

# Praca dyplomowa magisterska: Wyznaczanie SOC baterii z uwzględnieniem wpływu temperatury na jej pojemność nominalną

Autorka pracy: mgr inż. Aneta Słomka-Rostocka  
Promotor pracy: dr hab. inż. Jędrzej Mączak, prof. uczelni

## 1. Wprowadzenie do problemu

Pomimo istnienia na rynku od wielu lat baterie litowo-jonowe nadal stanowią wyzwanie w kontekście integracji systemowej, gdzie głównym zadaniem jest zaprojektowanie skutecznego układu zarządzania baterią (BMS). Musi on zawierać wszelkie wymagane zabezpieczenia oraz poprawnie wyznaczać stan naładowania (SOC) baterii w różnych warunkach pracy. Z tych zmiennych warunków najistotniejszym czynnikiem jest temperatura - wraz z nią zmianie ulega również pojemność potrzebna do wyznaczania SOC. Badania konieczne do charakteryzacji zachowania ogniw zazwyczaj przeprowadzane są w stałych warunkach w komorach klimatycznych. Sama temperatura ogniwa ulega zmianie podczas nich. Próbuując określić parametry systemu w ten sposób nie otrzymuje się dokładnych wyników. Poprawnym podejściem podczas badań, co zostało udowodnione w tej pracy, jest bezpośrednie wpływanie na temperaturę ogniwa.

## 2. Cel pracy

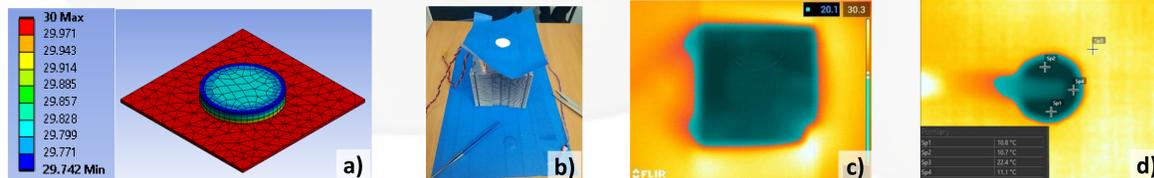
Celem pracy było opracowanie algorytmów wyznaczających SOC baterii Li-ion z uwzględnieniem wpływu temperatury oraz ich eksperymentalna weryfikacja.

## 3. Zakres pracy

- Budowa stanowiska badawczego zapewniającego stabilność temperaturową procesu oraz implementacja jego oprogramowania
- Przeprowadzenie badań nad wpływem temperatury na pojemność baterii
- Przeprowadzenie badań nad baterią Li-ion w różnych warunkach temperaturowych
- Opracowanie i implementacja algorytmów szacujących SOC baterii
- Testy algorytmów

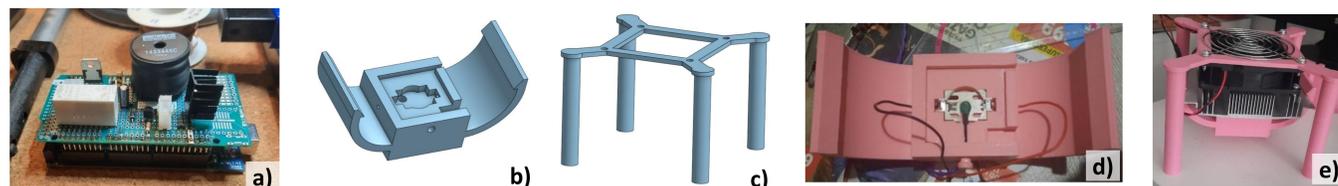
## 4. Temperatura ogniwa stabilizowanego z pomocą modułu Peltiera

Aby ogniwo utrzymywało stałą temperaturę w całej objętości, a jego badanie było bezpieczne wybrano ogniwo guzikowe formatu 2032, dla którego stosunek powierzchni do masy jest najkorzystniejszy. Przed budową stanowiska wykonaną prostą symulacją MES grzania z pomocą modułu Peltiera przyłożonego z jednej strony ogniwa (rys. a), która potwierdziła założenie o jednolitej temperaturze. Symulację zweryfikowano termowizją (rys. b-d).



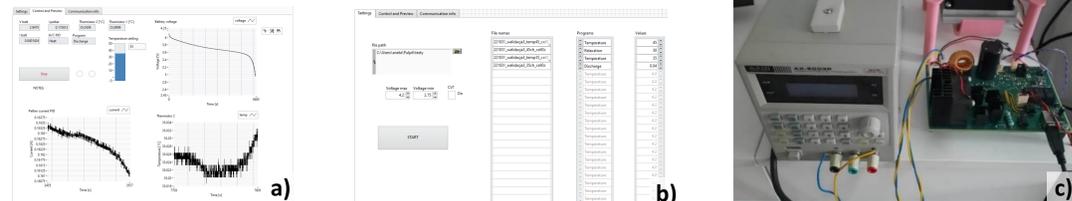
## 5. Stanowisko badawczo-pomiarowe

Podczas pracy przejściowej zbudowano układ obniżający napięcie służący do sterowania modułem Peltiera (rys. a). Niestety w układzie występowały zakłócenia i za wysokie zmiany natężenia prądu przez zbyt niską częstotliwość PWM. Z racji konieczności przeprowadzania długotrwałych testów układ został zmieniony na inny, skuteczniejszy z precyzyjnym źródłem prądowym. Do stanowiska zaprojektowano i wydrukowano uchwyty na baterię z termistorem (rys. b, d) oraz platformę (rys. c). Złożony układ z Peltierem, radiatorem i wentylatorem przedstawia rys. e.



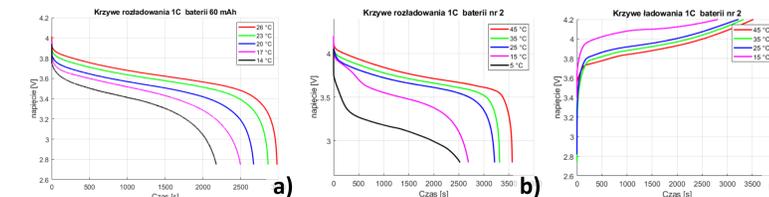
## 6. Oprogramowanie stanowiska

Płytkę została dostarczona z podstawowymi sterownikami do środowiska LabVIEW: rozpoczęcie komunikacji, odbiór danych, wysyłanie instrukcji. Pomiary uwzględniały: napięcia baterii, prądu baterii, prądu Peltiera, napięcia termistorów 1 i 2. Z kolei wysyłane nastawy obejmowały: prąd baterii, prąd modułu i tryb Peltiera, obciążenie/zasilanie baterii. Zmontowane stanowisko przedstawia rys. c. Zaimplementowano stabilizację temperatury, rozładowanie, ładowanie w trybach stałoprądowym (CC) i stałonapięciowym (CV), relaksację. W trybach pracy CV oraz stabilizacji temperatury zastosowano regulatory PID. Ostatecznie dodano akwizycję danych pomiarowych z wykorzystaniem kolejkowania oraz automatyczną sekwencję programów pozwalającą na całonocne testy bez nadzoru. Panele programu przedstawione są na rys. a-b.



## 7. Badania

Wykonano dwa zestawy badań: co 3°C na wąskim zakresie temperatury oraz co 5°C na szerokim zakresie temperatury dla trzech próbek. Pierwsze z nich udowodniły postawioną tezę, że zmiana temperatury ogniwa o ±2°C prowadzi do znaczącej zmiany w pojemności ogniwa. Druga seria badań posłużyła za dane wejściowe do algorytmów estymacji SOC. Badana ograniczono do testów stałoprądowych o wartości natężenia prądu 1C. Wykonano ok. 300 testów.



Proces/Temperatur	14°C	17°C	20°C	23°C	26°C
Ładowanie [mAh]	36.50	41.86	45.09	48.19	50.20
Rozładowanie [mAh]	36.16	41.60	46.85	47.65	49.77

Ogniwo	Proces/Temperatur	45°C	35°C	25°C	15°C	5°C
1	Ładowanie [mAh]	39.61	37.37	35.56	27.08	-
	Rozładowanie [mAh]	39.50	37.31	35.43	26.40	24.46
2	Ładowanie [mAh]	40.24	37.01	35.95	30.67	-
	Rozładowanie [mAh]	40.11	36.91	35.81	29.87	28.16
3	Ładowanie [mAh]	40.48	39.76	35.96	31.25	-
	Rozładowanie [mAh]	40.33	39.64	35.83	30.50	30.03

## 8. Wybrane algorytmy estymacji SOC

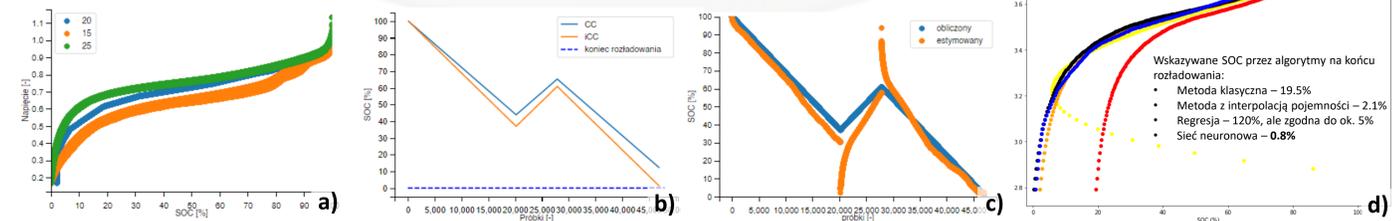
Do estymacji SOC wybrano 4 algorytmy: metodę amperogodzinową klasyczną, amperogodzinową z interpolacją pojemności, model regresji oraz sieć neuronową. Metoda klasyczna służyła jako weryfikacja pojemności w stałych warunkach. Druga metoda uwzględniła zmianę pojemności wraz z temperaturą. Sztuczną sieć neuronową skonfigurowano na podstawie doświadczeń z pracy inżynierskiej - dobrano sieć z trzema warstwami neuronów. W przypadku modelu regresji z uwagi na zależność pomiędzy napięciem i temperaturą ogniwa utworzono mieszane cechy, czyli składniki wielomianu - potęgi oraz iloczyn napięcia i temperatury.

- Metoda amperogodzinowa „klasyczna”  
$$SOC = SOC_{pocz} - \frac{\int_{t_1}^{t_2} \text{natężenie prądu}(t) \cdot dt}{\text{pojemność}_{nom}} \cdot 100 [\%]$$
- Metoda amperogodzinowa z interpolacją pojemności  
$$SOC = SOC_{pocz} - \frac{\int_{t_1}^{t_2} \text{natężenie prądu}(t) \cdot dt}{\text{pojemność}(temp)} \cdot 100 [\%]$$
- Model regresji  
$$SOC = f(\text{temp}, \text{napięcie}, \dots)$$
- Sieć neuronowa  
$$SOC = f(\text{temp}, \text{napięcie}, \dots)$$

## 9. Przykładowe rezultaty

Do walidacji przeprowadzono 6 dodatkowych badań: w innej temperaturze, ładowanie oraz rozładowanie oraz rozładowanie z przerwą na zmianę temperatury, całkowite rozładowanie po częściowym rozładowaniu i ładowaniu.

Poniżej zestawione są wyniki dla algorytmów podczas badania w 20°C (pomiędzy 15°C a 25°C, rys. d). Najlepiej poradziły sobie metody z interpolacją oraz sieć. Sieć bez problemu pokrywała zakres temperatury pomiędzy punktami, dla których przeprowadzono badania (rys. a; badania w 15°C i 25°C, wywnioskowane 20°C). Metoda z interpolacją najlepiej działała w przypadku zmiennego kierunku prądu (rys. b), kiedy sieć neuronowa skonstruowana jedynie na podstawie napięcia i temperatury nie sprawdziła się podczas stanów przejściowych, w których problemem jest napięcie polaryzacji (rys. c).



## 10. Podsumowanie i wnioski

- Przeanalizowano zagadnienie (46 pozycji literaturowych)
- Wykonano analizę MES chłodzonego ogniwa oraz badanie termowizyjne
- Zbudowano stanowisko badawczo-pomiarowe i zaimplementowano oprogramowanie
- Wykonano ok. 300 testów
- **Zaimplementowano 4 algorytmy szacowania SOC**
- **Zwalidowano opracowane algorytmy**

- Zmiana temperatury ± 2°C prowadzi do znaczącej zmiany pojemności ogniwa
- Badane ogniwa zmieniały swoją pojemność nawet o 40% wraz z temperaturą
- Klasyczna metoda ze stałą pojemnością prowadzi do błędów w estymacji SOC na poziomie 20%
- Interpolacja pojemności prawie zawsze poprawnie estymowała SOC lub znacznie poprawiała wynik względem klasycznej metody
- Model regresji działa prawidłowo jedynie na ograniczonym zakresie
- Sieć neuronowa doskonale radzi sobie poza zakresem danych uczących. Należałoby udoskonalić sieć o sygnał napięcia polaryzacji z modelu elektrycznego (ECM) lub w przypadku wolnozmiennych profili obciążeń połączyć ją z metodą amperogodzinową z interpolacją pojemności
- W przyszłości propozycja implementacji stanowiska dla ogniw cylindrycznych (rys. powyżej)

