
Igor Świerczek*

OPRACOWANIE SYSTEMU TELEMETRII BOLIDU WODOROWEGO HYDRIVE 1

W artykule zaprezentowano działanie układu telemetrii bolidu HYDRIVE 1 z ogniwem wodorowym. Omówiono budowę bolidu oraz cel, w jakim został on skonstruowany. Następnie opisano architekturę systemu telemetrii, budowę układów pomiarowych i wskazano lokalizacje zintegrowania ich w układzie elektrycznym. Kolejne sekcje artykułu poświęcono procesowi transmisji danych z układu telemetrii i ich odbioru na urządzeniu zewnętrznym. Na końcu przedstawiono rezultaty w formie wykresów oraz ich opracowanie. Artykuł kończy się omówieniem kierunków rozwoju i rozbudowy systemu telemetrii.

DEVELOPMENT OF TELEMETRY SYSTEM IN HYDROGEN BOLIDE HYDRIVE 1

This article supplies an overview of a telemetry system implemented in a HYDRIVE 1 bolide featuring a hydrogenous drive. It begins by introducing the structure and purpose of the bolide. Subsequently, it delves into the telemetry and measurement systems, detailing their integration within the electric circuit. The process of data transmission from the telemetry systems to data recipients is then explained. Additionally, the article includes an analysis of the bolide's performance through graphical representations, with an examination of the telemetry system's potential for growth and expansion.

1. WPROWADZENIE

Telemetria, będąca zaawansowaną technologią, umożliwia zdalne pomiary oraz przesyłanie danych do odbiorcy znajdującego się w innym miejscu niż urządzenie nadawcze. Technologia ta ma zastosowanie w wielu kluczowych obszarach, w tym w eksploracji kosmosu [1], medycynie [2], biologii [3] oraz zarządzaniu zasobami wodnymi [4], co podkreśla jej wszechstronność i znaczenie w nowoczesnej nauce i technologii. W dziedzinie sportów motorowych, takich jak żużel i Formuła 1 [5], systemy telemetrii odgrywają niezbędną rolę, umożliwiając zdalny monitoring oraz analizę parametrów pracy pojazdów w czasie

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki Przemysłowej i Inżynierii Metali, Studenckie Koło Naukowe Konstruktorów Mechatyki.

rzeczywistym. Głównym celem implementacji systemu telemetrii w bolidzie HYDRIVE 1 jest monitorowanie kluczowych danych operacyjnych, takich jak temperatura, natężenie oraz napięcie prądu. Do wykonania tych pomiarów zastosowano czujniki prądu, dzielniki napięcia oraz stykowy czujnik temperatury. Zebrane dane są następnie transmitowane z pojazdu do zewnętrznego urządzenia, które wizualizuje pomiary w formie wykresów. Następnie dane są analizowane, co umożliwia identyfikację i korektę błędów konstrukcyjnych w poszczególnych komponentach pojazdu. Ten proces ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i wydajności w sporcie motorowym.

2. OPIS BOLIDU HYDRIVE 1

Bolid HYDRIVE 1 (rys. 1) to produkt zaawansowanej technologii w dziedzinie pojazdów wyścigowych, opracowanej przez członków Studenckiego Koła Naukowego Konstruktorów MechaNICAD. Konstrukcja pojazdu opiera się na kompozycie włókna węglowego, co pozwoliło na uzyskanie minimalnej masy całkowitej wynoszącej 50 kg, włączając w to zainstalowane komponenty. Bolid jest napędzany przez silnik elektryczny, który pobiera energię ze stosu superkondensatorów, zasilany przez ogniwo wodorowe PEM o mocy 500 W, produkcji firmy Horizon [6]. Warto zaznaczyć, że działanie ogniwa wodorowego podlega wpływowi wielu parametrów, takich jak wilgotność, temperatura oraz czystość dostarczanego wodoru. W celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji HYDRIVE 1 został wyposażony w czujnik wodoru połączony z układem bezpieczeństwa. W przypadku wykrycia przecieku system ten natychmiast przerywa przepływ gazu za pomocą elektrozaworu. Przednie dwa koła są sterownicze, natomiast koło tylne jest napędowe i zostało osadzone na module wyprodukowanym technologią druku 3D z proszku. Co więcej, moduł zaprojektowany został z wykorzystaniem technik modelowania generatywnego, co pozwoliło na uzyskanie optymalnych parametrów wydajnościowych. Niezbędne elementy bezpieczeństwa zostały starannie dobrane. Obejmują one oddzielne układy hamulcowe w przypadku przedniej i tylnej osi. Ponadto pojazd wyposażony został w kierownicę z potencjometrem służącym do regulacji prędkości oraz wyświetlacz, który dostarcza informacji o pozostałym czasie wyścigu oraz napięciu na superkondensatorach. Bolid HYDRIVE 1 powstał z myślą o udziale w Shell Eco-marathon [7], w związku z tym kluczowym kryterium jest minimalne zużycie wodoru. Zgodnie z regulaminem zawodów kierowca zobowiązany jest do pokonania dystansu 15 kilometrów na torze wyścigowym w czasie nieprzekraczającym 45 minut.

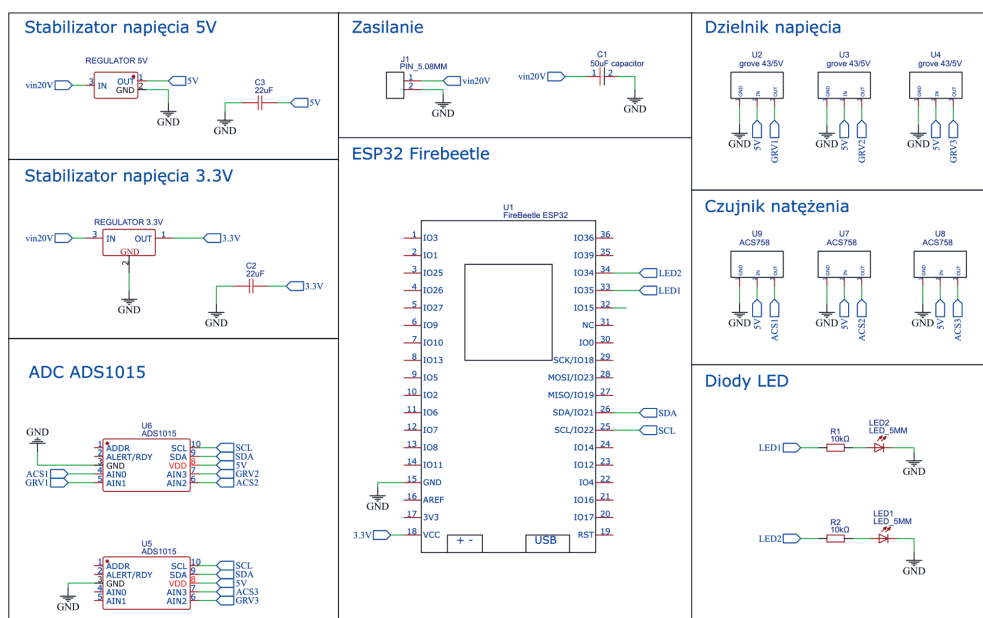


Rys. 1. Bolid HYDRIVE 1

Źródło: [8]

3. BUDOWA UKŁADU TELEMETRII

Głównymi założeniami układu telemetry (rys. 2) były niezawodność i dokładność pomiarów. Dodatkowo transmisja danych miała nie przekraczać częstotliwości 1 Hz. Bazowym mikrokontrolerem systemu telemetry jest ESP32 Fire Beetle. Jest to kompleksowy, wyposażony w dwurdzeniowy procesor Tensilica LX6, mikrokontroler, wykorzystujący moduł Dual-Core ESP-WROOM-32, do komunikacji w trybie Wi-Fi czy Bluetooth v4.2. Ma on 520 kB pamięci RAM oraz 16 MB pamięci flash. Połączony jest z dwoma przetwornikami ADC ADS1015, które zostały zintegrowane z trzema układami pomiarowymi. Przetworniki mają na zadanie modulację sygnału analogowego na cyfrowy.



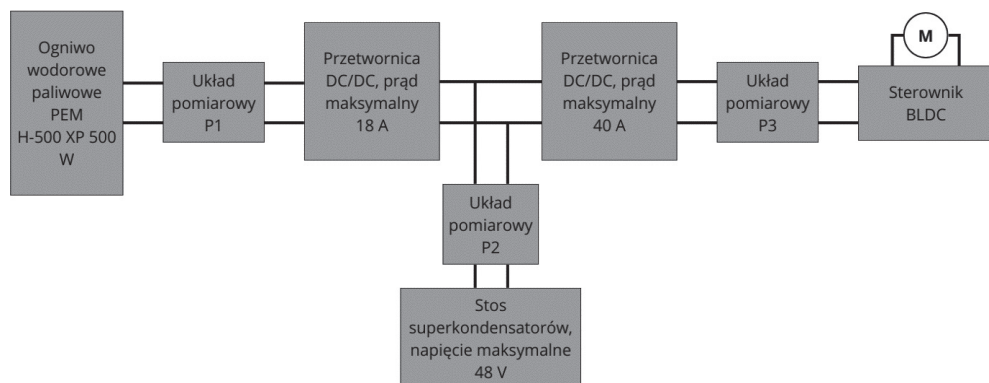
Rys. 2. Schemat systemu telemetry i układów pomiarowych

Źródło: materiały SKNK MechaniCAD

Następnie komunikują się z mikrokontrolerem ESP32 za pomocą interfejsu I2C, wysyłając czas pomiaru linią zegarową SCL i pomiary linią danych SDA. Zabieg ten ma na celu zastąpienie przetwornika ADS, wbudowanego w mikrokontroler ESP32. Zasilanie układu bazuje na zewnętrznej baterii o napięciu 15 V, więc aby zapewnić odpowiednie zasilanie poszczególnych komponentów systemu, zastosowano stabilizatory napięcia 3,3 V i 5 V. W celu zapewnienia informacji zwrotnej dotyczącej poprawnego funkcjonowania mikrokontrolera oraz jego połączenia z siecią Wi-Fi zaimplementowano układ diod sygnalizacyjnych. Jeden układ pomiarowy składa się z dwóch czujników – jednego do pomiaru natężenia prądu, drugiego do pomiaru napięcia prądu. Do pomiaru natężenia prądu używany jest czujnik ACS758, który wykorzystuje efekt Halla do precyzyjnego pomiaru w zakresie od -50 A do 50 A. Jego czułość wynosi 40 mV/A. Moduł ma możliwość pomiaru natężenia

prądu przy stałym i zmiennym napięciu, co jest kluczowe przy pomiarze prądu wychodzącego z ogniwa, gdzie napięcie jest zmienne. Następnie do pomiaru napięcia prądu używany jest dzielnik napięcia Groove 43 V/5 V. Dzielnik mierzy napięcie wejściowe w zakresie od 1 V do 43 V. Następnie modyfikuje to napięcie do zakresu od 0 V do 5 V, dzięki czemu z proporcji można przeliczyć napięcie wejściowe na wyjściowe. Kolejny czujnik to cyfrowy termometr stykowy DS18B20, działający w zakresie od -55°C do 125°C z dokładnością $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ w zakresie od -10°C do 85°C . Zasilany jest napięciem od 3 V do 5,5 V. Czujnik jest bezpośrednio połączony z mikrokontrolerem ESP32.

Systemy pomiarowe w układzie elektrycznym są rozmieszczone w trzech kluczowych lokalizacjach, oznaczonych na schemacie jako układy pomiarowe P1, P2 i P3 (rys. 3). Ma to zasadnicze znaczenie dla monitorowania przepływu prądu w bolidzie. Układ pomiarowy (P1) umieszczony jest na wyjściu z ogniwa wodorowego H-500 XP, gdzie ze względu na jego specyficzną charakterystykę [9, 10] konieczne są pomiary w różnych warunkach pracy. Dzięki temu można określić optymalną charakterystykę pracy ogniwa.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy układu elektrycznego

Źródło: [8]

Czujnik (P2) służy do pomiaru napięcia i natężenia prądu stosu superkondensatorów, co pozwala na monitorowanie ilości zgromadzonej energii. Ostatni czujnik (P3) znajduje się bezpośrednio przed kontrolerem silnika. Ma za zadanie monitorowanie przepływu prądu do silnika, co jest kluczowe dla prawidłowego funkcjonowania układu napędowego. Czujnik temperatury jest umieszczony na bocznej ścianie silnika, by stale monitorować temperaturę silnika i w przypadku przegrzania uruchomić działanie układu zabezpieczającego.

4. TRANSMISJA I ODBIÓR PAKIETÓW ORAZ WIZUALIZACJA DANYCH

Mikrokontroler ESP32 jest połączony z Wi-Fi, by za pomocą usługi AWS IoT [11] wysyłać na Broker [12] pakiety w strukturze *json*, używając protokołu MQTT [13]. W jednym pakiecie znajdują się dane takie jak wartości napięcia i natężenia prądu (zmierzonego w trzech punktach

pomiarowych), wartości temperatury oraz czas pomiaru. Mikrokontroler jest zaprogramowany tak, by za pomocą linii SDA pobierać wartości pomiarów, a przy użyciu linii SCL czas pomiaru. Czas pomiaru jest mierzony od uruchomienia ESP32. W funkcji `Collect_electrical_data()`, podczas wykonywania pętli `for` pomiary zapisywane są w tablicy `ads_nodes`. Następnie uzyskane pomiary są modyfikowane przez funkcję `computeVolts()`, ponieważ dane są przekazywane jako sygnały. Tak przygotowane pomiary są teraz używane przez funkcje `CalculateVolt()` i `CalculateAmp()`, które mają obliczyć końcowe wartości danych.

```
void Collect_electrical_data(){
    int16_t results_vt;
    int16_t results_I;
    for (uint8_t i = 0; i < LICZBA_PRZETWORNIKOW; i++){
        ads_nodes[i].get_measurements(results_vt, results_I);
        dane_elektryczne.pomiar_VT[i] = CalculateVolt(ads[i].computeVolts(results_vt));
        dane_elektryczne.pomiar_I[i] = CalculateAmp(ads[i].computeVolts(results_I));
    }
    dane_elektryczne.time = millis();
}
```

Funkcja `CalculateAmp()` jako argument przyjmuje pomiar natężenia prądu z amperomierza. Następnie pomiar zmieniany jest z napięcia z pomocą stałej `NAPIECIE_REFERENCYJNE`. W kolejnym segmencie uwzględnione zostały czułość modułu ACS758 i błąd pomiarowy. Dzięki tym operacjom uzyskano dokładne wartości wyników, obciążone błędem $\pm 0,05$ A.

```
float CalculateAmp(float Measure_VT){
    float pomiar_znormalizowany = Measure_VT - (NAPIECIE_REFERENCYJNE/2);
    float Amp = pomiar_znormalizowany / ACS758_SENSITIVITY_DEFAULT - BLAD_POMIARU;
    return Amp;
}
```

Następnie mikrokontroler przechodzi do funkcji `Send_save_electrical_data()`, która pomiary zapisuje w strukturze *json*. Funkcja tworzy tablicę znaków `mqtt_message[]` i publikuje danych pakiet na serwerze za pomocą protokołu MQTT.

```
void Send_save_electrical_data(){
    StaticJsonDocument<400> doc;
    for (uint8_t i; i < LICZBA_PRZETWORNIKOW; i++){
        doc["pomiar_VT" + std::to_string(i)] = dane_elektryczne.pomiar_VT[i];
        doc["pomiar_I" + std::to_string(i)] = dane_elektryczne.pomiar_I[i];
    }
    doc["pomiar_T"] = pomiar_temperatura;
    doc["time_ms"] = dane_elektryczne.time;
    char mqtt_message[400];
    serializeJson(doc, mqtt_message);
    publish_MQTT_message(MQTT_PUBLISH_TOPIC, mqtt_message);
}
```

Na kolejnym etapie za pomocą funkcji `Handle_message()` napisanej w języku *Python* i przy użyciu biblioteki *gspread* dane zapisywane są w usłudze Arkusze Google. Pomiary parametrów odbywają się co około 0,7 s. Należy zwrócić uwagę, że Google API ma limit jednego zapytania na sekundę, z tego powodu dwa pakiety łączone są w jeden pakiet, który zostaje wysłany co 1,4 s. Wraz z Arkuszami Google używane jest Apps Scripts, co umożliwia

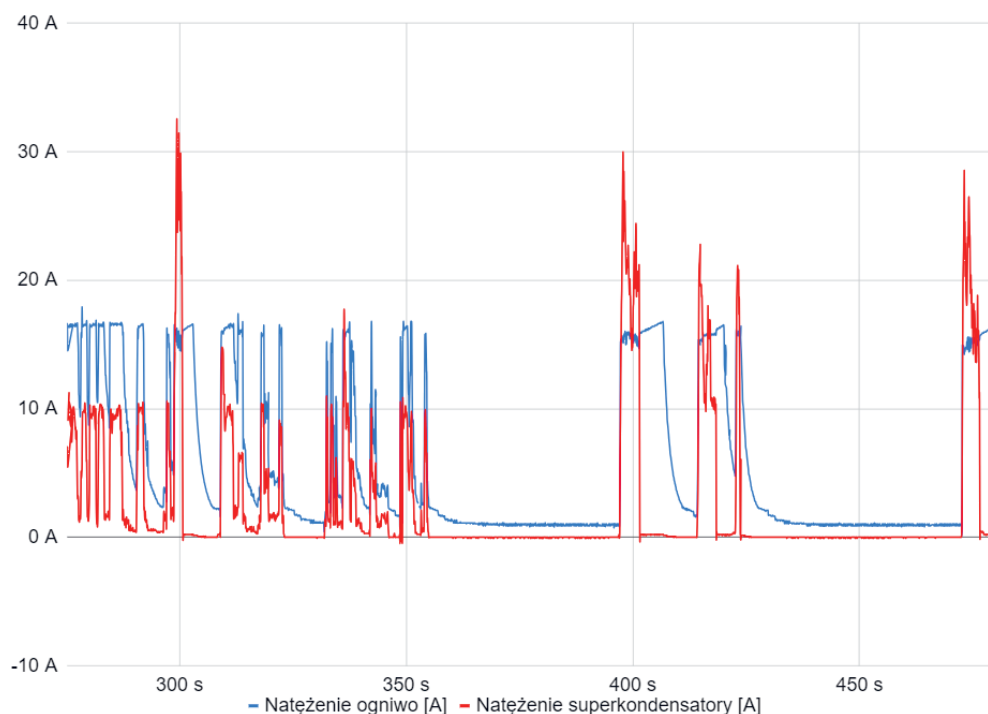
odpowiednie sortowanie odebranych pakietów. Następnie, dzięki wbudowanym funkcjom, dane pomiarowe są dostosowywane do wizualizacji na wykresach.

```
def Handle_message(client, userdata, message):  
    json_str = message.payload.decode('utf-8')  
    json_obj = json.loads(json_str)  
    data = [str(json_obj["time_ms"]), str(json_obj["pomiar_T"]), str(json_obj["pomiar_VT0"]),  
str(json_obj["pomiar_VT1"]), str(json_obj["pomiar_V2"]), str(json_obj["pomiar_I0"]),  
str(json_obj["pomiar_I1"]), str(json_obj["pomiar_I2"])]  
    ...  
    try:  
        google_sheet.wyslij_w_chmure(dane_do_wyslania)  
    except Exception as e:  
        print("An error occurred:", e)
```

5. REZULTATY

Dane zobrazowane na wykresach przedstawiają funkcjonowanie poszczególnych komponentów układu elektrycznego na testowych przejazdach, podczas zawodów Shell Eco-marathon we Francji (Nogaro).

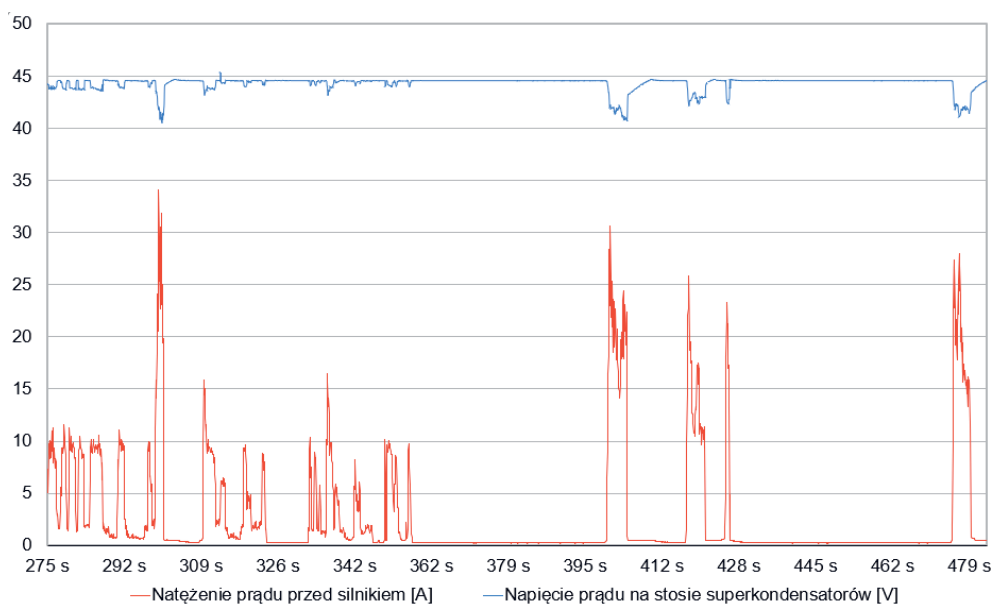
Na wykresie (rys. 4) można zauważyć, że wzrost natężenia prądu na ogniwie odpowiada wzrostowi natężenia prądu na superkondensatorach.



Rys. 4. Fragment wykresu natężenia prądu [A] ogniw oraz stosu superkondensatorów w trakcie przejazdu na zawodach

Oznacza to, że przy przyspieszaniu przez kierowcę do sterownika ogniwa wysyłana jest informacja o zapotrzebowaniu na energię. Energia natomiast pobierana jest z superkondensatorów. W momencie gdy sterownik otrzymuje sygnał o zapotrzebowaniu, ogniwo ładuje superkondensatory. Kiedy natężenie prądu osiąga wartość w przybliżeniu 3 A na ogniwie i 0 A na superkondensatorach, kierowca nie wydaje polecenia przyspieszenia bolidu, a ogniwo wytwarza wówczas minimalną energię potrzebną do zasilenia komponentów elektrycznych w bolidzie. Spadki poniżej 0 A traktuje się jako błędy układów pomiarowych.

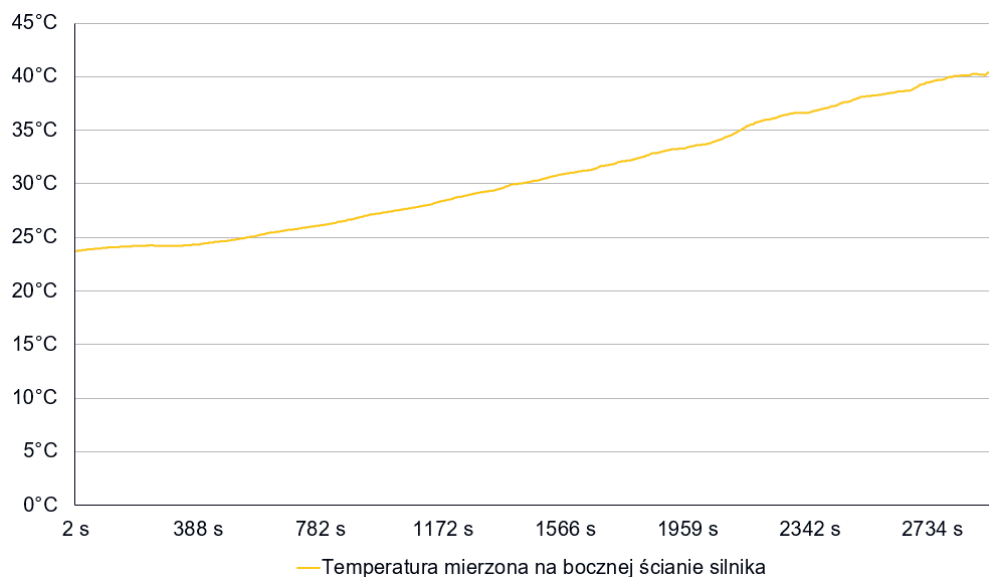
Na wykresie (rys. 5) można zauważyć, jak wartości spadków napięcia na superkondensatorach odpowiadają natężeniom na silniku. Podczas gdy kierowca przyspiesza, energia pobierana jest z superkondensatorów, a nie bezpośrednio z ogniwa, jako że przy zbyt dużym zapotrzebowaniu na energię ogniwo może zostać uszkodzone. Napięcie na superkondensatorach nie spada poniżej 40 V, co świadczy o dobrym działaniu ogniwa, ponieważ nie dopuszcza ono do większych spadków napięcia przy dużym zapotrzebowaniu na energię.



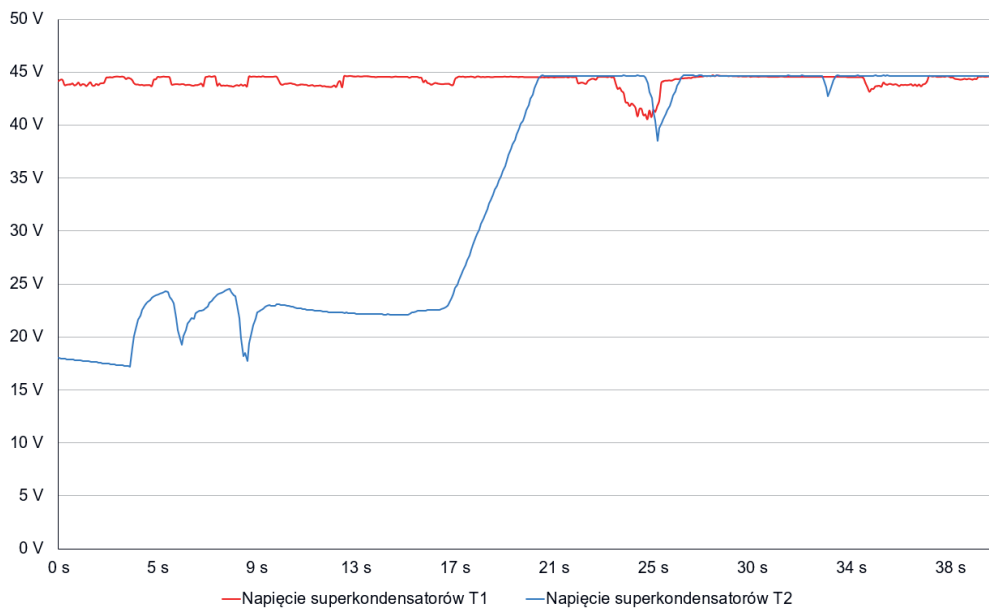
Rys. 5. Fragment wykresu napięcia [V] stosu superkondensatorów oraz natężenia prądu [A] przed silnikiem w trakcie przejazdu

Na wykresie (rys. 6) przedstawiono zależność temperatury silnika od czasu przejazdu. Można zauważyć, że w trakcie przejazdu temperatura silnika sukcesywnie wzrastała. Test trwał 45 minut. Silnik pracuje maksymalnie w temperaturze 50°C, więc dzięki pomiarowi temperatury można wywnioskować, że silnik się nie przegrzewa.

Wykres (rys. 7) obrazuje zmienność napięć w trakcie startu bolidu w dwóch różnych testach.



Rys. 6. Wykres temperatury [°C] mierzonej na bocznej ścianie silnika podczas przejazdu



Rys. 7. Fragment wykresu napięć prądu [V] superkondensatorów podczas dwóch testów (T1 i T2)

W teście T1 (wykres czerwony) superkondensatory zostały naładowane przed startem do napięcia o wartości 45 V. Natomiast w przypadku testu T2 (wykres niebieski) kondensatory zostały naładowane jedynie do około 17,5 V.

Zgodnie z wytycznymi organizatorów, jeśli superkondensatory są naładowane przed rozpoczęciem wyścigu, konieczne jest uzyskanie tej samej wartości naładowania na zakończenie przejazdu. Sprawdzane więc były rozwiązania z niższym naładowaniem superkondensatorów (test T2), co umożliwiałoby utrzymanie niższej wartości na końcu przejazdu. Jednakże ze względu na długi czas (20 s) ładowania superkondensatorów na samym początku wyścigu zostało przyjęte rozwiązanie z ładowaniem kondensatorów do wartości 45 V.

6. WNIOSKI

Podsumowując, można stwierdzić, że system telemetrii działa zgodnie z założeniami i pozwala na analizę działania bolidu, dzięki której zoptymalizowano układ elektryczny. Wykorzystując zebrane dane, można byłoysterować przetwornicę DC/DC na odpowiednie natężenie, by zoptymalizować działanie ogniwa wodorowego paliwowego. Przeprowadzono testy ładowania superkondensatorów przy starcie. Monitorowano temperaturę silnika, by nie doprowadzić do jego przegrzania. Informacja o napięciu na stosie superkondensatorów zostaje wysyłana cyfrowo do kierowcy, aby wiedział, kiedy są naładowane i tym samym, kiedy może przyspieszać.

7. KIERUNKI ROZWOJU

System telemetrii opisany w artykule jest prototypem, w którym docelowo można wprowadzić magistralę CAN dla ułatwienia skalowalności całego układu. Dodatkowo zbieranymi danymi są między innymi prędkość jazdy czy położenie na torze. Pomiary prędkości mogą być zbierane z enkodera sterownika silnika i mogą być wysyłane analogowo do mikrokontrolera ESP32. Z kolei do pomiaru położenia wymagany jest odbiornik GPS, połączony cyfrowo z mikrokontrolerem, z błędem pomiarowym maksymalnie do 0,5 m. Częstotliwość pomiaru przykładowego modułu GPS musiałaby wynosić powyżej 1,4 Hz, by nie opóźniać pozostałych pomiarów.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego na 64. Barbórkowej Konferencji Studentckich Kół Naukowych AGH, gdzie zajął II miejsce w sekcji informatycznej. Chciałbym serdecznie podziękować całemu zespołowi HYDRIVE 1 i opiekunowi naszego koła, panu dr. hab. inż. Wojciechowi Horakowi, prof. AGH, który zawsze udzielał nam wielu cennych rad. Chcę podziękować mojej rodzinie, szczególnie moim rodzicom, którzy wspierali mnie na każdym etapie życia. Dziękuję również Kajetanowi Kupsiowi za pomoc przy zaprojektowaniu schematów do artykułu.

LITERATURA

- [1] Cuéllar S., Santos M., Alonso F., Fabregas E., Farias G., *Explainable anomaly detection in spacecraft telemetry*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 133, 2024, 108083, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108083>.
- [2] Cyr A.M., Anzenberg P., Nazeer H., Torosoff M., *Clinical variables affecting the diagnostic yield of continuous telemetry monitoring in detection of atrial fibrillation in cryptogenic embolic stroke*, The American Journal of Cardiology, vol. 206, 2023, s. 67–69, <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2023.08.071>.
- [3] Aitken J.P., O'Dor R.K., Jackson G.D., *The secret life of the giant Australian cuttlefish Sepia apama (Cephalopoda): Behaviour and energetics in nature revealed through radio acoustic positioning and telemetry (RAPT)*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, vol. 320, 2005, s. 77–91, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.12.040>.
- [4] Bailey J., Harris E., Keedwell E., Djordjevic S., Kapelan Z., *The use of telemetry data for the identification of issues at combined sewer overflows*, Procedia Engineering, vol. 154, 2016, s. 1201–1208, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.524>.
- [5] Cadence, *Formula 1: How F1 teams use telemetry, control, and analytics to go faster*, 21.10.2022, https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/corporate/posts/formula-1-how-f1-teams-use-telemetry-control-analytics-to-go-faster [dostęp: 20.02.2024].
- [6] Horizon Educational, *H-500 XP Fuel Cell Stack*, <https://www.horizoneducational.com/h-500-xp-fuel-cell-stack/p1405> [dostęp: 23.02.2024].
- [7] Shell Eco-marathon, *About Shell Eco-marathon*, <https://www.shellecomarathon.com/about.html> [dostęp: 23.02.2024].
- [8] Opracowanie własne, *SKNK MechaniCAD*.
- [9] McLeod A.J., Böhre L.V., Bensmann B., Herrera O.E., Mérida W., *Anode and cathode overpotentials under accelerated stress testing of a PEM electrolysis cell*, Journal of Power Sources, vol. 589, 2024, 233750, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233750>.
- [10] Omran A., Lucchesi A., Smith D., Alaswad A., Amiri A., Wilberforce T., Sodré J.R., Olabi A.G., *Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell*, International Journal of Thermofluids, vol. 11, 2021, 100110, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100110>.
- [11] Marino C.A., Chinelato F., Marufuzzaman M., *AWS IoT analytics platform for micro-grid operation management*, Computers and Industrial Engineering, vol. 170, 2022, 108331, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108331>.
- [12] Longo E., Redondi A.E.C., *Design and implementation of an advanced MQTT broker for distributed pub/sub scenarios*, Computer Networks, vol. 224, 2023, 109601, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109601>.
- [13] Kegenbekov Z., Saparova A., *Using the MQTT protocol to transmit vehicle telemetry data*, Transportation Research Procedia, vol. 61, 2022, s. 410–417, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.067>.