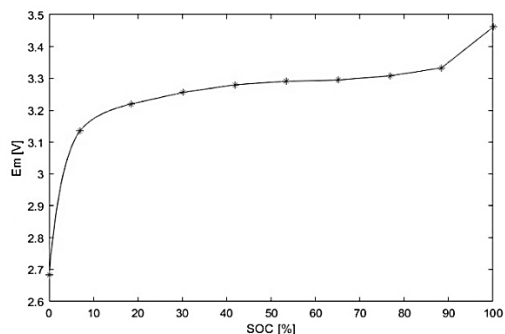
gdzie: $u_p(j)$ – wartość napięcia wyznaczona na podstawie pomiarów w j -tej próbce, $u_m(j)$ – wartość napięcia wyznaczona na podstawie modelu w j -tej próbce, N – liczba próbek (pomiarów).

W programie model baterii zaimplementowano z wykorzystaniem numerycznej postaci zależności elektrycznych opisujących stany nieustalone, które zaprezentowano w układzie równań (1). Porównywanie przebiegów przeprowadzono z krokiem 0,1 s.

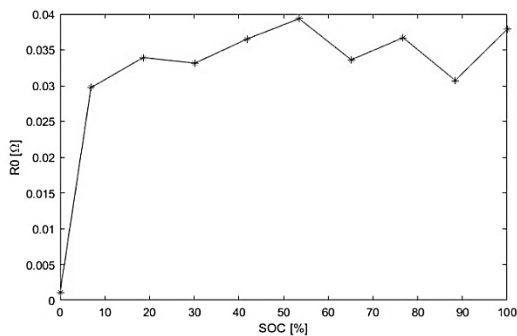
Na rysunku 3 przedstawiono przebieg stanu naładowania ogniwa podczas badań eksperymentalnych.



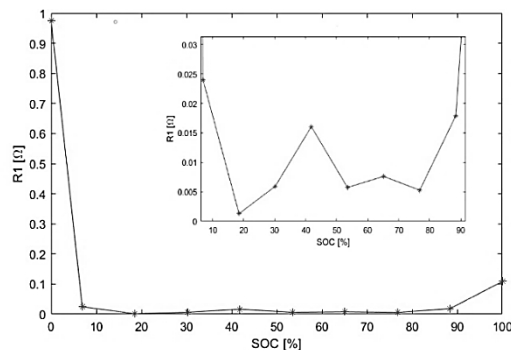
Rys. 3. Stan naładowania ogniwa w funkcji czasu



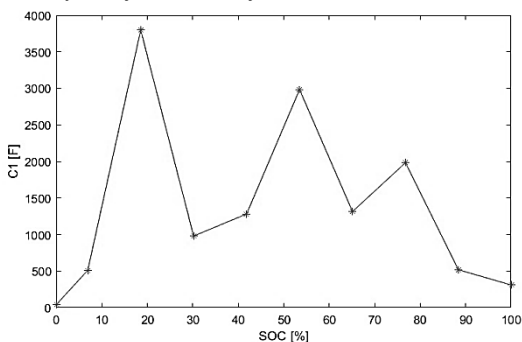
Rys. 4. Źródło napięcia E_m w funkcji stanu naładowania.



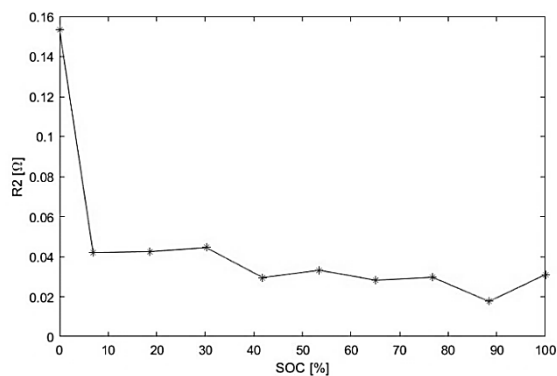
Rys. 5. Rezystancja R_0 w funkcji stanu naładowania.



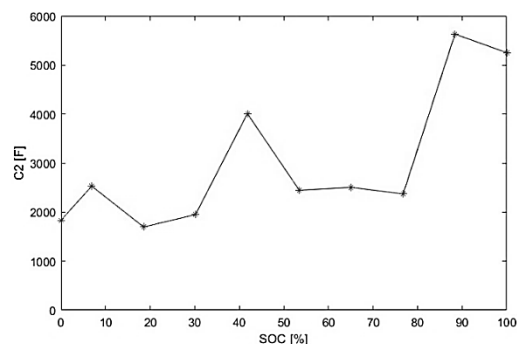
Rys. 6. Rezystancja R_1 w funkcji stanu naładowania.



Rys. 7. Pojemność C_1 w funkcji stanu naładowania.



Rys. 8. Rezystancja R_2 w funkcji stanu naładowania.



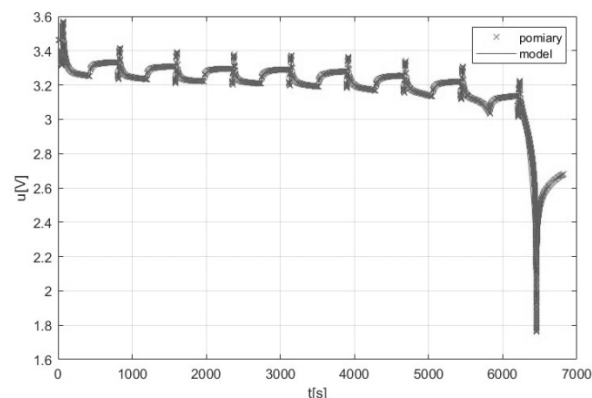
Rys. 9. Pojemność C_2 w funkcji stanu naładowania.

Wyniki identyfikacji zaprezentowano na rysunkach 4 – 9, na których w funkcji stanu naładowania przestawiono kolejno: siłę elektromotoryczną E_m , rezystancję R_0 , rezystancję R_1 , pojemność C_1 , rezystancję R_2 , pojemność C_2 . Wartości liczbowe tych parametrów zestawiono w tabeli 1.

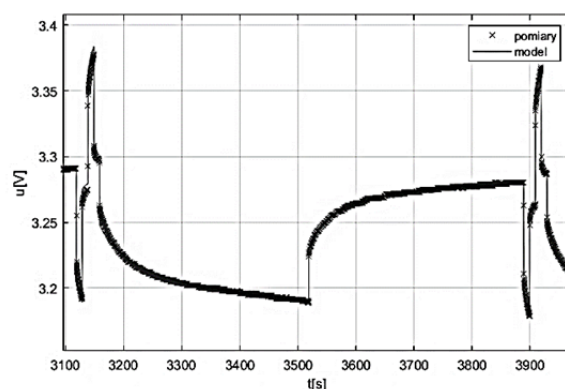
Tabela 1. Wartości badanych parametrów w funkcji stanu naładowania ogniwa.

SOC [%]	R_0 [Ω]	R_1 [Ω]	C_1 [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]
0,0	0,0011	0,9757	42,02	0,1535	1835,2
6,9	0,0297	0,0240	510,35	0,0420	2529,8
18,6	0,0339	0,0013	3797,3	0,0425	1697,1
30,2	0,0331	0,0059	978,89	0,0445	1949,7
41,8	0,0365	0,0161	1281,2	0,0295	4008,4
53,5	0,0394	0,0057	2982,6	0,0331	2446,0
65,1	0,0336	0,0076	1314,1	0,0282	2505,6
76,8	0,0367	0,0053	1982,3	0,0297	2371,4
88,4	0,0307	0,0179	517,73	0,0176	5632,6
100,0	0,0379	0,1084	308,72	0,0310	5252,9

Następnie porównano napięcie wyznaczone podczas pomiarów oraz podczas symulacji, co przedstawiono na rysunku 10. Dodatkowo, w celu lepszego zobrazowania dokładności modelu, na rysunku 11 przedstawiono powiększony fragment charakterystyki z rysunku 10.



Rys. 10. Porównanie napięcia uzyskanego podczas pomiarów oraz symulacji (z wykorzystaniem opracowanego modelu)



Rys. 11. Powiększony fragment charakterystyki z rysunku 10 (z wykorzystaniem opracowanego modelu)

Wnioski

W pracy zajęto się problematyką analizy parametrów schematu zastępczego ogniwa litowo-jonowych w funkcji stanu naładowania. Zagadnienie to jest ważne i aktualne, ponieważ stale rośnie liczba urządzeń elektrycznych wykorzystujących do zasilania ogniwa elektrochemiczne. Wiele z nich wymaga szczegółowej analizy funkcjonalnej,

co często możliwe jest wyłącznie z wykorzystaniem modeli ogniwi.

W niniejszej pracy przeprowadzono badania eksperymentalne ogniwa typu LFP (LiFePO₄) o pojemności 1100 mAh. Następnie opracowano autorską metodę służącą do wyznaczania wartości elementów schematu zastępczego drugiego rzędu, wykorzystującą algorytm genetyczny. Uzyskano wysoką zbieżność modelu w stosunku do zarejestrowanych danych – współczynnik determinacji R² wynosi 99,98%. Wyniki te potwierdzają bardzo dużą skuteczność zastosowanej metody identyfikacji parametrów modelu ogniwa.

Literatura i autorzy

Autorzy: dr hab. inż. Leszek Kasprzyk, prof. uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: leszek.kasprzyk@put.poznan.pl; Wiktoria Kaczmarek, Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: wiktoria.kaczmarek@student.put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Tran, M.-K., DaCosta, A., et.al., Comparative Study of Equivalent Circuit Models Performance in Four Common Lithium-Ion Batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. *Batteries*, 7 (2021), n. 51,
- [2] Burzyński D., Pietracho P., Kasprzyk L., Tomczewski A., Analysis and Modeling of the Wear-Out Process of a Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt Cell during Cycling Operation under Constant Load Conditions, *Energies*, vol. 12, n. 20, s. 3899-1-3899-12, 2019
- [3] Shouyi Y., et al., Advanced electrolyte design for high-energy-density Li-metal batteries under practical conditions, *Angewandte Chemie*, 133(2021), n. 49, 25828-25842
- [4] Burzyński D., Kasprzyk L., A novel method for the modelling of the state of health of lithium-ion cells using machine learning for practical applications, *Knowledge-Based Systems*, vol. 219 (2021), pp. 106900-1-106900-11
- [5] Kasprzyk L., Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles, *Eksplatacja i Niezawodność*, 19 (2017), n. 2, 229-236
- [6] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Efektywność oraz aspekty ekonomiczne w obliczeniach elektromagnetycznych i optymalizacyjnych układów elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), n. 12, 57-60
- [7] <https://nl.mathworks.com/help/gads/ga.html> [dostęp: 30.03.2023]