

MIŁOSZ KORDUŁA

Uniwersytet WSB Merito w Poznaniu

Wydział Zamiejscowy w Chorzowie

e-mail: mkordulaa@gmail.com

Projekt i implementacja urządzenia do diagnostyki akumulatorów litowych z wykorzystaniem spektroskopii impedancji¹

Streszczenie. Celem niniejszego artykułu jest zaprojektowanie oraz implementacja systemu obejmującego urządzenie i oprogramowanie do kontrolowanego rozładowywania i analizy akumulatorów. Dodatkowym celem jest opracowanie oprogramowania do analizy zebranych danych. Urządzenie ma pozwalać na rozładowywanie ogniw stałym prądem oraz wykonywanie spektroskopii impedancji (ang. *Electrochemical impedance spectroscopy* — EIS), a oprogramowanie powinno generować wartości i wykresy parametrów pozwalające na łatwe porównywanie akumulatorów. Cele zostały osiągnięte, a powstałe rozwiązanie prototypowe może być podstawą do wdrożenia jako produkt.

Słowa kluczowe: akumulator, elektromobilność, spektroskopia impedancji, impedancja wewnętrzna, dyfuzja, przeniesienie ładunku, ESP32

<https://doi.org/10.58683/dnswsb.2111>

1. Wprowadzenie

Obecnie globalna produkcja akumulatorów litowych rozwija się dynamicznie. Zapotrzebowanie ciągle rośnie, a ceny spadają. Ze sprawozdań opublikowanych przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (IEA) wynika, że w 2024 roku światowe roczne zapotrzebowanie przekroczyło 1 terawatogodzinę (TWh), co oznacza ponad 20-procentowy wzrost w porównaniu do roku poprzedniego (Lombardo i in., 2025). Kolejne nowo powstające fabryki zwiększają konkurencję oraz stwarzają potrzebę do porównywania akumulatorów różnych producentów, ponieważ sami producenci często podają tylko lakoniczne informacje na temat parametrów wytwarzanych ogniw. Do tego potrzebne są urządzenia, tzw. testery, które pozwa-

¹ Artykuł został przygotowany na podstawie pracy magisterskiej autora pt. „Urządzenie do analizy akumulatorów”, napisanej pod kierunkiem dr. inż. Mariusza Mola.

lają na sprawdzenie powtarzalności parametrów, efektów starzenia, możliwości pobierania mocy czy nawet analizę reakcji zachodzących wewnątrz ogniw.

W artykule zaprezentowano projekt i implementację urządzenia oraz oprogramowania przeznaczonego do testowania akumulatorów litowych. Opracowany prototyp umożliwia zarówno rozładowywanie ogniw stałym prądem, jak i wykonywanie pomiarów spektroskopii impedancji elektrochemicznej (EIS). Integralnym elementem rozwiązania jest dedykowane oprogramowanie, które automatycznie przetwarza i analizuje zebrane dane pomiarowe. System generuje zestaw parametrów oraz wykresów umożliwiających szybką ocenę podstawowych parametrów (takich jak pojemność, rezystancja wewnętrzna czy charakterystyki impedancyjne), a także bezpośrednio porównywanie wyników pomiędzy różnymi ogniwami. Dzięki temu proces testowania jest znacznie przyspieszony i mniej podatny na błędy wynikające z ręcznego opracowywania danych.

Opracowane rozwiązanie charakteryzuje się niskim kosztem, wykorzystaniem ogólnodostępnych komponentów (m.in. mikrokontrolera ESP32) oraz otwartą architekturą umożliwiającą dalsze rozszerzenia funkcjonalności. Prototyp urządzenia może stanowić podstawę do opracowania pełnoprawnego produktu przeznaczonego do badań laboratoryjnych, testów przemysłowych, a nawet zastosowań edukacyjnych, gdzie ważne są zarówno możliwości analityczne, jak i przystępna cena.

2. Przegląd literatury i tło teoretyczne

Współczesne akumulatory, będące kluczowym elementem rozwoju elektromobilności oraz urządzeń przenośnych, charakteryzują się szeregiem parametrów technicznych. Do najistotniejszych należą: napięcie nominalne, pojemność, stan naładowania (SoC), stan techniczny (SoH), maksymalne prądy ładowania i rozładowania, zakres temperatur pracy, tempo samorozładowania, liczba cykli życia oraz opór wewnętrzny. Jak wskazuje Lombardo i in. (2025), obecna faza rozwoju przemysłu akumulatorowego koncentruje się na poprawie nie tylko parametrów eksploatacyjnych, ale także diagnostycznych. Szczególną uwagę zwraca się na akumulatory litowo-jonowe, które oferują najwyższą gęstość energii i mocy, a jednocześnie zapewniają duży potencjał dalszego rozwoju.

2.1. Pojemność

Pojemność akumulatora definiuje się jako zdolność do magazynowania ładunku elektrycznego, wyrażaną najczęściej w miliamperogodzinach (mAh). Jednak, jak zauważają Torabi i Ahmadi (2019), jest to parametr umowny i zależy od warunków

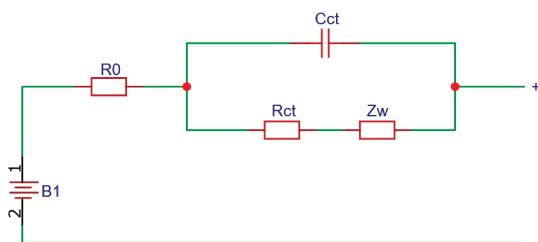
pomiarowych, takich jak prąd obciążenia czy napięcie graniczne. Efektywna pojemność użytkowa zmienia się w zależności od sposobu użytkowania ogniwa — np. w trybie pulsacyjnym różnice względem wartości nominalnej mogą być istotne. Dodatkowym parametrem jest faktyczna ilość energii możliwej do wykorzystania, która jest iloczynem ładunku oraz napięcia ogniwa. Oznacza to, że dwa akumulatory o tej samej pojemności mogą dostarczać różną ilość energii, jeśli różnią się napięciem nominalnym. Ponadto, spadek napięcia wynikający z oporu wewnętrznego oraz charakterystyki rozładowania powoduje, że użyteczna energia dostępna dla odbiornika jest mniejsza od energii teoretycznie zmagazynowanej w ogniwie.

2.2. Napięcie

Napięcie nominalne jest wielkością umowną, charakterystyczną dla danego typu akumulatora — dla ogniw litowo-jonowych wynosi ono około 3,6–3,7 V. Natomiast napięcie spoczynkowe (Open Circuit Voltage, OCV) jest bardziej miarodajne i zmienia się w zależności od poziomu naładowania. Jak zauważa Angenedt (b.d.), napięcie spoczynkowe rozładowanego ogniwa litowo-jonowego może wynosić 2,8–3 V, a w pełni naładowanego — 4,2–4,35 V. Zmiana napięcia jest nieliniowa i stanowi podstawę do szacowania poziomu SOC w wielu systemach zarządzania energią.

2.3. Opór wewnętrzny

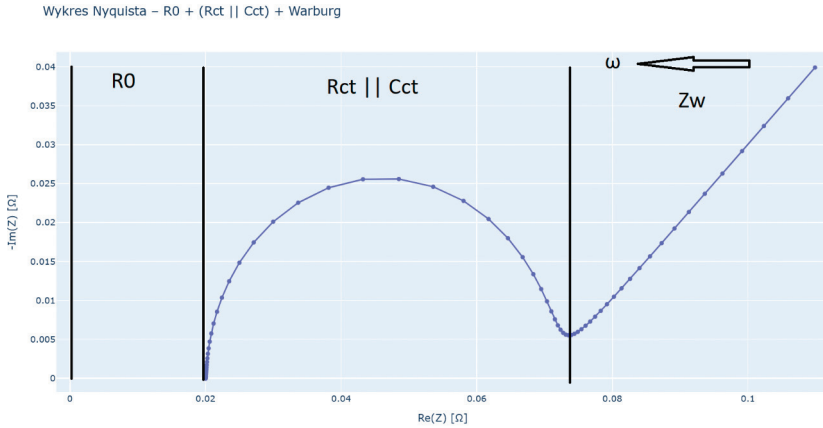
Opór wewnętrzny (Equivalent Series Resistance, ESR) to pojęcie obejmujące zarówno czysto rezystancyjne straty energii, jak i komponenty dynamiczne wynikające ze złożonych procesów elektrochemicznych. Jak opisali to Agubra i Fergus (2014), ESR obejmuje rezystancję elektrod, interfejsów, elektrolitu, a także składowe dyfuzyjne i pojemnościowe. Do opisu zachowania akumulatora w dziedzinie częstotliwości stosuje się modele zastępcze (rys. 1) uwzględniające cztery podstawowe elementy: R_0 — opór przewodzenia (dla wysokich częstotliwości),



Rys. 1. Uproszczony model akumulatora litowo-jonowego
Źródło: Opracowanie własne

R_{ct} — opór transferu ładunku (dominujący w zakresie Hz do setek Hz) (Bao i Gong, 2023), C_{ct} — pojemność interfejsu elektrodowego, oraz Z_w — impedancję Warburga, która opisuje ograniczenia związane z dyfuzją jonów (Warburg impedance, b.d.).

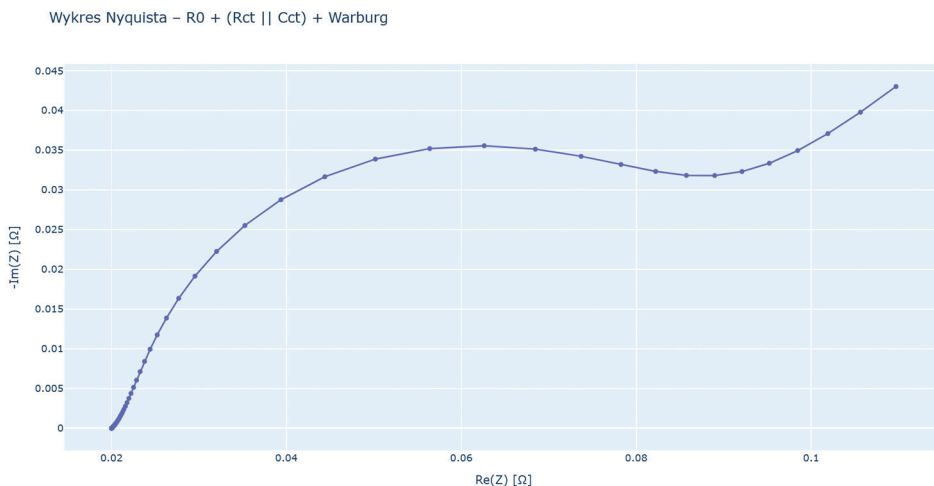
Charakterystyczne cechy poszczególnych komponentów można prześledzić na wykresie Nyquista (rys. 2).



Rys. 2. Wykres Nyquista dla modelu z rys. 1. z przykładowymi parametrami
Źródło: Opracowanie własne

Jak opisali to Wang i in. (2020), przy wysokich częstotliwościach dominuje R_0 (część rzeczywista impedancji), przy częstotliwościach pośrednich pojawia się półokrąg odpowiadający parze R_{ct} i C_{ct} , a przy niskich częstotliwościach impedancja dyfuzyjna generuje nachyloną linię odpowiadającą zachowaniu typu Warburga. W praktyce — jak pokazuje analiza Bao i Gong (2023) — rozdzielenie komponentów impedancji może być trudne, zwłaszcza gdy zakresy częstotliwości nakładają się, co utrudnia interpretację.

Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) umożliwia ocenę kondycji akumulatora bez konieczności jego pełnego rozładowania lub niszczenia. Spektroskopia impedancji polega na wymuszaniu prądu przemiennego i sprawdzaniu odpowiedzi napięciowej dla różnych częstotliwości. Bezpośrednimi wynikami są amplitudy napięcia oraz przesunięcia fazowe zależne od wejściowej częstotliwości. Jak wskazują Lazanas i Prodromidis (2023), EIS pozwala śledzić zmiany parametrów układu w czasie, a nawet wykrywać początkowe symptomy degradacji, zanim wpłyną one na funkcjonowanie systemu. Dzięki temu metoda ta znajduje zastosowanie zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i w przemysłowych systemach BMS.



Rys. 3. Wykres Nyquista dla modelu z rys. 1. z większą pojemnością C_{ct} względem rys. 2.
Źródło: Opracowanie własne

2.4. Diagnostyka i modelowanie akumulatorów

Jak wskazują Wang i in. (2020), modelowanie impedancji ogniów w oparciu o pomiary EIS stanowi podstawę do tworzenia zaawansowanych systemów diagnostycznych, w tym również modeli predykcyjnych SoH. Analiza wyników pomiarowych z wykorzystaniem FFT wymaga jednak odpowiedniego przygotowania danych oraz właściwego doboru okna analitycznego, co podkreślono w Understanding FFTs and Windowing (b.d.). Dodatkowo, w celu walidacji pomiarów, przydatne okazują się oscyloskopy wysokiej klasy, takie jak PicoScope 2208B (Pico Technology, b.d.), oraz dokumentacja projektowa dotycząca czujników prądowych (Hill i in., 2023), pozwalająca na precyzyjne oszacowanie charakterystyk dynamicznych układu.

2.5. Mikrokontrolery i podzespoły sprzętowe

Do realizacji pomiarów wykorzystuje się obecnie mikrokontrolery o dużej mocy obliczeniowej i możliwościach komunikacyjnych. Szczególnym zainteresowaniem cieszy się układ ESP32-S3 (ESP32-S3-WROOM-1 datasheet, b.d.), oferujący interfejsy cyfrowe i analogowe oraz wsparcie dla środowisk programistycznych MicroPython (MicroPython, b.d.). W torze pomiarowym zastosowanie znajdują m.in. przetwornik ADC Texas Instruments ADS1256 (Texas Instruments, b.d.a), DAC MCP4725 (MicroChip, b.d.), wzmacniacz operacyjny LM358 (Texas Instruments, b.d.b) czy tranzystor IRF540N (International Rectifier, b.d.). Wszystkie te komponenty opisa-

ne są szczegółowo w dokumentacjach technicznych producentów i projektowane w środowiskach takich jak EasyEDA (EasyEDA, b.d.).

2.6. Narzędzia programistyczne i analityczne

Do analizy danych pomiarowych i wizualizacji wyników używa się obecnie wysokopoziomowych środowisk programistycznych. Kod źródłowy najczęściej tworzony jest w Pythonie 3.10 (Python Software Foundation, 2021), z wykorzystaniem bibliotek takich jak NumPy (NumPy, b.d.), SciPy (SciPy, b.d.), Plotly (Plotly, b.d.) oraz narzędzi do przetwarzania sygnałów. Do programowania urządzeń wykorzystuje się edytory takie jak Visual Studio Code (Visual Studio Code, b.d.). Pozwala to na stworzenie kompleksowego pipeline'u analitycznego obejmującego: odczyt danych z CSV, ich filtrację, wykonanie FFT oraz wizualizację wyników w formie wykresów Nyquista i czasowo-prądowych.

2.7. Przykładowe ogniwo badawcze

W ramach testów zastosowano ogniwo CR2Z firmy Panasonic (CR2Z, b.d.), będące przykładem pierwotnego ogniwa litowego. Parametry katalogowe tego typu baterii pozwalają na jednoznaczne porównanie danych eksperymentalnych z wartościami referencyjnymi oraz na ocenę dokładności zastosowanego toru pomiarowego.

3. Metodyka badań

3.1. Założenia projektowe urządzenia

Celem badań było zaprojektowanie kompletnego systemu umożliwiającego pomiar podstawowych parametrów akumulatorów – takich jak pojemność użytkowa, napięcie spoczynkowe (OCV) oraz, przede wszystkim, charakterystyka impedancyjna pozwalająca określić stan techniczny (SoH) badanych ogniw. Proces badawczy został podzielony na dwa etapy: fizyczne pomiary z użyciem urządzenia testującego oraz analizę wyników w środowisku aplikacji komputerowej. Projektowane urządzenie powstało jako modułarny system pomiarowy, przystosowany do przeprowadzania procesu rozładowywania akumulatora prądem o zadanym profilu, bieżącego pomiaru napięcia i prądu oraz rejestracji danych pomiarowych. Kluczowym założeniem była możliwość wykonania spektroskopii impedancji elektrochemicznej (EIS) w zakresie niskich częstotliwości, co umożliwia dokładną charakterystykę dynamiczną badanego ogniwa. Rozładowanie odbywało się za

pomocą programowalnego źródła prądowego zrealizowanego w oparciu o przetwornik cyfrowo-analogowy DAC, który sterował tranzystorem MOSFET.

Sygnały prądowe i napięciowe były próbkowane z wykorzystaniem 24-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC), co zapewniało wysoką rozdzielczość i precyzję pomiaru. Dane pomiarowe buforowano w pamięci operacyjnej i cyklicznie zapisywano na karcie microSD, co zabezpieczało wyniki przed utratą w przypadku awarii zasilania i umożliwiało analizę offline. Całość została uzupełniona o wyświetlacz graficzny, który dostarczał operatorowi aktualnych informacji o stanie pomiaru, napięciu ogniwa oraz ewentualnych błędach.

3.2. Zakres i tryb pracy urządzenia

Przebieg badań obejmował cykliczne testy akumulatorów w ustalonym schemacie operacyjnym. Na początku ustalano napięcie spoczynkowe ogniwa (OCV), po czym następowało jego rozładowanie stałym prądem do minimalnego, bezpiecznego napięcia progowego. W kluczowych momentach rozładowania wykonywano pomiary impedancji elektrochemicznej w zakresie częstotliwości od 0,01 Hz do 10 Hz. Taka procedura pozwalała na odwzorowanie zmian charakterystyki impedancyjnej w funkcji stanu naładowania, umożliwiając tym samym estymację parametrów stanu technicznego akumulatora (SoH).

3.3. Założenia aplikacji analitycznej

Dane zarejestrowane przez urządzenie były przetwarzane w aplikacji komputerowej opracowanej w języku Python. Program umożliwiał odczyt plików CSV zawierających wyniki pomiarów, ich filtrację, interpolację oraz analizę sygnałów prądowo-napięciowych z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Na podstawie wyników wyznaczano złożoną impedancję $Z(f)$ dla każdej z testowanych częstotliwości oraz dopasowywano parametry uproszczonego modelu obwodu równoważnego, składającego się z rezystancji szeregowej oraz równoległego połączenia rezystora i kondensatora. Interfejs aplikacji umożliwiał graficzną prezentację wyników w postaci wykresów Nyquista oraz wizualizacji zmian parametrów impedancji względem rozładowanej pojemności. Dodatkowo przewidziano możliwość eksportu danych oraz porównywania wyników z różnych sesji pomiarowych.

3.4. Walidacja metody

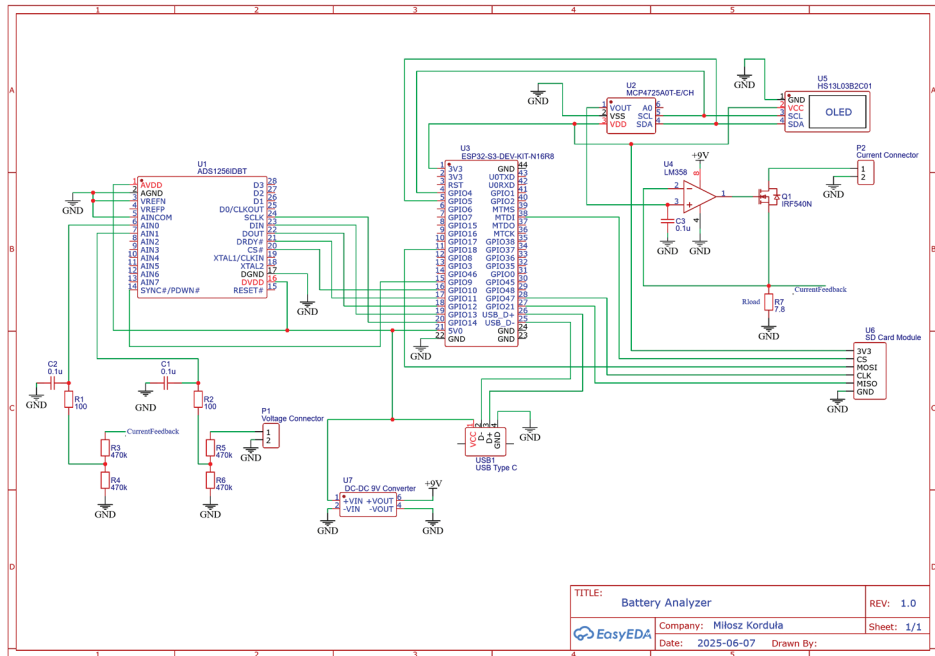
W celu potwierdzenia poprawności działania całego systemu pomiarowego metodyka badań obejmowała również etap walidacji, prowadzony równoległe dla części sprzętowej i programowej. Testy przeprowadzono zarówno z użyciem rzeczywistych akumulatorów, jak i sztucznych sygnałów wejściowych, co pozwalało wykrywać błędy wynikające z nieprawidłowego przetwarzania danych lub zakłóceń sprzętowych. Dodatkowo weryfikowano zgodność reakcji rzeczywistego ogniwa na zadane obciążenie. W symulacji komputerowej wygenerowano model ogniwa wykorzystujący szeregowo połączone źródło napięciowe, rezystancję szeregową oraz rezystancję transferu ładunku połączoną równoległe z pojemnością transferu ładunku. Do walidacji wykorzystano oscyloskop cyfrowy, umożliwiający precyzyjny pomiar napięcia w czasie rzeczywistym, co pozwoliło na porównanie rzeczywistych wykresów napięcia z przebiegami uzyskanymi na podstawie dopasowanego modelu matematycznego.

4. Opis rozwiązania

W celu realizacji założeń przedstawionych w metodyce zaprojektowano kompleksowe rozwiązanie techniczne, obejmujące zarówno część sprzętową, jak i oprogramowanie mikrokontrolera oraz aplikację do analizy danych. Całość została zbudowana z wykorzystaniem dostępnych płytek deweloperskich i komponentów elektronicznych dobranych pod kątem niezawodności i łatwości integracji.

4.1. Projekt układu elektronicznego

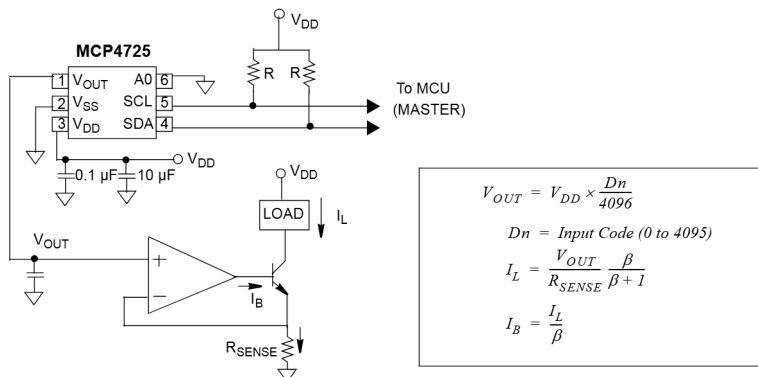
Sercem układu elektronicznego (rys. 4) jest mikrokontroler ESP32-S3-WROOM-1 z 16 MB pamięci flash oraz 8 MB PSRAM, osadzony na płycie ESP32-DEVKIT-N16R8. Układ ten odpowiada za sterowanie źródłem prądowym, akwizycję danych, komunikację z kartą microSD, obsługę wyświetlacza oraz realizację logiki pomiarowej.



Rys. 4. Kompletny schemat elektroniczny

Źródło: Opracowanie własne, wykorzystano program EasyEDA (EasyEDA, b.d.)

Do pomiaru napięcia i prądu wykorzystano wysokoprecyzyjny, 24-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy ADS1256 firmy Texas Instruments. Pomiar napięcia ogniwa odbywa się niezależnie od pomiaru prądu, co pozwala zachować dokładność nawet przy dynamicznych zmianach obciążenia.



Rys. 5. Przykład cyfrowo sterowanego źródła prądowego

Źródło: Dokumentacja MCP4725 (Microchip, b.d.)

Źródło prądowe (rys. 5) zostało zrealizowane na bazie przetwornika cyfrowo-analogowego MCP4725 firmy Microchip, wzmacniacza operacyjnego LM358 oraz tranzystora MOSFET IRF540N. Rolę elementu pomiarowego odgrywa układ RSENSE, składający się z dwóch rezystorów $3,9\ \Omega$ o mocy 5 W, połączonych szeregowo. Taki układ pozwala na uzyskanie kontrolowanego prądu rozładowania o zadanym przebiegu. Dodatkowo w obwodzie pomiarowym zastosowano złącze czteropunktowe (tzw. połączenie Kelvina), które umożliwia niezależny pomiar napięcia i prądu bez wpływu rezystancji przewodów.

Cały układ zasilany jest z przetwornicy step-up, a dane zapisywane są na karcie microSD. Obecność wyświetlacza umożliwia prezentację aktualnych parametrów pracy w czasie rzeczywistym, a w przypadku braku ogniwa urządzenie sygnalizuje ten fakt odpowiednim komunikatem.

4.2. Oprogramowanie mikrokontrolera

Oprogramowanie zostało napisane w języku MicroPython i podzielone na kilka modułów odpowiedzialnych za różne funkcjonalności. Plik main.py pełni funkcję głównego kontrolera, który inicjalizuje wszystkie komponenty, kontroluje przebieg rozładowania, steruje źródłem prądowym i zapisuje dane. Moduł io_control.py obsługuje przetwornik ADC i DAC, zapewniając dokładne próbkowanie i generację sygnałów sterujących. Plik sd_control.py odpowiada za buforowanie danych i zapis na kartę pamięci, a display.py obsługuje wyświetlacz (rys. 6), pokazując aktualne parametry pomiarowe.



Rys. 6. Przykład danych wyświetlanych na ekranie
Źródło: Opracowanie własne

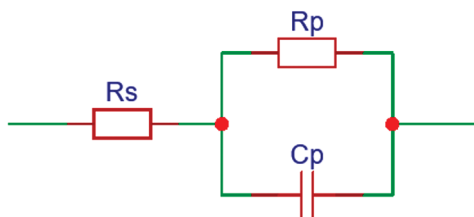
Szczególną uwagę poświęcono modułowi discharge_control.py, który zawiera funkcje rozładowywania ogniwa stałym prądem oraz przeprowadzania spektroskopii impedancji. W trybie EIS urządzenie przepuszcza przez ogniwo prąd

przebiegiem i rejestruje odpowiedź napięciową. Wyniki zapisywane są w postaci zestawu parametrów obejmujących m.in. częstotliwość, zmierzone wartości prądu i napięcia, pojemność rozładowaną do momentu pomiaru oraz numer cyklu pomiarowego.

4.3. Oprogramowanie do analizy danych

Aplikacja desktopowa została napisana w języku Python (wersja 3.10) i wykorzystuje środowisko Visual Studio Code. Zastosowano biblioteki NumPy, SciPy i Plotly. Główna logika programu zawarta jest w pliku main.py, który przetwarza dane z plików CSV, oblicza wartości impedancji oraz dopasowuje model obwodu równoważnego. Dane są analizowane w pętli dla kolejnych iteracji pomiarowych.

W ramach wstępnego przetwarzania dane są filtrowane (z zastosowaniem filtra bez przesunięcia fazowego), interpolowane i dzielone na przedziały czasowe. Następnie dla każdej częstotliwości wyznaczana jest impedancja jako liczba zespolona. Dane te są następnie dopasowywane do uproszczonego modelu (rys. 7) zawierającego rezystancję szeregową R_s , rezystancję transferu ładunku R_p oraz pojemność C_p .

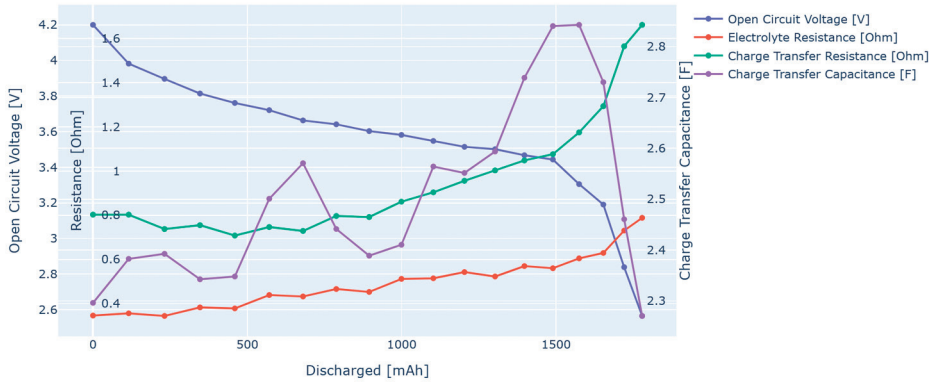


Rys. 7. Model układu, do którego dopasowana będzie impedancja
Źródło: Opracowanie własne

Dodatkowe funkcje umożliwiają wizualizację wyników w formie wykresów Nyquista, widm FFT oraz wykresów zmienności parametrów modelu względem rozładowanej pojemności ogniwa (rys. 8).

Całość rozwiązania została tak opracowana, aby możliwa była szybka adaptacja do innych typów ogniw i procedur testowych, a także dalszy rozwój funkcjonalności zarówno po stronie sprzętowej, jak i programowej.

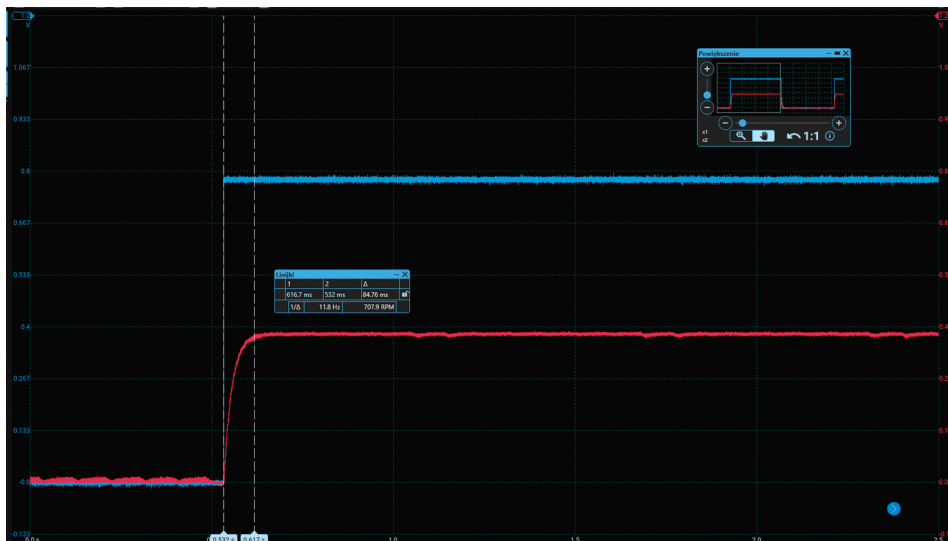
Battery parameters over discharged capacity



Rys. 8. Przykładowy generowany wykres wyjściowy
Źródło: Opracowanie własne

5. Eksperymenty i wyniki

Podczas rozwoju urządzenia przeprowadzono szereg testów funkcjonalnych, diagnostycznych i walidacyjnych, których celem było zarówno potwierdzenie działania wszystkich elementów systemu, jak i identyfikacja ograniczeń wynika-

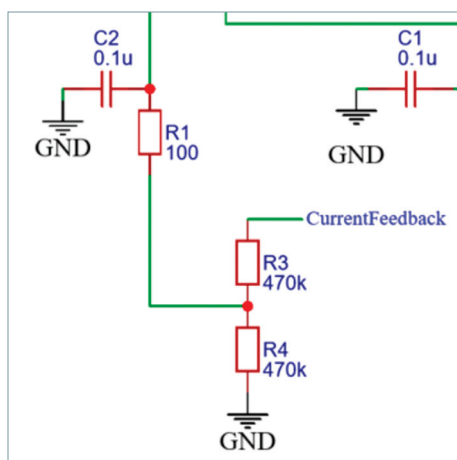


Rys. 9. Przebieg napięcia na rezystorze obciążeniowym oraz napięcia za dzielnikiem z zaznaczonym czasem opóźnienia
Źródło: Opracowanie własne

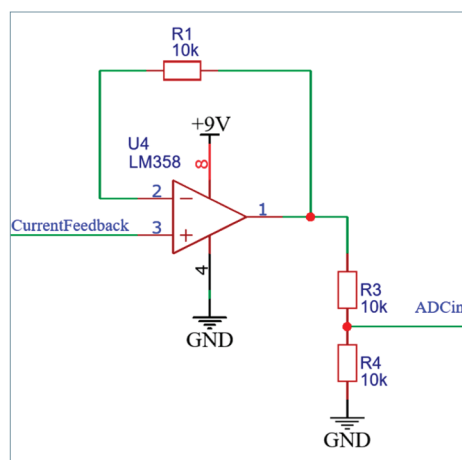
jących z zastosowanych rozwiązań sprzętowych i programowych. Eksperymenty prowadzono równolegle z implementacją kolejnych funkcji urządzenia, co pozwalało na bieżąco weryfikować efektywność przyjętych założeń oraz skuteczność wdrożonych algorytmów.

W pierwszej fazie badań skupiono się na testowaniu poprawności działania toru pomiarowego. Z wykorzystaniem oscyloskopu PicoScope 2208B zaobserwowano opóźnienia w odpowiedzi napięciowej przetwornika ADC ADS1256 (rys. 9).

Zjawisko to zidentyfikowano jako wynik obecności kondensatora filtrującego na wejściu przetwornika oraz zastosowania prostego dzielnika napięcia.



Rys. 10. Fragment schematu elektrycznego za dzielnikiem napięcia przy wejściu do przetwornika ADC
Źródło: Opracowanie własne



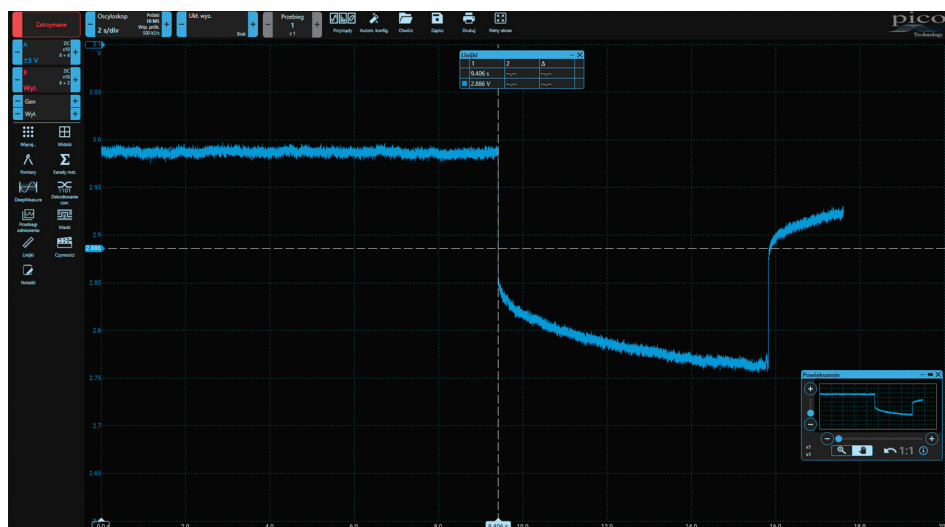
Rys. 11. Propozycja wtórnika napięcia wykorzystywanego do zasilania przetwornika ADC
Źródło: Opracowanie własne

Eksperymenty wykazały, że czas opóźnienia może wynosić nawet 84 ms przy skokowej zmianie prądu z 0 do 100 mA. Zaproponowano zastosowanie wtórnika napięciowego jako bufora sygnału pomiarowego (rys. 11), co pozwoliłoby zmniejszyć impedancję wejściową i zwiększyć szybkość odpowiedzi układu.

Kolejnym etapem było przeprowadzenie testów szybkości działania programu mikrokontrolera. Dokonano pomiaru czasu wykonywania kluczowych operacji w pętli sterującej rozładowywaniem. Najwięcej czasu – około 1739 μ s – zajmował odczyt danych z przetwornika ADC, podczas gdy pozostałe operacje (zapis do bufora, aktualizacja prądu rozładowania, obliczenia) zajmowały łącznie mniej niż 900 μ s. Wskazuje to, że największym ograniczeniem wydajności jest komunikacja z przetwornikiem ADS1256.

W celu potwierdzenia poprawności działania całego systemu wykonano pełne badanie ogniwa typu CR2Z firmy Panasonic. Spektroskopia impedancji została przeprowadzona w zakresie 0,01–10 Hz, a maksymalny prąd badawczy wynosił 100 mA. Aplikacja analityczna wyznaczyła następujące parametry modelu: napięcie otwartego obwodu 3,021 V, rezystancję szeregową 0,402 Ω , rezystancję transferu ładunku 0,144 Ω oraz pojemność 1,003 F.

W celu weryfikacji dokładności modelu, ogniwo obciążono stałą rezystancją 7,8 Ω , a przebieg napięcia zarejestrowano za pomocą oscyloskopu (rys. 12).



Rys. 12. Zmiana napięcia ogniwa po podłączeniu rezystora obciążającego
Źródło: Opracowanie własne

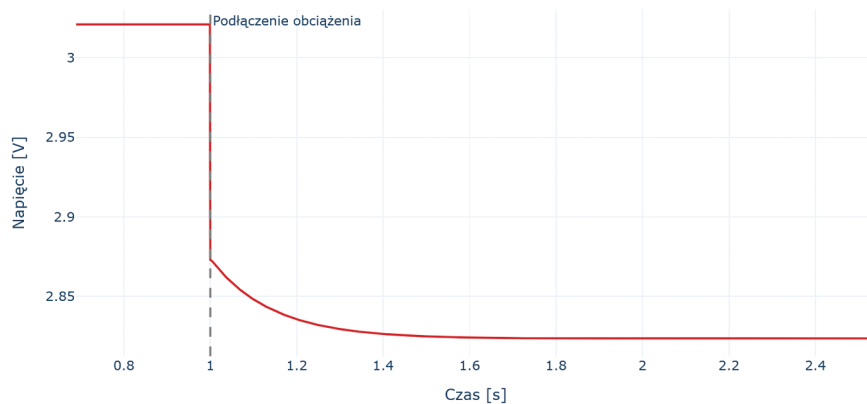
Uzyskane dane porównano z wynikami symulacji obwodu równoważnego, zasilanego taką samą rezystancją.

Uzyskano wysoką zgodność wartości napięcia w czasie, przy czym różnice pojawiały się po upływie około jednej sekundy, co wskazuje na brak modelowania elementów dyfuzyjnych (impedancji Warburga) w uproszczonym modelu.

Mimo to uzyskana zgodność potwierdziła skuteczność metody pomiarowej oraz poprawność przetwarzania danych.

Wyniki eksperymentów dowodzą, że urządzenie działa zgodnie z założeniami projektowymi i pozwala na uzyskanie wiarygodnych danych charakterystycznych dla badanego ogniwa. Wprowadzone korekty, testy porównawcze oraz analizy modelowe umożliwiły pełne potwierdzenie funkcjonalności oraz zidentyfikowanie kierunków dalszego doskonalenia systemu.

Symulacja podłączenia obciążenia do masy po 1s

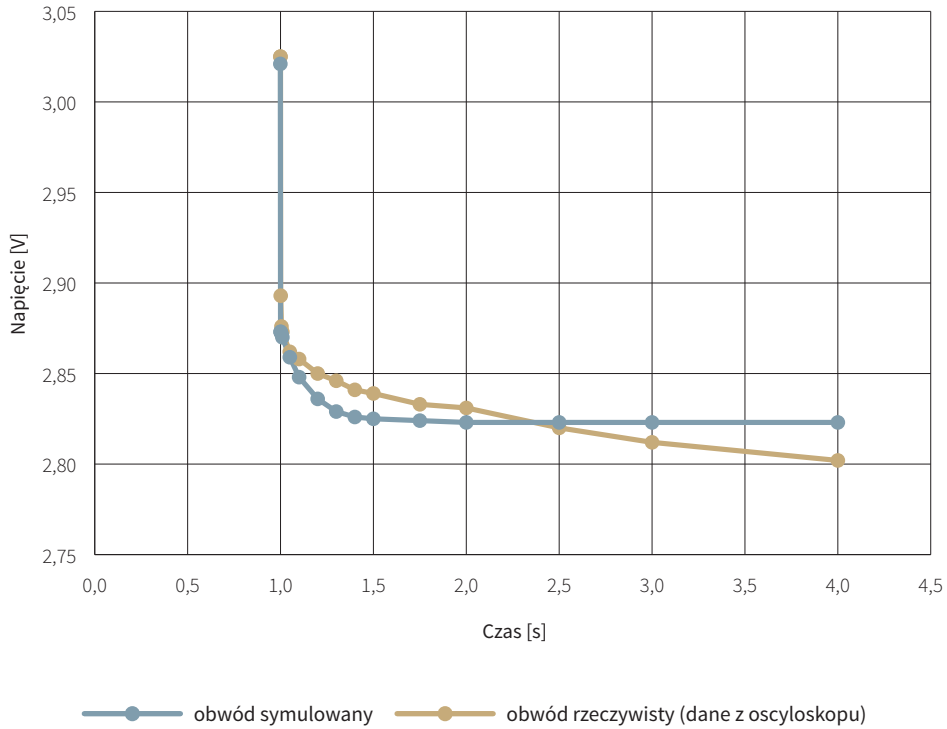


Rys. 13. Symulacja zmiany napięcia po podłączeniu rezystora obciążającego
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 1. Porównanie symulacji modelu z danymi zebranymi oscyloskopem

Czas [s]	Napięcie symulowane [V]	Napięcie zmierzone [V]	Różnica [V]
0,999	3,021	3,025	0,004
1	2,873	3,025	0,152
1,001	2,873	2,893	0,020
1,005	2,872	2,876	0,004
1,01	2,870	2,873	0,003
1,05	2,859	2,862	0,003
1,1	2,848	2,858	0,010
1,2	2,836	2,850	0,014
1,3	2,829	2,846	0,017
1,4	2,826	2,841	0,015
1,5	2,825	2,839	0,014
1,75	2,824	2,833	0,009
2	2,823	2,831	0,008
2,5	2,823	2,820	0,003
3	2,823	2,812	0,011
4	2,823	2,802	0,021

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 14. Porównanie symulacji modelu z danymi zebranymi oscyloskopem
Źródło: Opracowanie własne

6. Dyskusja wyników

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów potwierdzają, że opracowany system pomiarowy spełnia założenia projektowe i umożliwia uzyskanie wysokiej jakości danych diagnostycznych dla badanych ogniw. Szczególnie istotna jest zdolność układu do prowadzenia spektroskopii impedancyjnej w szerokim zakresie częstotliwości, co pozwala na wnioskowanie o stanie technicznym akumulatora bez konieczności jego rozbierania czy niszczenia.

Zaobserwowane opóźnienia w odpowiedzi toru pomiarowego zwracają uwagę na ograniczenia wynikające z zastosowanych komponentów, takich jak dzielnik napięcia z kondensatorem filtrującym. Choć nie wpływa to istotnie na dokładność pomiaru w stanie ustalonym, może zniekształcać wyniki w analizie dynamicznej. Propozycja zastosowania wtórnika napięciowego stanowi sensowną i łatwą do wdrożenia modyfikację, która mogłaby znacząco poprawić szybkość działania systemu.

Ograniczeniem okazał się również czas dostępu do danych z przetwornika ADC, który stanowił najdłuższy fragment pętli pomiarowej. Możliwości optymalizacji w tym zakresie są ograniczone przez charakterystykę samego układu ADS1256, co sugeruje potrzebę rozważenia alternatywnych przetworników w kolejnych wersjach urządzenia.

Z punktu widzenia zgodności danych pomiarowych z rzeczywistością, uzyskane wartości impedancji oraz przebiegi napięcia podczas symulowanego obciążenia pokrywają się z wynikami rzeczywistych testów. Model obwodu równoważnego dobrze odwzorowuje reakcję ogniwa, szczególnie w początkowym okresie po przyłożeniu obciążenia. Pewne rozbieżności w dalszej części przebiegu napięcia wskazują na pominięcie składowych dyfuzyjnych w modelu, co otwiera przestrzeń do rozwoju bardziej złożonych reprezentacji matematycznych, uwzględniających np. impedancję Warburga.

Analiza danych w aplikacji komputerowej przebiegała sprawnie i umożliwiła pełną identyfikację parametrów modelu dla każdej iteracji. Wysoka automatyzacja przetwarzania, zastosowanie zaawansowanych algorytmów filtracji i dopasowania, a także interaktywne wykresy, uczyniły aplikację skutecznym narzędziem wspomagającym interpretację wyników.

Dyskusja prowadzi do wniosku, że urządzenie – mimo kilku ograniczeń technicznych – już w obecnej formie pozwala na wiarygodną analizę stanu akumulatorów. W kontekście potencjalnych zastosowań, takich jak kontrola jakości w procesie produkcji, analiza laboratoryjna czy monitoring ogniw w warunkach operacyjnych, opracowany system stanowi wartościową bazę wyjściową do dalszego rozwoju.

7. Wnioski

Opracowany system do analizy akumulatorów pozwala na kompleksową ocenę stanu ogniw poprzez pomiar parametrów elektrycznych oraz przeprowadzenie spektroskopii impedancyjnej w szerokim zakresie częstotliwości. Zrealizowane rozwiązanie, łączące urządzenie pomiarowe z aplikacją analityczną, umożliwia nieinwazyjne badanie stanu naładowania (SoC) oraz stanu technicznego (SoH) akumulatorów. Dzięki zastosowaniu przetwornika ADC o wysokiej rozdzielczości oraz precyzyjnego źródła prądowego możliwe było uzyskanie wiarygodnych i powtarzalnych wyników pomiarowych.

System wykazał poprawne działanie zarówno w warunkach testowych, jak i w symulacjach obciążeniowych z zastosowaniem rzeczywistych ogniw. Oprogramowanie mikrokontrolera działa stabilnie, a aplikacja analityczna zapewnia

zaawansowaną interpretację wyników, co umożliwia ich praktyczne wykorzystanie w diagnostyce.

Zidentyfikowane ograniczenia – takie jak opóźnienia wynikające z zastosowanego toru pomiarowego czy ograniczenia wydajności przetwornika ADC – nie wpływają w sposób istotny na jakość uzyskanych wyników, ale wskazują kierunki możliwej optymalizacji w przyszłych wersjach urządzenia.

System może znaleźć zastosowanie w szerokim spektrum aplikacji, począwszy od laboratoriów badawczych, przez kontrolę jakości na etapie produkcji, aż po integrację z systemami zarządzania bateriami (BMS) w rzeczywistych aplikacjach przemysłowych i konsumenckich. Stanowi on solidną podstawę do dalszego rozwoju, obejmującego między innymi: zwiększenie dokładności, poszerzenie zakresu częstotliwości, wdrożenie złożonych modeli impedancyjnych oraz zaprojektowanie finalnej wersji elektroniki.

Bibliografia

- Agubra, V.A., & Fergus, J.W. (2014, 24 czerwca). The formation and stability of the solid electrolyte interface on the graphite anode. *Journal of Power Sources*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775314008775>
- Angenedt, G. (b.d.). *The fingerprint of the battery: Understanding open-circuit voltage*. Accure. <https://www.accure.net/blogs/battery-open-circuit-voltage>
- Bao, Y., & Gong, Y. (2023, 7 marca). Li-ion battery charge transfer stability studies with direct current impedance spectroscopy. *Energy Reports*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723002391>
- CR2Z. (b.d.). *Primary Lithium Batteries*. Panasonic. <https://energy.panasonic.com/eu/business/products/lithium/models/CR2Z>
- EasyEDA. (b.d.). *About EasyEDA*. <https://easyeda.com/page/about>
- ESP32-S3-WROOM-1 datasheet. (b.d.). Espressif. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf
- Hill, S., i in. (2023). *An engineer's guide to current sensing*. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/eb/slyy154b/slyy154b.pdf>
- International Rectifier. (b.d.). *IRF540N datasheet*. Infineon. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRF540N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e39f0d19a1
- Lazanas, A., & Prodromidis, M.I. (2023, marzec). Electrochemical impedance spectroscopy – A tutorial. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/369099716_Electrochemical_Impedance_SpectroscopyA_Tutorial
- Lombardo, T., i in. (2025, 5 marca). The battery industry has entered a new phase. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/commentaries/the-battery-industry-has-entered-a-new-phase>
- Microchip. (b.d.). *MCP4725 datasheet*. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>
- MicroPython. (b.d.). *MicroPython documentation*. <https://micropython.org>
- NumPy. (b.d.). *NumPy*. <https://numpy.org>
- Pico Technology. (b.d.). *PicoScope 2208B*. <https://www.picopolska.pl/oscyloskopy/oscyloskop-picoscope-2208b>
- Plotly. (b.d.). *Plotly for Python*. <https://plotly.com/python>

- Python Software Foundation. (2021). *Python 3.10.0 release*. <https://www.python.org/downloads/release/python-3100>
- SciPy. (b.d.). *SciPy*. <https://scipy.org>
- Texas Instruments. (b.d.a). *ADS1256 datasheet*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1256.pdf>
- Texas Instruments. (b.d.b). *LM358 datasheet*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf>
- Torabi, F., & Ahmadi, P. (2019, 8 listopada). *Fundamentals of batteries*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128162125000064>
- Understanding FFTs and Windowing. (b.d.). *National Instruments*. <https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>
- Visual Studio Code. (b.d.). *Visual Studio Code*. Microsoft. <https://code.visualstudio.com>
- Wang, X., i in. (2020, 3 grudnia). A review of modeling, acquisition, and application of lithium-ion battery impedance for onboard battery management. *Journal of Energy Storage*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2590116820300515>
- Warburg impedance. (b.d.). PalmSens. <https://www.palmsens.com/knowledgebase-topic/warburg-impedance>

Project and Implementation of Device for Diagnostics of Lithium Batteries Using Impedance Spectroscopy

Abstract. The purpose of this article is to design and implement a device and software for controlled discharge and analysis of batteries. An additional purpose is to develop software for analyzing the collected data. The device should enable constant current discharge of cells and perform electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The software should generate parameter values and graphs, allowing for easy comparison of batteries. The goals were achieved, and the resulting prototype solution can be implemented as a product.

Keywords: battery, electromobility, impedance spectroscopy, internal impedance, diffusion, charge transfer, ESP32