

Identyfikacja parametrów schematu zastępczego ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych przy wykorzystaniu metodologii HPPC

Streszczenie. W artykule opisano sposób prowadzenia testów identyfikacyjnych celi baterii litowo-jonowej, mających na celu wyznaczenie wartości parametrów jej schematu zastępczego. Do oszacowania rzeczywistej pojemności ogniwa wykorzystano testy charakterystyki rozładowania, a do określenia parametrów schematu zastępczego Thevenina wykorzystano testy HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization). Podano szczegółowy opis metod stosowanych do opracowania wyników testu HPPC. Szczególny nacisk położono na stosowane techniki filtracji i optymalizacji oraz ocenę jakości i przydatności pozyskiwanych danych pomiarowych. W artykule podano komplet uzyskanych parametrów, umożliwiając czytelnikowi stworzenie własnego, w pełni funkcjonalnego modelu symulacyjnego celi. Uzyskany model symulacyjny zweryfikowano pomiarowo w teście CDC (Charge Depleting Cycle).

Abstract. The article describes the method of conducting identification tests of a lithium-ion battery cell, aimed at determining the values of its equivalent circuit parameters. To estimate the actual capacity of the cell, discharge characteristics tests were used, and HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) tests were used to determine the Thevenin equivalent circuit parameters. A detailed description of the methods used to develop HPPC test results is given. Particular emphasis was placed on the applied filtration and optimization techniques as well as the assessment of the quality and usefulness of the acquired measurement data. The article provides a complete set of obtained parameters, enabling the reader to create his own, fully functional simulation model of the cell. The obtained simulation model was verified by measurements in the CDC (Charge Depleting Cycle) test. (**Identification of LFP cell equivalent circuit parameters using HPPC methodology.**)

Słowa kluczowe: celi baterii LFP (Lithium Iron Phosphate), test HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization), schemat zastępczy Thevenina

Keywords: LFP (Lithium Iron Phosphate) battery cell, HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) test, Thevenin equivalent circuit.

Wstęp

Opisane badania mają na celu stworzenie dokładnego modelu symulacyjnego celi baterii litowo-jonowej, który zostanie wykorzystany w procesie projektowania baterii trakcyjnej w pełni elektrycznego pojazdu typu LHD (Load-Hull-Dump).

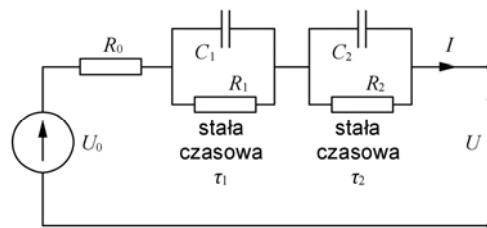
Najbardziej podstawowym elementem baterii trakcyjnej jest pojedyncza celi. Punktem wyjścia do stworzenia modelu symulacyjnego jest jej schemat zastępczy, opisujący właściwości statyczne i dynamiczne. W praktyce stosuje się wiele różnych form schematów zastępczych cel [1,2,3,4,5,6], biorąc pod uwagę różne zjawiska fizyczne i chemiczne. Właściwy wybór modelu zależy od jego przeznaczenia oraz sposobu, w jaki będą identyfikowane jego parametry. Najczęściej stosowane modele opisują zależność charakterystyki napięcia stanu jałowego celi od stanu naładowania SOC (State of Charge) [1,7,8] oraz właściwości dynamiczne celi z jedną lub dwiema stałymi czasowymi. Takim modelem jest schemat zastępczy Thevenina [9,10,11]. Z punktu widzenia metod identyfikacyjnych, najczęściej stosowane są test ładowania lub rozładowania impulsowego [12,13] lub testy HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) [14,15,16] w połączeniu z charakterystykami ładowania i rozładowania [17,18,19].

Identyfikacja parametrów RC impedancji schematu zastępczego Thevenina zależy od jakości aproksymacji przebiegów napięć impulsów HPPC funkcją wykładniczą [17,20] lub funkcją wielowykładniczą [8,17,16]. Aproksymację można przeprowadzić poprzez optymalizację, stosując deterministyczne metody optymalizacji [19,21]. Jednak w tym przypadku wynik optymalizacji zależy od punktu startowego algorytmu optymalizacji, który nie zawsze łatwo wybrać. Problem ten nie występuje w algorytmach metaheurystycznych opartych na populacji [22]. Takie algorytmy, tj. algorytmy genetyczne [9,23] czy optymalizacja rojem cząstek [24,21] również są wykorzystywane do przetwarzania wyników testów HPPC.

W artykule omówiono typowe problemy techniczne, w tym wynikające z właściwości fizycznych ogniw litowo-jonowych typu LFP (Lithium Iron Phosphate, LiFePO_4) i zaproponowano metody ich rozwiązywania, opisując krok po kroku proces przetwarzania wyników testów HPPC.

Cela litowo-jonowa i jej schemat zastępczy

W badaniach wykorzystano celę LFP ThunderSky Winston LFP040AHA, o pojemności znamionowej $Q_n = 40$ Ah, dopuszczalnym napięciu od 2,5 V do 4 V, prądzie znamionowym 20 A i maksymalnym prądzie rozładowania 400 A (10 C^1). Schemat zastępczy celi [11,15] przedstawiono na rysunku 1.



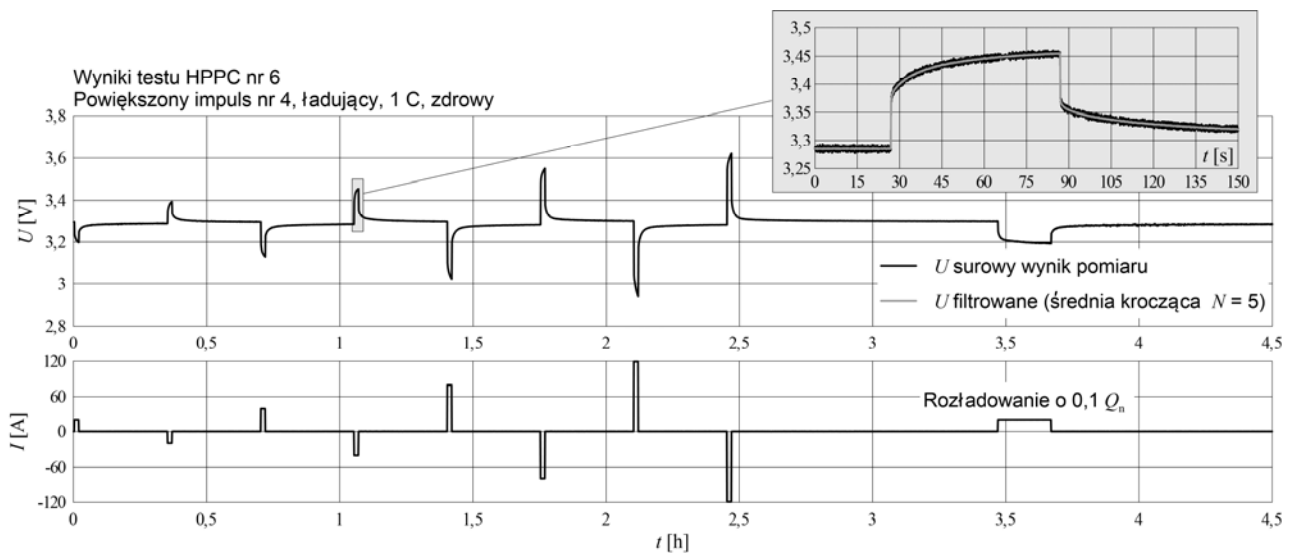
Rys. 1. Schemat zastępczy Thevenina celi litowo-jonowej

Schemat składa się z napięcia stanu jałowego U_0 oraz impedancji, zawierającej dwie pary RC, odpowiadające dwóm stałym czasowym [25,26]:

$$(1) \quad \tau_1 = R_1 \cdot C_1, \quad \tau_2 = R_2 \cdot C_2.$$

Wartości wszystkich parametrów schematu zastępczego są zależne od stanu naładowania celi SOC [11,20,25]:

¹ Prąd celi oraz baterii często podawany jest w wielkościach względnych C. Wartość C w A jest liczbowo równa pojemności znamionowej w Ah. Tutaj więc $1\text{ C} = 40\text{ A}$.



Rys. 2. Przykładowy wynik testu HPPC

$$(2) \quad SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q} \int_0^t I d\tau,$$

gdzie Q to rzeczywista pojemność celi, zwykle różna od znamionowej Q_n , a SOC_0 to początkowy stan naładowania. Rzeczywistą pojemność celi wyznaczono pomiarowo na podstawie charakterystyk rozładowania [17,18,19], uzyskując wartość $Q = 45,7$ Ah. Jest to wartość znacznie większa niż znamionowa, lecz zgodna z charakterystykami podanymi w karcie katalogowej celi LFP040AHA.

Testy HPPC i opracowanie ich wyników

Serię testów HPPC przeprowadzano po uprzednim naładowaniu celi do maksymalnego napięcia 4 V. Następnie wymuszano prąd obciążenia celi I , rejestrując odpowiedź napięciową U . Zastosowany układ zasilania (i obciążenia) pracował więc w trybie CC (Constant Current). Gdy napięcie celi osiągało wartość maksymalną 4 V (podczas impulsów ładujących) lub minimalną 2,5 V (podczas impulsów rozładowujących), układ przełączał się w tryb CV (Constant Voltage), ograniczając prąd aby nie dopuścić do wyjścia napięcia poza dopuszczalny zakres.

Podstawową ideą testu HPPC jest analiza odpowiedzi napięciowej ogniwa U na prostokątny impuls prądu I . Odpowiedź ta jest przebiegiem wielowykładniczym, którego stałe czasowe należy wyznaczyć w procesie identyfikacji [9,17,15,19]:

$$(2) \quad U = U_0 - I \cdot R_0 - I \cdot R_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) - I \cdot R_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right).$$

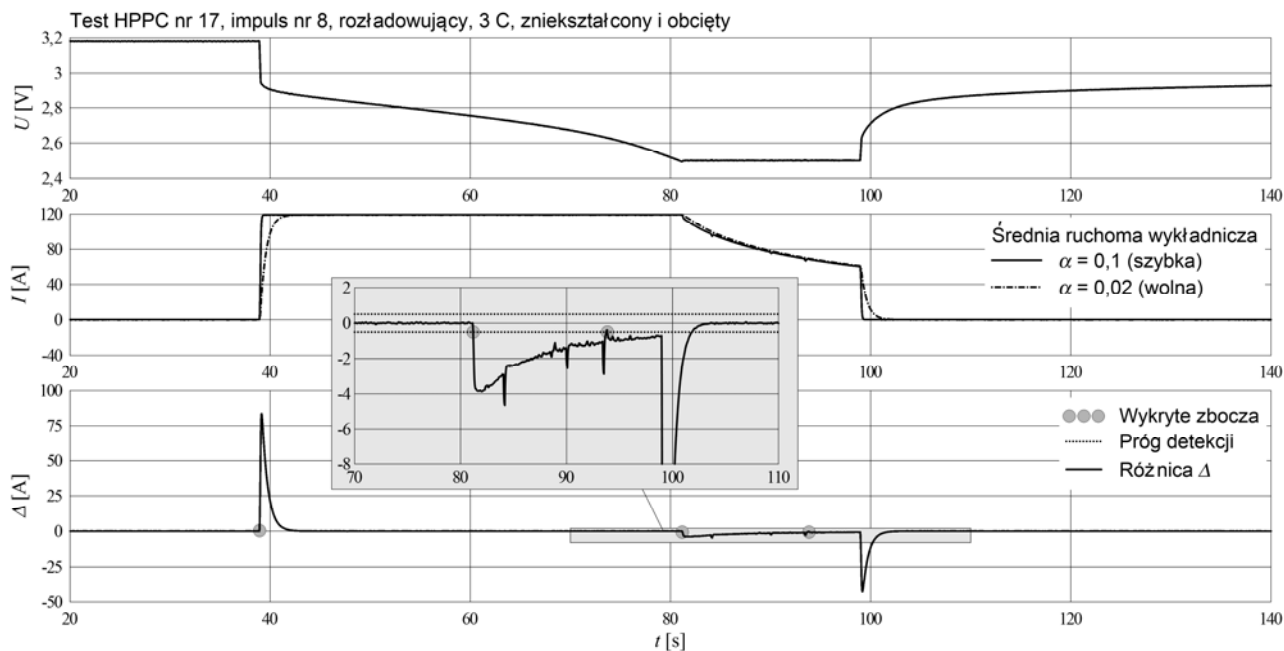
Aby wyznaczenie stałej czasowej było możliwe i precyzyjne, zarejestrowana odpowiedź napięciowa (oraz sam impuls prądowy) powinna trwać kilkakrotnie dłużej niż oczekiwana długość stałej czasowej [14]. Zatem im dłuższy zarejestrowany przebieg przejściowy, tym lepiej. Z drugiej strony, impuls HPPC powinien być jak najkrótszy, aby nie spowodować znacznej zmiany SOC celi. Stosowana w praktyce długość impulsu HPPC jest zatem kompromisem pomiędzy tymi dwoma wymaganiami. W przypadku ogniw niklowo-manganowo-kobaltowych (NMC) dwie pierwsze stałe czasowe są stosunkowo krótkie [27] i nie przekraczają kilkunastu sekund, zatem zwykle stosuje się impulsy

trwające 10 s [19,14,4]. W przypadku rozważanego ogniwa LFP stałe czasowe są dłuższe, dlatego czas trwania impulsów HPPC wydłużono do 60 s.

W praktyce stosuje się profile HPPC zawierające różną liczbę impulsów, jednak zawsze jest to liczba parzysta [19,4]. Impulsy zawsze występują parami (impuls ładowania i impuls rozładowania), dzięki czemu seria impulsów nie zmienia SOC ogniwa. Liczba par impulsów może być różna. Gdy par jest więcej niż jedna, wówczas poszczególne pary różnią się wartościami prądu. Zastosowano tu cztery pary impulsów, kolejno o wartościach prądów 0,5 C, 1 C, 2 C i 3 C (rys. 2). Kolejność impulsów w parze również ma znaczenie. W przypadku dużych wartości SOC w pierwszej kolejności zastosowano impuls rozładowania. Rozpoczęcie od impulsu ładującego przy dużej wartości SOC (bliskiej 1) wiązałoby się z ryzykiem zwiększenia napięcia ogniwa w trakcie trwania impulsu ponad wartość dopuszczalną, co spowodowałoby przełączenie układu pomiarowego z trybu CC na CV i obcięcie impulsu. Dla małych wartości SOC (bliskich 0) z tego samego powodu odwrócono kolejność, stosując najpierw impuls ładowania. Zmianę sekwencji widać w Tabeli 1 po teście nr 7.

Tabela 1. Podsumowanie testów HPPC. Oznaczenia: + impuls ładujący, - impuls rozładowujący, [-] impuls ścięty, (-) impuls zniekształcony

Nr testu	Nr impulsu w teście i względny prąd								ΔQ [Ah]	$\Delta Q/Q_n$ [%]	Q [Ah]
	1	2	3	4	5	6	7	8			
	0,5C	0,5C	1C	1C	2C	2C	3C	3C			
1	-	[+]	-	[+]	-	[+]	-	[+]	2,41	6,03	2,41
2	-	+	-	+	-	+	-	(+)	2,21	5,53	4,63
3	-	+	-	+	-	+	-	+	4,21	10,5	8,84
4	-	+	-	+	-	+	-	+	4,21	10,5	13,0
5	-	+	-	+	-	+	-	+	4,22	10,5	17,3
6	-	+	-	+	-	+	-	+	4,23	10,6	21,5
7	-	+	-	+	-	+	-	+	4,22	10,6	25,7
8	+	-	+	-	+	-	+	-	4,21	10,5	29,9
9	+	-	+	-	+	-	+	-	4,22	10,5	34,2
10	+	-	+	-	+	-	+	(-)	2,16	5,40	36,3
11	+	-	+	-	+	-	+	(-)	2,18	5,45	38,5
12	+	-	+	-	+	(-)	+	(-)	2,20	5,51	40,7
13	+	-	+	-	+	(-)	+	(-)	2,21	5,52	42,9
14	+	-	+	-	+	(-)	+	(-)	2,22	5,54	45,1
15	+	-	+	(-)	+	(-)	+	(-)	2,20	5,49	47,3
16	+	-	+	(-)	+	(-)	+	(-)	2,22	5,55	49,5
17	+	(-)	+	(-)	+	(-)	+	(-)	0,92	2,31	50,5
18	+	(-)	+	(-)	+	(-)	+	(-)	0,25	0,62	50,7



Rys. 3. Metoda wykrywania zboczy, zastosowana do znajdowania początków i końców impulsów HPPC

Innym ważnym czynnikiem jest czas relaksacji pomiędzy impulsami. Powinien on być znacznie dłuższy od oczekiwanych wartości stałych czasowych celi, aby przed wystąpieniem kolejnego impulsu napięcie celi miało czas na ustabilizowanie się. Jednakże ze względu na bardzo duże stałe czasowe badanego ogniwa LFP spełnienie tego założenia jest trudne. W przeprowadzonych badaniach stosowano czas relaksacji pomiędzy impulsami wynoszący 20 min (rys. 2).

Ostatnim elementem profilu HPPC pokazanym na rysunku 2 jest rozładowanie ogniwa przed kolejnym testem HPPC. Wartości parametrów obwodu zastępczego ogniwa zmieniają się najszybciej dla bardzo małych i bardzo dużych wartości SOC , natomiast dla wartości pośrednich ($SOC \approx 0,5$) są prawie stałe. Aby uchwycić kształt charakterystyki, dla dużych wartości SOC zastosowano rozładowanie o wartości $0,05 Q_n$, a następnie zwiększono odstęp do $0,1 Q_n$, aby powrócić do $0,05 Q_n$ dla małych wartości SOC .

Kolejne testy HPPC wykonywano do momentu, aż całkowity ładunek pobrany z celi w trakcie badania spadł znacząco poniżej zadanej wartości rozładowania ($0,05 Q_n$), co wynikało z faktu, że impulsy rozładowania w profilu zostały odcięte przez mechanizm CC / CV, ze względu na osiągnięcie minimalnego napięcia dopuszczalnego celi. Wszystkie przeprowadzone testy podsumowano w tabeli 1, gdzie ΔQ jest ładunkiem pobranym z ogniwa podczas całego testu HPPC (uwzględniając końcowe wyładowanie o $0,05$ lub $0,1 Q_n$). Można zauważyć, że dla dwóch ostatnich testów (17 i 18) wartość ta znacznie spada, co oznacza, że ogniwo jest już rozładowane. W tabeli 1 Q jest całkowitą wartością ładunku pobranego z ogniwa na koniec danego testu, z uwzględnieniem ładunku pobranego we wszystkich poprzedzających testach.

Zarejestrowane przebiegi pokazane na rysunku 2 zawierają po 1 500 000 próbek. Z tego powodu precyzyjna lokalizacja początków i końców impulsów HPPC jest wyzwaniem. Ponadto, przebiegi zawierają szumy utrudniające dalszą analizę. Wysoka zawartość szumów wynika z niekorzystnej proporcji zmian analizowanego napięcia do zakresu pomiarowego zastosowanego rejestratora. Zmiany napięcia wywołane impulsem HPPC

wahają się od dziesięciu do kilkudziesięciu mV, natomiast zmierzone wartości napięcia dochodzą do 4 V. Dlatego zastosowano przetwornik pomiarowy o zakresie 10 V. W związku z tym analizowane zmiany stanowią zaledwie kilka procent zakresu pomiarowego, co nawet przy dobrej jakości przetwornikach i 16-bitowym próbkowaniu skutkuje stosunkowo dużą ilością szumów.

Obydwa problemy, czyli usuwanie szumu w stanie nieustalonym napięcia oraz wykrywanie początków i końców impulsów na podstawie stanu przejściowego prądu, można rozwiązać stosując odpowiednie techniki filtrowania danych.

Do wykrywania zboczy wyznaczających początek i koniec impulsów wykorzystano metodę opartą na analizie różnicy przebiegów dwóch kroczącej średnich wykładniczych:

$$(3) \quad r_i(\alpha) = \begin{cases} I_i & i = 1 \\ \alpha \cdot I_i + (1 - \alpha) \cdot r_{i-1} & i > 1 \end{cases}$$

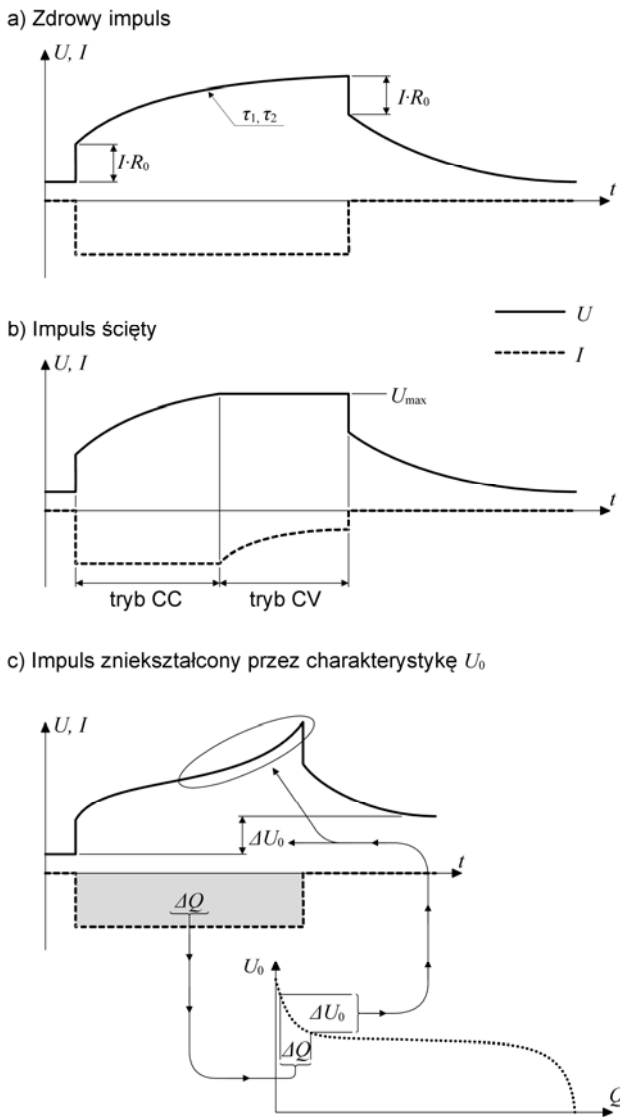
$$(4) \quad \Delta_i = r_i(\alpha_{\text{fast}}) - r_i(\alpha_{\text{slow}}).$$

W (3) i (4) I_i jest i -tą próbką przebiegu prądu, r_i jest i -tą próbką wykładniczej średniej kroczącej, α jest współczynnikiem wagowym, a Δ_i jest i -tą próbką różnicy przebiegów. Ideę metody przedstawiono na rysunku 3. Różnica Δ pomiędzy dwoma przebiegami uśrednionymi przy różnych wartościach wag ($\alpha_{\text{slow}} = 0,02$, $\alpha_{\text{fast}} = 0,1$) zawiera piki w momentach, w których następuje gwałtowna zmiana trendu przebiegu źródłowego. Zbocze zostaje wykryte, gdy wartość Δ przekracza ustawiony próg, który w tym przypadku wynosił 0,5. Należy zwrócić uwagę, że wartości współczynnika wagowego α dobiera się w zależności od częstotliwości próbkowania przebiegu, natomiast wartość progową należy dobierać w zależności od zawartości szumu i zaburzeń w przebiegu źródłowym.

Do odfiltrowania szumu z przebiegu napięcia zastosowano średnią krocząca rzędu $N = 5$:

$$(5) \quad U_{\text{filtr}} = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=i-N}^{i+N} U_k.$$

Ta prosta metoda dała dobre rezultaty ze względu na dużą częstotliwość próbkowania zarejestrowanego przebiegu napięcia oraz losowy charakter filtrowanego szumu. Wyniki filtracji przykładowego impulsu HPPC przedstawiono na powiększonym fragmencie wykresu na rysunku 2.



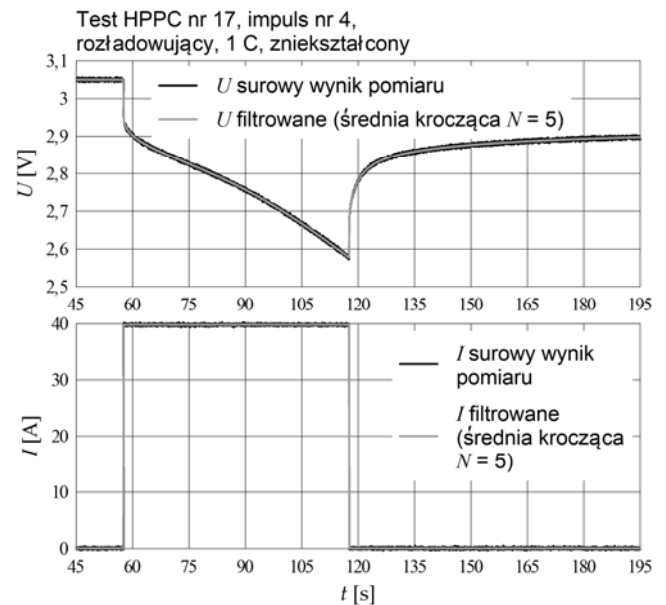
Rys. 4. Kształty przebiegów impulsów HPPC zdrowego oraz wadliwych

Po wykryciu zboczy wyznaczających początki i końce przebiegów odpowiedzi napięciowej (2) i ich przefiltrowaniu, należy przeprowadzić ich diagnostykę. Problem wynika z faktu, że nie wszystkie zarejestrowane impulsy nadają się do dalszej analizy, gdyż mogą zawierać wady wynikające ze sposobu prowadzenia pomiaru lub z właściwości fizycznych celi. Na rysunku 4a przedstawiono schematycznie kształt i interpretację prawidłowego impulsu, nadającego się do dalszej analizy [12,1] oraz dwa przypadki impulsów wadliwych. Przykład zarejestrowanego zdrowego impulsu pokazano na powiększonym fragmencie wykresu na rysunku 2.

Ścięcie impulsu (rys. 4b) można łatwo wykryć analizując kolejność wykrytych wcześniej zboczy przebiegu prądu i

odległości między nimi. Zdrowy impuls ma dwa zbocza, opadające i narastające. To, które jest pierwsze, zależy od tego, czy jest to impuls ładujący czy rozładowujący. Zbocza są odległe w czasie o założoną długością impulsu HPPC. Odchylenie od tego wzorca sugeruje, że impuls został ścięty. Przypadek taki pokazano na rysunku 3. Dochodzi do niego gdy napięcie ogniwa w czasie trwania impulsu osiąga wartość graniczną, w związku z czym układ pomiarowy przełącza się z trybu CC na CV.

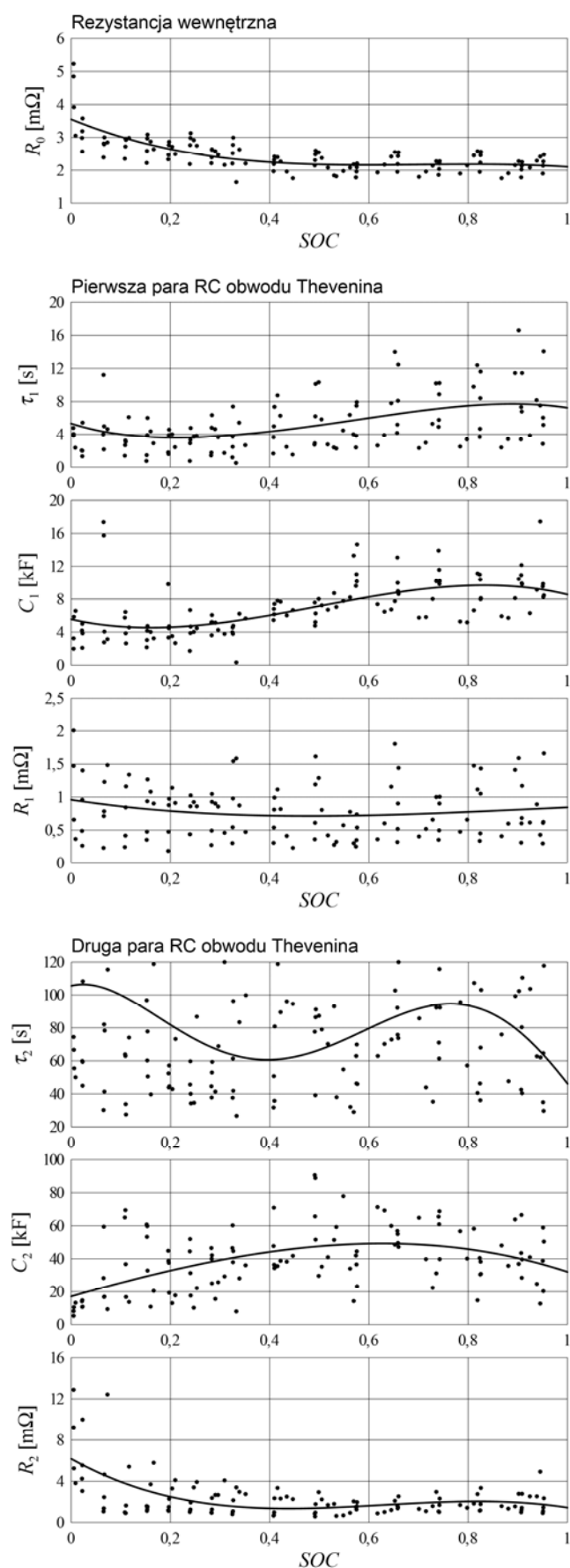
W przeprowadzonych badaniach przycinanie zawsze występowało wraz z drugą wadą, czyli zniekształceniem przez charakterystykę stanu jałowego U_0 (rys. 4c). Zniekształcenie impulsu występuje dla małych wartości SOC , bliskich 0 oraz dużych, bliskich 1. Dzieje się tak dlatego, że w tych obszarach charakterystyka U_0 jest najbardziej stroma. Dlatego nawet niewielka zmiana SOC w czasie trwania impulsu (spowodowana przepływem ładunku ΔQ) powoduje znaczną zmianę napięcia ΔU_0 , co przekłada się na kształt rejestrowanego przebiegu (rys. 4c). Kształt przebiegu przestaje zależeć jedynie od stałych czasowych τ_1 i τ_2 , co jest założeniem niezbędnym, aby możliwa była ich identyfikacja. W skrajnym przypadku zarejestrowany przebieg wygina się w kierunku przeciwnym (rys. 5) do tego, jaki wynika z (2).



Rys. 5. Zarejestrowany pomiarowo impuls zniekształcony

W tabeli 1 podsumowującej testy HPPC, ścięte impulsy wyróżniono nawiasem kwadratowym, impulsy zniekształcone nawiasem okrągłym. W dalszej analizie wykorzystano wyłącznie zdrowe impulsy, nie ujęte w nawiasy.

Przefiltrowane i wyselekcjonowane impulsy HPPC aproksymowano funkcją (2) w celu określenia stałych czasowych τ_1 i τ_2 oraz rezystancji R_0 , R_1 i R_2 . Następnie na podstawie wzorów (1) obliczono pojemności C_1 i C_2 . Aproksymację przeprowadzono metodą optymalizacji rojem cząstek, opisaną w osobnym artykule [27]. Uzyskane wartości przedstawiono w postaci punktów na wykresach na rysunku 6. Z układu punktów, bardzo nieregularnego zwłaszcza dla R_2 , C_2 i τ_2 wynika, że zastosowane impulsy HPPC, były zbyt krótkie, aby poprawnie zidentyfikować drugą stałą czasową modelu Thevenina. Z wykresów na rysunku 6 wynika, że punkty odpowiadające zidentyfikowanym wartościom R_0 układają się w wąskie, regularne pasma, co świadczy o dobrej jakości identyfikacji.



Rys. 6. Parametry schematu zastępczego Thevenina aproksymowane wielomianem 3-go rzędu

W przypadku stałej czasowej τ_1 otrzymane pasmo jest znacznie szersze i rozrzut wartości większy, ale nadal widoczna jest pewna prawidłowość. W przypadku stałej czasowej τ_2 rozrzut wyników jest bardzo duży. Należy zauważyć, że jak poprzednio stwierdzono, aby zapewnić dobrą jakość identyfikacji stałych czasowych przebiegu wykładniczego, długość jego zarejestrowanego fragmentu powinna być kilkakrotnie większa od długości jego stałych czasowych. Jednak przy zastosowanej długości impulsu HPPC równej 60 s, ponad połowa zidentyfikowanych wartości τ_2 była większa, nawet dwukrotnie. Zwiększanie czasu trwania impulsów HPPC byłoby niepożądane, gdyż powodowałoby zbyt duże zmiany SOC w trakcie trwania impulsu. W przypadku badanego ogniwa typu LFP należy więc rozważyć rezygnację z wyznaczania dwóch stałych czasowych na rzecz tylko jednej oraz skrócenie czasu trwania impulsu HPPC.

Charakterystyki parametrów R i C należy aproksymować funkcjami ciągłymi, nadającymi się do zastosowania w modelu symulacyjnym celi. Zastosowano aproksymację wielomianową i przeprowadzono serię eksperymentów z wielomianami różnych rzędów. Najlepsze wyniki uzyskano dla wielomianów trzeciego rzędu:

$$(5) \quad f(SOC) = a + b \cdot SOC + c \cdot SOC^2 + d \cdot SOC^3.$$

Aproksymację przeprowadzono metodą Levenberga-Marquardta. Aproksymowano charakterystyki rezystancji i pojemności, a otrzymane współczynniki wielomianu podsumowano w tabeli 2. Na rysunku 6, na wykresach wartości R i C , linie przedstawiają przebiegi funkcji (5) z parametrami z tabeli 2. Linie na wykresach τ_1 i τ_2 odpowiadają iloczynom funkcji aproksymujących, odpowiednio R_1 i C_1 dla τ_1 , R_2 i C_2 dla τ_2 , zgodnie z (1).

Tabela 2. Współczynniki aproksymacji wielomianowej (5)

	a	b	c	d
R_0	$3,551 \cdot 10^{-3}$	$-6,172 \cdot 10^{-3}$	$8,993 \cdot 10^{-3}$	$-4,267 \cdot 10^{-3}$
R_1	$9,601 \cdot 10^{-4}$	$-1,154 \cdot 10^{-3}$	$1,611 \cdot 10^{-3}$	$-5,716 \cdot 10^{-4}$
R_2	$6,169 \cdot 10^{-3}$	$-2,678 \cdot 10^{-2}$	$4,690 \cdot 10^{-2}$	$-2,485 \cdot 10^{-2}$
C_1	5549	$-1,359 \cdot 10^4$	$5,058 \cdot 10^4$	$-3,397 \cdot 10^4$
C_2	$1,712 \cdot 10^4$	$8,510 \cdot 10^4$	$-2,850 \cdot 10^4$	$-4,243 \cdot 10^4$

Charakterystyka stanu jałowego

Charakterystykę napięcia stanu jałowego U_0 należy wyznaczyć pomiarowo. Można tu zastosować uśrednioną charakterystykę ładowania i rozładowywania [17,18,19]. Jednak ta metoda ma pewne wady. Zmierzone napięcie ogniwa zawiera nie tylko napięcie jałowe, ale także spadek napięcia na impedancji, który również zależy od SOC. Ponadto zmierzone pojemności ładowania i rozładowania różnią się ze względu na straty mocy. Utrudnia to skorelowanie charakterystyk przed uśrednieniem.

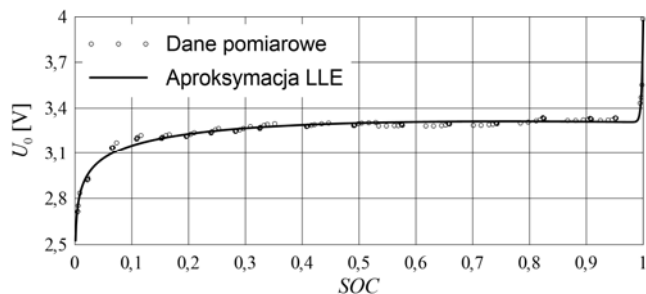
Aby uniknąć tych problemów, autorzy zaproponowali metodę wyznaczania charakterystyki U_0 na podstawie wyników testów HPPC, polegającą na uśrednianiu (w okresie 10 s) napięcia zarejestrowanego w stanie bezprądowym przed każdym impulsem HPPC. Wartość SOC odpowiadająca uzyskanemu w ten sposób napięciu jest obliczana w odniesieniu do całkowitego ładunku wszystkich testów HPPC, czyli wartości Q z ostatniego wiersza tabeli 1.

Charakterystyka U_0 oparta na pomiarach jest zbyt nieregularna, aby można ją było bezpośrednio zastosować w modelu matematycznym komórki i należy ją aproksymować gładką funkcją [1], której wybór jest kolejnym problemem. Przetestowano kilka znanych z

literatury typów funkcji i najlepszy wynik uzyskano dla logarymiczno- liniowo-wykładniczej (LLE) [1,28,27]. Uzyskana funkcja LEE ma postać:

$$(7) \quad U_0 = 3,49 + 0,1394 \cdot \ln(SOC) - 0,1825 \cdot SOC + e^{399 \cdot (SOC - 1,001)}$$

Podane we wzorze (7) wartości współczynników uzyskano metodą optymalizacji rojem cząstek, opisaną w [27]. Wykres funkcji (7) przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wyznaczona pomiarowo charakterystyka stanu jałowego

Model symulacyjny i jego weryfikacja

Aproksymowane charakterystyki U_0 , R_0 , R_1 , R_2 , C_1 i C_2 w pełni opisują schemat zastępczy Thevenina pokazany na rysunku 1. Obwód ten wraz z funkcjami opisującymi jego parametry został zaimplementowany w środowisku Matlab-Simulink (Simscape Electrical). Ostatnim parametrem opisującym model jest wcześniej wyznaczona wartość ładunku odpowiadająca $SOC = 1$ ($Q = 45,7$ Ah).

Typową strategią weryfikacji modelu matematycznego cel i baterii jest zastosowanie testów wykorzystujących cykle obciążenia. Tutaj wykorzystano cyklicznie powtarzany profil obciążenia prądowego wzorowany na standardowym

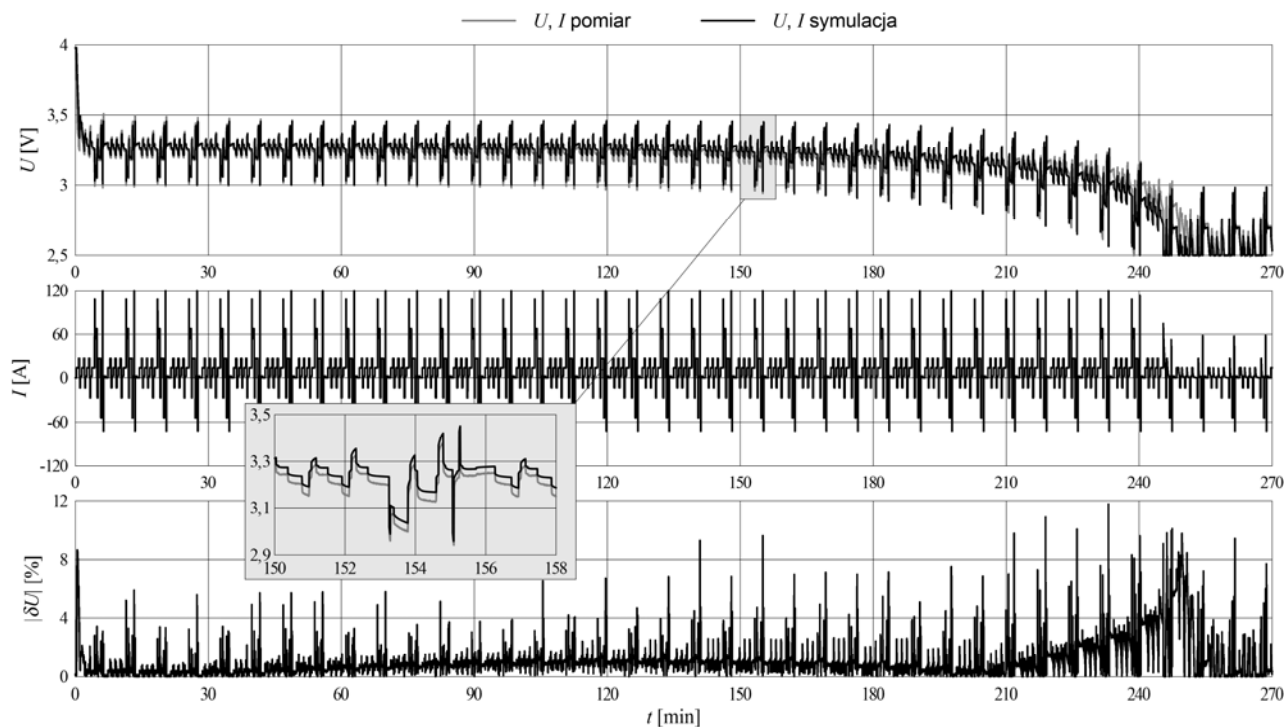
teście CDC (Charge Depleting Cycle) [29], stosowanym do badań baterii pojazdów hybrydowych. Zastosowany cykl CDC składa się z zestawu impulsów rozładowania o różnej wartości (przyspieszenie i jazda ze stałą prędkością) oraz ładowania (hamowanie regeneracyjne). Pojedynczy cykl trwa około 7 minut i powoduje rozładowanie celi o 3,3% Q_n , dlatego powtarzano go ponad 30 razy, aż do całkowitego rozładowania celi.

Ten sam test wykonano dwukrotnie, na rzeczywistej celi w laboratorium oraz w modelu symulacyjnym. W obydwu przypadkach wynikiem jest przebieg napięcia celi U , a względna różnica δU pomiędzy nimi jest miarą dokładności utworzonego modelu symulacyjnego. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rysunku 8.

Wnioski

Jak wykazało porównanie wyników pomiarów i symulacji, charakterystyka U_0 miała największy wpływ na dokładność modelu symulacyjnego. Powiększony fragment wykresu na rysunku 8 pokazuje, że symulowane i zmierzone przebiegi napięcia miały bardzo podobny kształt, lecz występowało między nimi wolno zmieniające się przesunięcie. Ze schematu zastępczego (rys. 1) wynika, że za kształt przebiegu będącego reakcją na zmiany prądu odpowiada impedancja ogniwa, złożona z elementów R i C . Przesunięcie natomiast wynika z różnic w napięciach U_0 . Podsumowując, identyfikacja stałych czasowych oraz elementów R i C dała zadowalający efekt, a dokładność uzyskanego modelu symulacyjnego można poprawić poprzez lepsze metody identyfikacji i aproksymacji charakterystyki U_0 .

Generalnie, uzyskane wartości różnicy napięć δU pomiędzy symulacją a pomiarem na poziomie kilku procent (do 10% w przy gwałtownych zmianach prądu) świadczą o dużej precyzji uzyskanego modelu symulacyjnego.



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów i symulacji

Artykuł powstał w ramach projektu współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego zgodnie z umową POIR.01.01.01-00-1427/20-00.

Autorzy: dr inż. Tadeusz Białoń^{1,2} e-mail: tadeusz.bialon@polsl.pl, dr inż. Roman Niestroj^{1,2} e-mail: roman.niestroj@polsl.pl, dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. Pol. Śl. ^{3,4} e-mail: wojciech.skarka@polsl.pl, mgr inż. Wojciech Korski² e-mail: wojciech.korski@emag.lukasiewicz.gov.pl; 1) Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, 2) Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, 3) Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, 4) BUMECH S.A. Katowice, ul. Krakowska 191, 40-389 Katowice

LITERATURA

- [1] Davis K., Hayes J.G. Comparison of Lithium-Ion Battery Pack Models Based on Test Data from Idaho and Argonne National Laboratories. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 11–15 October 2020, pp. 5626–5632. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236373>.
- [2] Rahmoun A., Biechl H. Modelling of li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, 2, 152–156.
- [3] Chen S.X., Tseng K.J., Choi S.S. Modeling of Lithium-Ion Battery for Energy Storage System Simulation. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China, 28–30 March 2009, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918501>.
- [4] Huang K., Wang Y., Feng J. Research on equivalent circuit Model of Lithium-ion battery for electric vehicles. *World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, Shanghai, China, 4–6 December 2020, pp. 492–496. <https://doi.org/10.1109/WCMEIM52463.2020.00109>.
- [5] Wu W., Qin L., Wu G. State of power estimation of power lithium-ion battery based on an equivalent circuit model. *J. Energy Storage* 2022, 51, 104538. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104538>.
- [6] Khattak A.A., Khan A.N., Safdar M., Basit A., Zaffar N.A. A Hybrid Electric Circuit Battery Model Capturing Dynamic Battery Characteristics. *IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*, Manhattan, KS, USA, 13–14 July 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KPEC47870.2020.9167659>.
- [7] Sibi Krishnan K., Pathiyil P., Sunitha R. Generic Battery model covering self-discharge and internal resistance variation. *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi, India, 4–6 March 2016, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2016.7584003>.
- [8] Zhang Q., Shang Y., Li Y., Cui N., Duan B., Zhang C. A novel fractional variable-order equivalent circuit model and parameter identification of electric vehicle Li-ion batteries. *ISA Trans.* 2020, 97, 448–457. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.004>.
- [9] He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies* 2011, 4, 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>.
- [10] Baczyńska A., Niewiadomski W., Gonçalves A., Almeida P., Luís R. Li-NMC Batteries Model Evaluation with Experimental Data for Electric Vehicle Application. *Batteries* 2018, 4, 11. <https://doi.org/10.3390/batteries4010011>.
- [11] Somakettarin N., Funaki T. Study on Factors for Accurate Open Circuit Voltage Characterizations in Mn-Type Li-Ion Batteries. *Batteries* 2017, 3, 8. <https://doi.org/10.3390/batteries3010008>.
- [12] Cipin R., Toman M., Prochazka P., Pazdera I. Identification of Li-ion Battery Model Parameters. *International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, The High Tatras, Slovakia, 24–26 September 2019, pp. 225–229. <https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883926>.
- [13] Nemes R., Ciornei S., Ruba M., Hedesiu H., Martis C. Modeling and simulation of first-order Li-Ion battery cell with experimental validation. *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 21–23 May 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759769>.
- [14] Li Z., Shi X., Shi M., Wei C., Di F., Sun H. Investigation on the Impact of the HPPC Profile on the Battery ECM Parameters' Offline Identification. *Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, Chengdu, China, 28–31 May 2020, pp. 753–757. <https://doi.org/10.1109/AEEES48850.2020.9121487>.
- [15] Deng S.D., Liu S.Y., Wang L., Xia L.L., Chen L. An improved second-order electrical equivalent modeling method for the online high power Li-ion battery state of charge estimation. *IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition—Asia (ECCE-Asia)*, Singapore, 24–27 May 2021, pp. 1725–1729. <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479017>.
- [16] Parthasarathy C., Laaksonen H., Halagi P. Characterisation and Modelling Lithium Titanate Oxide Battery Cell by Equivalent Circuit Modelling Technique. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies—Asia (ISGT Asia)*, Brisbane, Australia, 5–8 December 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715566>.
- [17] Navas S.J., Cabello González G.M., Pino F.J., Guerra J.J. Modelling Li-ion batteries using equivalent circuits for renewable energy applications. *Energy Rep.* 2023, 9, 4456–4465. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.103>.
- [18] Wang J., Jia Y., Yang N., Lu Y., Shi M., Ren X., Lu D. Precise equivalent circuit model for Li-ion battery by experimental improvement and parameter optimization. *J. Energy Storage* 2022, 52, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104980>.
- [19] Haghjoo Y., Khaburi D.A. Modeling, simulation, and parameters identification of a lithium-ion battery used in electric vehicles. *Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, Mashhad, Iran, 23–24 February 2022, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICREDG54199.2022.9804546>.
- [20] Tang A., Gong P., Li J., Zhang K., Zhou Y., Zhang Z. A State-of-Charge Estimation Method Based on Multi-Algorithm Fusion. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 70. <https://doi.org/10.3390/wevj13040070>.
- [21] Jarraya I., Degaa L., Rizoug N., Chabchoub M.H., Trabelsi H. Comparison study between hybrid Nelder-Mead particle swarm optimization and open circuit voltage—Recursive least square for the battery parameters estimation. *J. Energy Storage* 2022, 50, 104424. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104424>.
- [22] Castanho D., Guerreiro M., Silva L., Eckert J., Antonini Alves T., Tadano Y.d.S., Stevan S.L. Jr., Siqueira H.V., Corrêa F.C. Method for SoC Estimation in Lithium-Ion Batteries Based on Multiple Linear Regression and Particle Swarm Optimization. *Energies* 2022, 15, 6881. <https://doi.org/10.3390/en15196881>.
- [23] Pizarro-Carmona V., Castano-Solís S., Cortés-Carmona M., Fraile-Ardanuy J., Jimenez-Bermejo G. GA-based approach to optimize an equivalent electric circuit model of a Li-ion battery-pack. *Expert Syst. Appl.* 2021, 172, 114647. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114647>.
- [24] Wang C., Xu M., Zhang Q., Feng J., Jiang R., Wei Y., Liu Y. Parameters identification of Thevenin model for lithium-ion batteries using self-adaptive Particle Swarm Optimization Differential Evolution algorithm to estimate state of charge. *J. Energy Storage* 2021, 44, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103244>.
- [25] Shi J., Guo H., Chen D. Parameter identification method for lithium-ion batteries based on recursive least square with sliding window difference forgetting factor. *J. Energy Storage* 2021, 44, 103485. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103485>.
- [26] Yang Z., Wang X. An improved parameter identification method considering multi-timescale characteristics of lithium-ion batteries. *J. Energy Storage* 2023, 59, 106462. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106462>.
- [27] Białoń T., Niestroj R., Korski W. PSO-Based Identification of the Li-Ion Battery Cell Parameters. *Energies* 2023, 16, 3995. <https://doi.org/10.3390/en16103995>.
- [28] Baccouche I., Jemmali S., Manai B., Omar N., Amara N.E.B. Improved OCV Model of a Li-Ion NMC Battery for Online SOC Estimation Using the Extended Kalman Filter. *Energies* 2017, 10, 764. <https://doi.org/10.3390/en10060764>.
- [29] Belt J.R. Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicles, 2nd ed., U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Program, USA, 2010. <https://doi.org/10.2172/991910>.