OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Ireneusz PLEBANKIEWICZ[1], Wojciech PRZYBYŁ[2], Krzysztof A. BOGDANOWICZ[3], Agnieszka IWAN[4]

ORCID: [1]0000-0002-0077-5215, [2]0000-0002-0384-3463 , [3]0000-0001-8526-626X, [2]0000-0002-7705-6577

DOI: 10.15199/48.2025.11.19

Akumulatory sodowo-jonowe jako autonomiczne źródła zasilania urządzeń mobilnych

Sodium-ion batteries as autonomous power sources for mobile devices

[1] mgr inż. Ireneusz PLEBANKIEWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej. ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: plebankiewicz@witi.wroc.pl

[2] mgr inż Wojciech Przybył, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej. ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl

[3] dr Krzysztof A. Bogdanowicz, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl

[4] prof. dr hab. Agnieszka Iwan, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: iwan@witi.wroc.pl

Adres do korespondencji: plebankiewicz@witi.wroc.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono innowacyjny sposób diagnozowania stanu akumulatorów sodowo-jonowych. Typowe przyrządy pomiarowe i testujące obejmują układy ładowania i rozładowania akumulatorów, pomiary rezystancji wewnętrznej czy gęstości energii. Stan naładowania i żywotność akumulatora sodowo-jonowego są istotnymi parametrami warunkującymi szeroki wachlarz zastosowań do zasilania urządzeń. Dostępność energii i mocy w akumulatorze jest funkcją stanu naładowania akumulatora, która jest skorelowana z napięciem w obwodzie otwartym.

Słowa kluczowe: akumulatory sodowo-jonowe, stan naładowania, napięcie obwodu otwartego, napięcie na zaciskach, rezystancja wewnętrzna

Abstract: This article presents an innovative method for diagnosing the condition of sodium-ion batteries. Typical measuring and testing devices include battery charging and discharging systems, internal resistance measurements, and energy density measurements. The state of charge and service life of a sodium-ion battery are important parameters that determine a wide range of applications for powering devices. The availability of energy and power in the battery is a function of the battery state of charge, which is correlated with the open circuit voltage.

Keywords: sodium-ion batteries, State of Charge, Open Circuit Voltage, Terminal Voltage, Internal Resistance

Wstęp

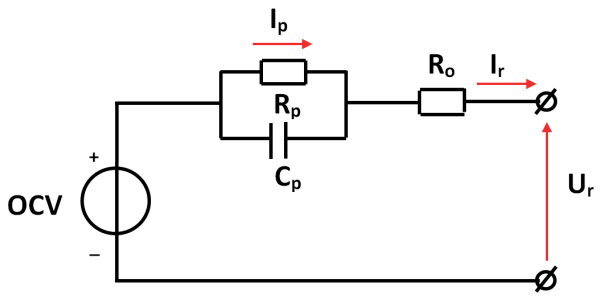
Znaczący postęp technologii wytwarzania akumulatorów sodowo-jonowych, a w szczególności uzyskanie wysokiej gęstości energii, długiego czasu życia, niskiego poziomu samorozładowania przy coraz niższym koszcie materiałów, z których zbudowany jest akumulator i coraz większej dostępności powoduje, że coraz częściej są stosowane do zasilania różnych urządzeń. Akumulatory sodowo-jonowe o bardzo dużym potencjale w obszarze wydajności, szybkości ładowania, są rewolucyjnym rozwiązaniem, które zmienia naszą rzeczywistość, a powszechność występowania sodu powoduje, że produkcja źródeł zasilania jest tańsza. Dodatkowym atutem jest eliminacja wykorzystania takich metali jak kobalt, nikiel czy grafit, których zasoby są nierównomiernie rozmieszczone na całym świecie. Według danych Unia Europejska importuje 86% litu, 86% niklu i 100% kobaltu. Powoduje to ogromne ryzyko geopolityczne i gospodarcze nie tylko ze względu na wzrost popytu na te surowce, ale i ewentualne lokalne konflikty zbrojne. Akumulatory sodowo-jonowe postrzegane są, jako klucz do zmniejszenia zależności Europy od metali ziem rzadkich, a tym samym przyśpieszą transformację energetyczną [1].

Niewątpliwą zaletą sodu jest to, że posiada większą zdolność magazynowania energii niż lit, przy większym bezpieczeństwie użytkowania [2], a akumulatory

sodowo-jonowe nie wybuchają ani się nie zapalają przy kontakcie z powietrzem lub wodą. Idealnie nadają się do budowania magazynów energii do przechowywania nadwyżek energii elektrycznej. Postrzegane są, jako klucz do transformacji energetycznej i zwiększenia udziału źródeł odnawialnych w ogólnej sieci energetycznej poprawiając jej stabilność poprzez niezawodność dostaw energii.

Przedmiot i cel badań

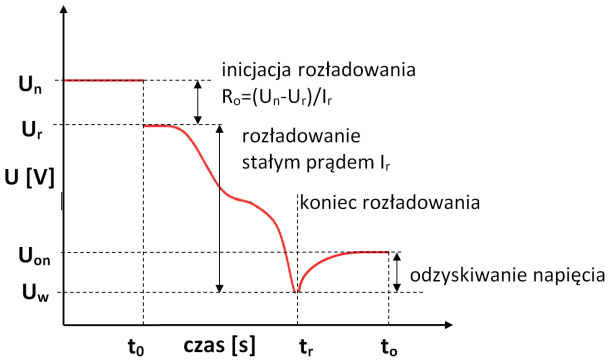
Akumulatory sodowo-jonowe posiadają duży potencjał w zapewnieniu autonomii zasilania coraz powszechniejszych mobilnych urządzeń elektronicznych. Ich atrakcyjność w rozumieniu zwykłego użytkownika to małe wymiary, masa oraz jak najdłuższy czas pracy urządzenia. Przy stałym poborze mocy czas ten jest wprost proporcjonalny do ilości ładunku zgromadzonego w akumulatorze, inaczej stan naładowania akumulatora (SOC – *ang. State-of-Charge*) i jest zależny od wielu czynników między innymi takich jak: temperatura pracy baterii, prąd pobierany przez baterię czy rozrzuty produkcyjne, które w większości są niemierzalne w rzeczywistym środowisku. Innym dość ważnym parametrem jest rezystancja wewnętrzna (rys. 1) prądu stałego Ro (omowa), która powiązana jest z rozmiarem, konstrukcją i montażem akumulatora, oraz wewnętrzny opór polaryzacji R_p występujący podczas procesu ładowania i rozładowywania akumulatora wpływający na stan SOC (rys. 2).



Rys. 1. Schemat zastępczy akumulatora sodowo-jonowego

Analogicznie do akumulatora litowo-jonowego [3] w celu opisu aktualnego stanu akumulatora sodowo-jonowego, możemy zastosować następujące wielkości:

- Stan naładowania (SOC – State of Charge),
- Głębokość rozładowania (DOD – Depth of Discharge),
- Stan żywotności (SOH – State of Health),
- Napięcie na zaciskach (Terminal Voltage),
- Napięcie obwodu otwartego (OCV – Open-Circuit Voltage),
- Rezystancja wewnętrzna, R_0 (Internal Resistance).



Rys. 2. Rezystancja wewnętrzna akumulatora sodowo-jonowego dla prądu rozładowania I_r

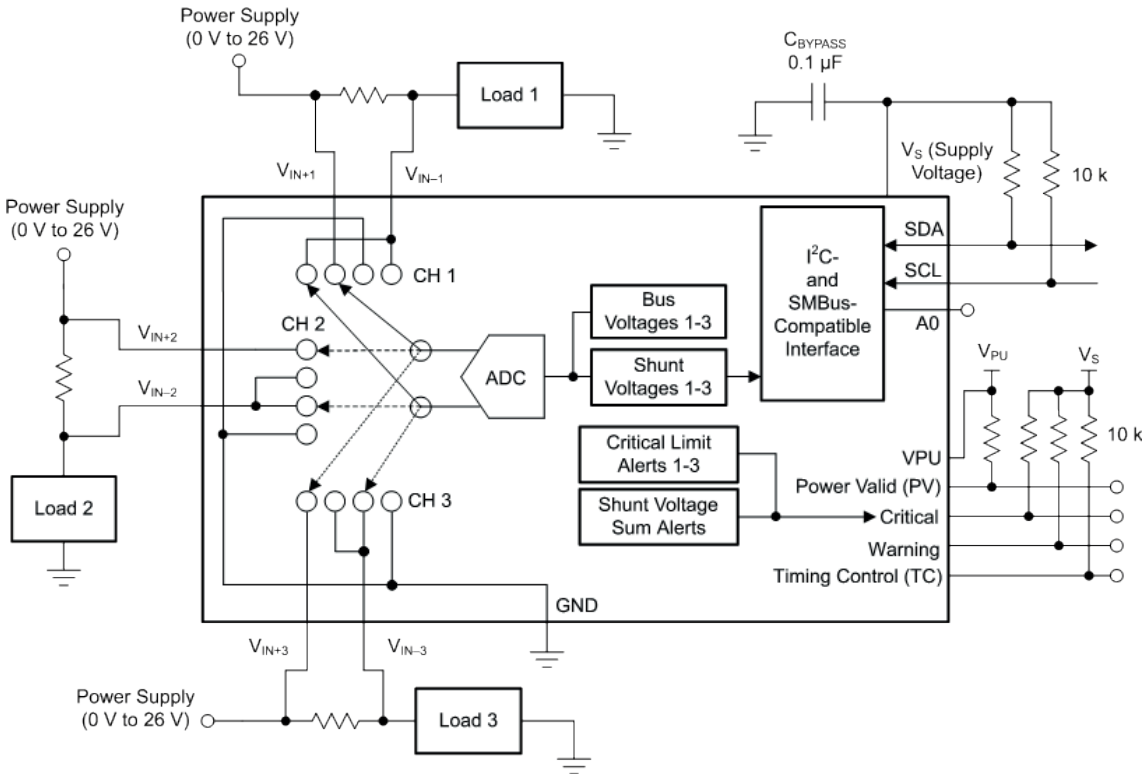
W tabeli 1 przedstawiono parametry katalogowe akumulatorów sodowo-jonowych udostępnione przez producenta. Badaniom poddano 4 akumulatory tego samego typu.

Tabela 1. Parametry katalogowe akumulatora Na 18650

Parametr	Wartość
Pojemność, q	1,3 Ah
Rezystancja wewnętrzna, R_0	< 20 mΩ
Napięcie nominalne, U_b	3,1 V
Maksymalne napięcie ładowania, U_n	3,95 V±0,05 V
Minimalne napięcie rozładowania, U_{on}	1,5 V±0,05 V
Wymiary (L*W*H)	18,4x65,3±0,1mm
Waga	30±0,5 g
Ilość cykli ładowań	3000

W celu określenia stopnia naładowania akumulatora sodowo-jonowego, możemy zastosować szereg metod bazujących na metodyce badań akumulatorów litowo-jonowych. Jedną z takich metod jest pomiar ładunku akumulatora sodowo-jonowego kulombometrem, w której w celu określenia stopnia naładowania akumulatora stosuje się układy realizujące całkowanie wartości prądu ładowania i rozładowania w czasie eksploatacji akumulatora. Taki pomiar możemy zrealizować za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) o wysokiej rozdzielczości. Do badań wykorzystano układ scalony przetwornika UI o błędzie pomiaru 0,1%, którego schemat przedstawiono na rys. 3.

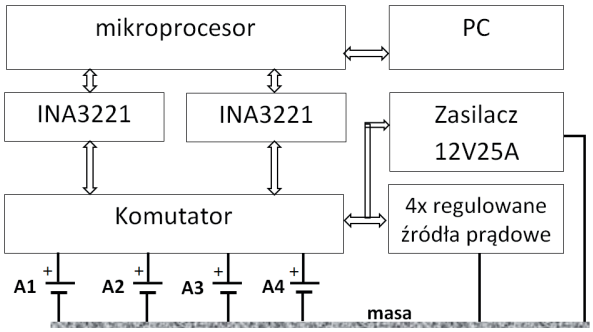
Charakterystyki prądowo-napięciowe akumulatora są uzależnione od rezystancji wewnętrznej. Duża rezystancja wewnętrzna to spadek sprawności akumulatora, mniejsza wydajność, większe wydzielanie ciepła oraz przyśpieszony proces degradacji. Ponieważ przewidywane użycie akumulatora ogranicza się do rozładowania stałym prądem wykorzystano metodę pomiaru rezystancji stałoprądowej DC akumulatora, określanej jako rezystancja wewnętrzna źródła prądowego.



Rys. 3. Przykład implementacji kulombometru do monitorowania SOC akumulatora sodowo-jonowego

Omówienie wyników badań

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 4.

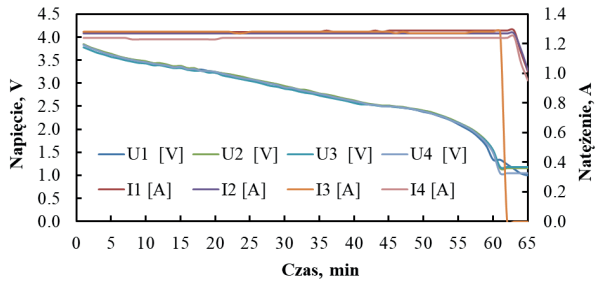


Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska do badań charakterystyk prądowo-napięciowych akumulatorów sodowo-jonowych

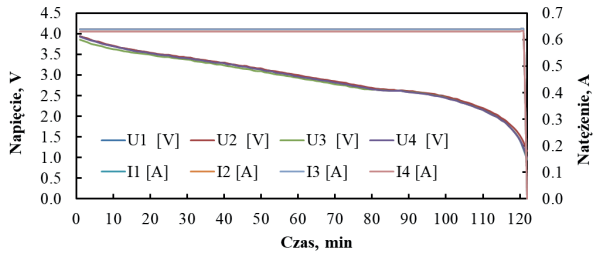
W celu określenia pojemności akumulatora należy zmierzyć jego charakterystykę prądowo-napięciową podczas rozładowywania [4,5]. Akumulatory sodowo-jonowe naładowano do napięcia nominalnego $U_n = 4{,}0$ V, a następnie przeprowadzano kontrolowane rozładowywanie prądem 1C i 0,5C. W czasie dwóch cyklów rozładowania kontrolowano napięcie akumulatorów, prąd rozładowania oraz temperaturę. Wyniki badań przedstawiono na rys. 5.÷ 8. W tym charakterystyki prądowo-napięciowe rozładowania akumulatorów sodowo-jonowych prądem 1C i 0,5C przedstawiono na rys. 5 i 6 zaś termogramy na rys. 7 i 8.

Po cyklu rozładowania prądem 1C zmierzono charakterystykę odzyskiwania napięcia przez akumulator po odłączeniu obciążenia ze względu na występowanie kondensatora spolaryzowanego C_p (rys. 9).

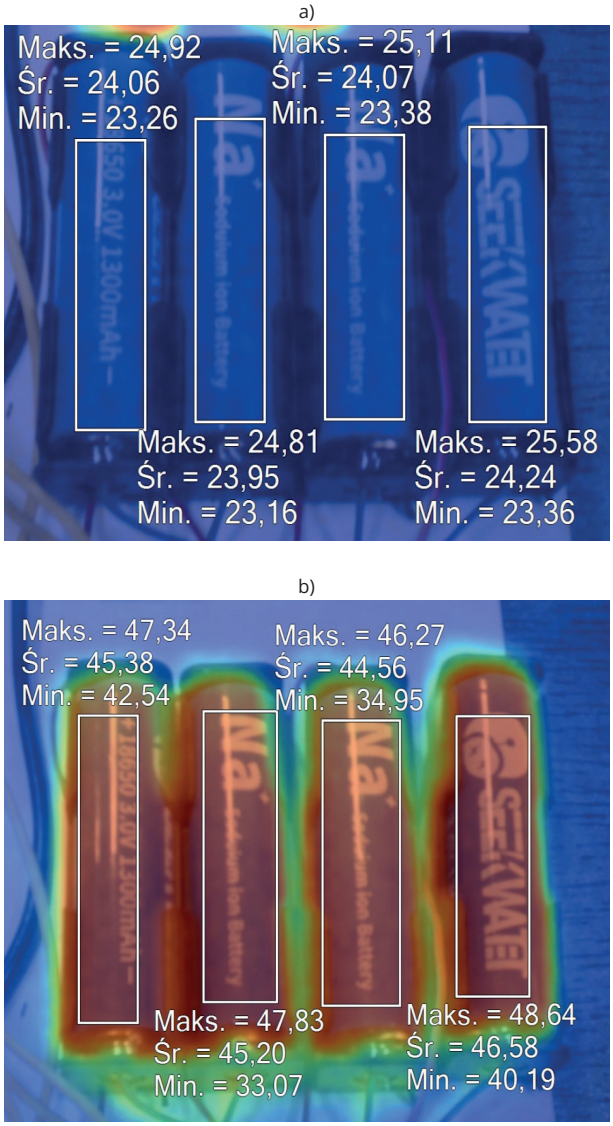
Następnie w celu dokończenia pełnego cyklu sprawdzenia pojemności akumulatorów sodowo-jonowych wykonano pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych podczas ich ładowania. Akumulatory sodowo-jonowe rozładowano do napięcia nominalnego



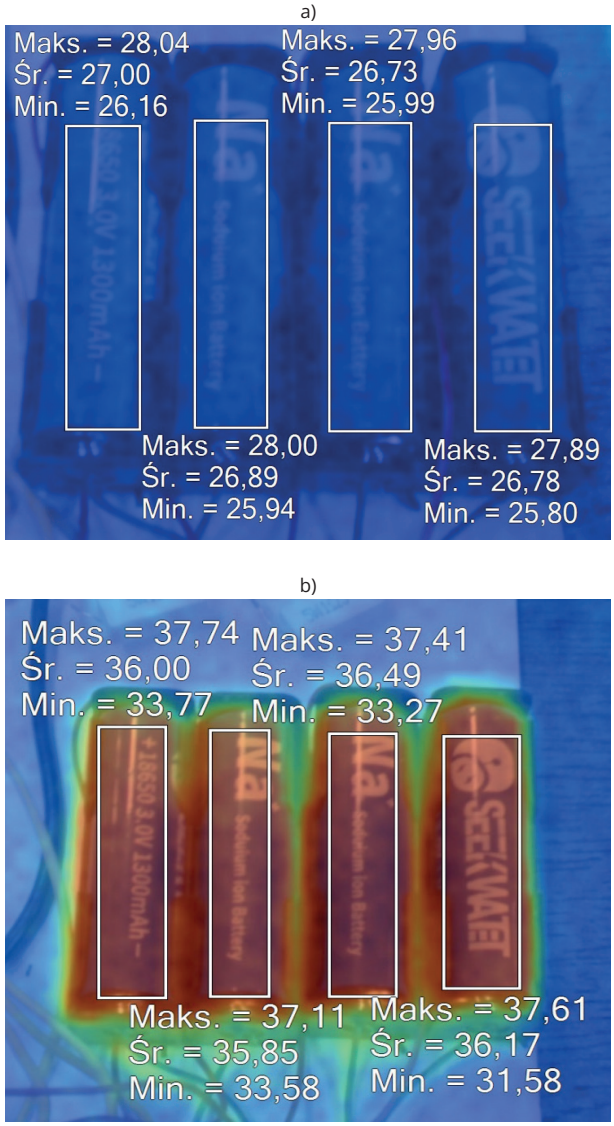
Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe rozładowania akumulatorów sodowo-jonowych prądem 1C



Rys. 6. Charakterystyki prądowo-napięciowe rozładowania akumulatorów sodowo-jonowych prądem 0,5C

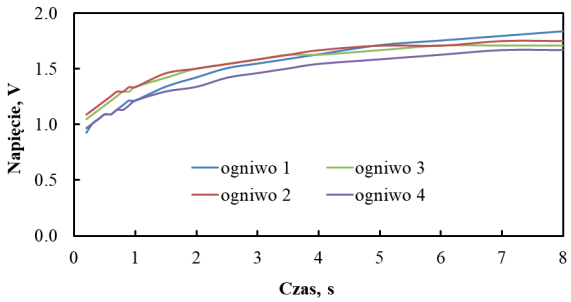


Rys. 7. Termogramy akumulatorów sodowo-jonowych podczas rozładowania prądem 1C, (a) początek rozładowania, (b) koniec rozładowania



Rys. 8. Termogramy akumulatorów sodowo-jonowych podczas rozładowania prądem 0,5C, (a) początek rozładowania, (b) koniec rozładowania

1,95 V, a następnie przeprowadzano kontrolowane ładowanie prądem 1C i 0,5C. W czasie dwóch cyklów ładowania akumulatorów kontrolowano napięcie, prąd ładowania oraz temperaturę. Wyniki badań przedstawiono na rys. 10÷ 13. W tym charakterystyki prądowo-napięciowe ładowania akumulatorów sodowo-jonowych prądem 1C i 0,5C przedstawiono na rys. 10 i 11 zaś termogramy na rys. 12 i 13.



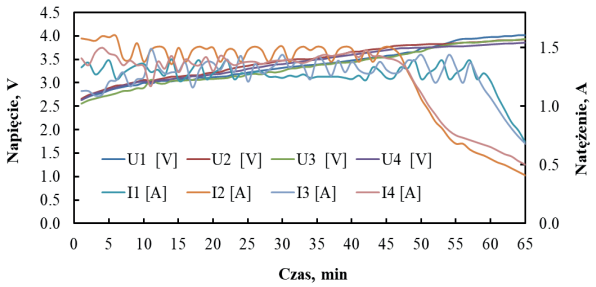
Rys. 9. Odzyskiwanie napięcia przez 4 badane akumulatory sodowo-jonowe po odłączeniu obciążenia podczas rozładowywania prądem 1C

Wyniki obliczeń i analiza wyników

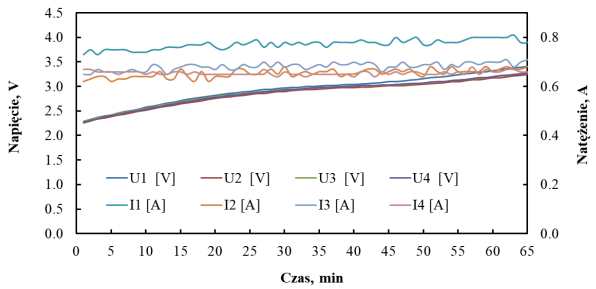
Uzyskane energie (tabela 2) podczas rozładowania akumulatorów wyliczono wg wzoru (1) i są one porównywalne dla rozładowania zarówno prądem 1C jak i 0,5C.

$$E[Wh] = \frac{\sum_{t_0=0}^{t_n=n}(U_r * I_r * \Delta t)}{n} \quad (1)$$

gdzie:
U_r – napięcie akumulatora,
I_r – prąd rozładowania,
Δt – raster próbkowania,
n – ilość próbek,
t_n – czas n-tej próbki.



Rys. 10. Charakterystyki prądowo-napięciowe ładowania akumulatorów sodowo-jonowych prądem 1C

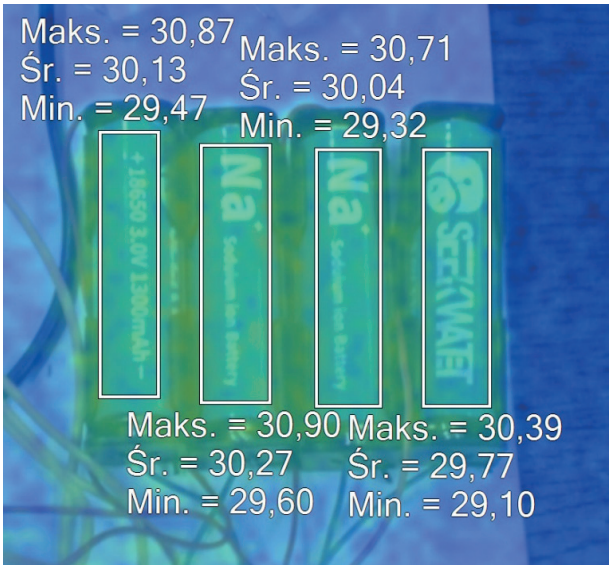


Rys. 11. Charakterystyki prądowo-napięciowe ładowania akumulatorów sodowo-jonowych prądem 0,5C

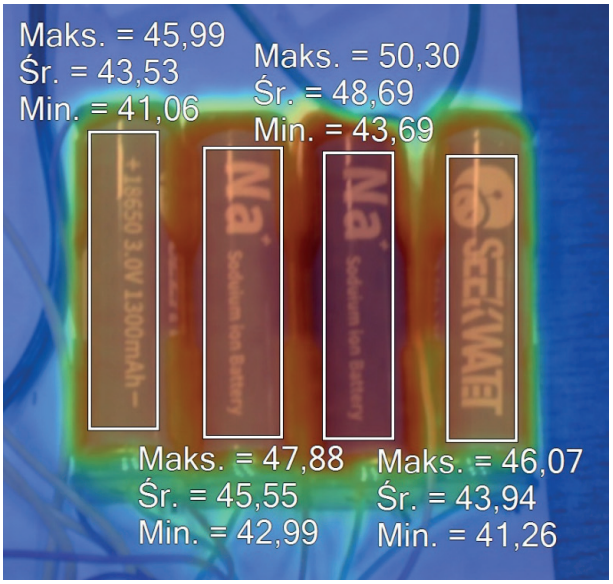
Pojemności badanych akumulatorów wyliczono według wzoru (2) i są porównywalne z pojemnością akumulatorów deklarowaną przez producenta.

$$q[Ah] = \frac{\sum_{t_0=0}^{t_n=n}(I_r * \Delta t)}{n} \quad (2)$$

a)

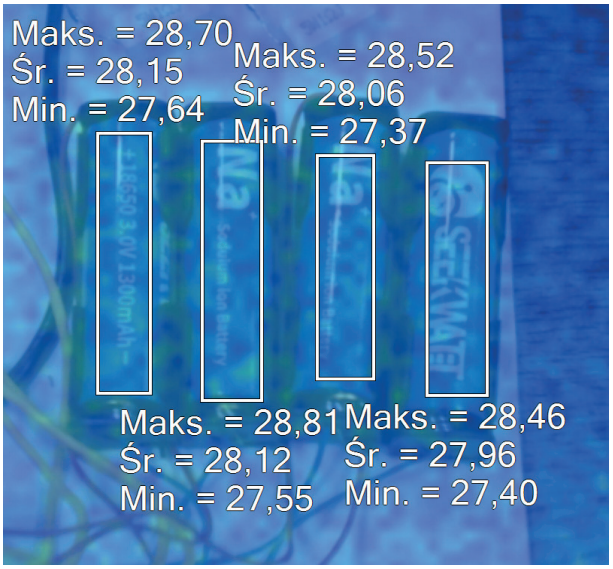


b)

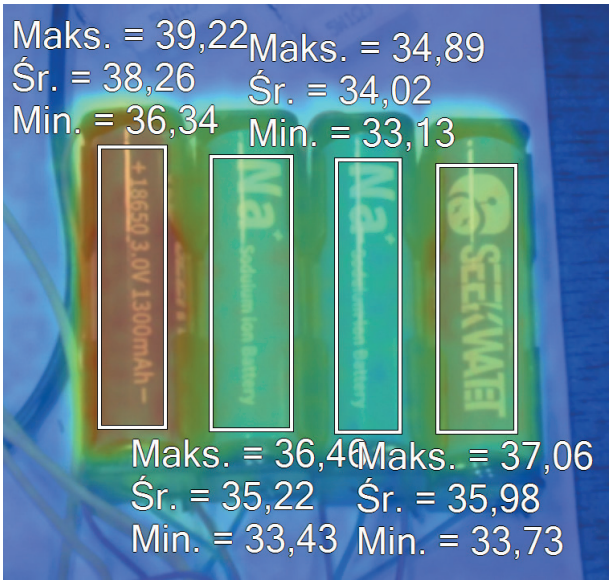


Rys. 12. Termogramy akumulatorów sodowo-jonowych podczas ładowania prądem 1C, (a) początek ładowania, (b) koniec ładowania

a)



b)



Rys. 13. Termogramy akumulatorów sodowo-jonowych podczas ładowania prądem 0,5C, (a) początek ładowania, (b) koniec ładowania

Tabela 2. Rozładowywanie akumulatorów sodowo-jonowych prądem 1C i 0,5C

AKU	I_r	U_r	U_w	t_r	E	q
nr	[A]	[V]	[V]	[min]	[Wh]	[Ah]
1C						
1	1,3	3,8	1,0	65	3,8	1,4
2	1,3	3,8	1,2	65	3,8	1,4
3	1,3	3,8	1,2	65	3,8	1,4
4	1,2	3,8	1,0	65	3,7	1,4
0,5C						
1	0,6	3,9	0,9	122	3,8	1,3
2	0,6	3,9	1,2	122	3,8	1,3
3	0,6	3,9	1,0	122	3,7	1,3
4	0,6	4,0	1,0	122	3,8	1,3

Tabela 4. Rezystancja wewnętrzna polaryzacji akumulatorów sodowo-jonowych przy prądzie 1C i 0,5C

AKU	I_r	U_n	U_r	$U_n - U_r$	R_o
nr	[A]	[V]	[V]	[V]	[mΩ]
1C					
1	1,3	4,05	3,84	0,21	162
2	1,3	4,00	3,85	0,15	115
3	1,3	4,05	3,78	0,27	208
4	1,2	4,05	3,84	0,21	175
0,5C					
1	0,6	4,00	3,94	0,06	100
2	0,6	3,99	3,94	0,05	83
3	0,6	3,94	3,86	0,08	133
4	0,6	3,99	3,93	0,06	100

Czasy ładowania akumulatorów sodowo jonowych dla prądu 1C są krótsze ze względu na wyższy prąd ładowania o około 30% (tabela 3).

Obliczono także rezystancję wewnętrzną polaryzacji R_o wg wzoru (3), która jest wyższa ≈50% przy prądzie 1C niż przy prądzie 0,5C (tabela 4). Występuje ona tylko podczas ładowania i rozładowywania akumulatora.

$$R_o = (U_n - U_r)/ I_r \quad (3) \tag{3}$$

Czas odzyskiwania napięcia po odłączeniu obciążenia przedstawiono w tabeli 5. Jest on zależny od wartości rezystancji polaryzacji Rp i wskazuje na stopień regeneracji napięcia akumulatora. Zjawisko to będzie stopniowo narastać wraz ze wzrostem liczby cykli ładowania/rozładowania akumulatorów.

Tabela 5. Czas odzyskiwania napięcia po odłączeniu obciążenia

AKU	U_w	U_{on}	t_{on}
nr	[V]	[V]	[s]
1	1,0	1,84	8
2	1,2	1,75	8
3	1,2	1,71	8
4	1,0	1,67	8

W tabeli 6 zestawiono temperatury akumulatorów sodowo-jonowych podczas rozładowania i ładowania prądem 1C i 0,5C.

Tabela 3. Ładowanie akumulatorów sodowo-jonowych prądem 1C i 0,5C

AKU	I	U_{on}	U_n	t	E
nr	[A]	[V]	[V]	[min]	[Wh]
1C					
1	1,7	2,6	4,1	47	3,2
2	1,5	2,7	4,0	47	3,1
3	1,3	2,5	4,0	57	3,2
4	1,3	2,6	4,0	57	3,1
0,5C					
1	0,7	2,3	4,1	108	2,3
2	0,7	2,3	4,0	114	2,0
3	0,7	2,3	4,0	108	2,1
4	0,7	2,3	3,9	108	2,0

Tabela 6. Temperatury akumulatorów sodowo-jonowych podczas rozładowania i ładowania prądem 1C i 0,5C.

AKU	prąd	rozładowanie		prąd	ładowanie	
nr	I [A]	T_p [°C]	T_k [°C]	I [A]	T_p [°C]	T_k [°C]
1C						
1	1,3	24	45	1,7	30	44
2	1,3	24	45	1,5	30	49
3	1,3	24	45	1,3	30	46
4	1,2	24	46	1,3	30	44
0,5C						
1	0,6	27	36	0,7	28	38
2	0,6	27	36	0,7	28	34
3	0,6	27	36	0,7	28	35
4	0,6	27	36	0,7	28	36

Podsumowanie

Uzyskane czasy t_r = 65 min rozładowania stałym prądem 1C i t_r = 122 min dla prądu 0,5C wskazują, że badane akumulatory w wielu zastosowaniach mogą zastąpić akumulatory litowo-jonowe.

Przy prądzie rozładowania 1C temperatura ogniwa wzrasta o ΔT = 21 °C, a przy prądzie rozładowania 0,5C temperatura ogniwa wzrasta o ΔT = 9 °C. Porównywalny wzrost temperatury akumulatora przy ładowaniu prądem 1C, ΔT = 24 °C, a przy prądzie 0,5C, ΔT = 6 °C. Stwarza to pewne ograniczenia w zastosowaniu jako autonomiczne źródło zasilania urządzeń mobilnych. Jednak przy zastosowaniu odpowiednich układów zarządzania i kontroli (BMS, ang. Battery Menagement System) można zapewnić bezpieczne i efektywne rozładowanie i ładowanie akumulatorów poprzez zapewnienie optymalnych warunków pracy, co przełoży się na przedłużenie żywotności akumulatorów oraz ich niezawodność w dostarczaniu energii.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych" otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe". (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018).

Przyjęto: 05.10.2025, **zaakceptowano:** 04.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Fang Y., Xiao L., Chen Z., Ai X., Cao Y., Yang H., Recent Advances in Sodium-Ion Battery Materials, Electrochemical Energy Reviews, 1 (2018), 294–323
[2] https://doi.org/10.1007/s41918-018-0008-x
[3] Iwan A., Bogdanowicz K. A., Pich R., Gonciarz A., Miedziak J., Plebankiewicz I., Przybył W., The Safety Engineering of Sodium-Ion Batteries Used as an Energy Storage System for the Military, Energies, 18 (2025), 978.
[4] Żurek-Mortka M., Gospodarczyk A., Majcher A., Kozak M., Przegląd wybranych metod diagnozowania stanu akumulatorów litowo-jonowych, Elektro.info, 6 (2021), 34
[5] Mazan B., Detka T., Eksperymentalne badanie wpływu temperatury ogniwa litowo-jonowego na pojemność i dokładność obliczeń stopnia naładowania, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, 2 (2019), 185–190
[6] Tomana M., Cipina R., Cervinka D., Vorela P., Prochazka P., Li-ion Battery Charging Efficiency, ECS Transactions, 74 (2016), 37–43.