

**Przemysław Zalewski, Andrzej Czerepicki**

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

## **BADANIE ZUŻYCIA ENERGII POJAZDU ELEKTRYCZNEGO TYPU GOKART Z ZASTOSOWANIEM UKŁADU TELEMETRII**

Rękopis dostarczono, kwiecień 2019

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki analizy zużycia energii przez osobowy pojazd elektryczny typu gokart na układ napędowy, który stanowi szczotkowy silnik elektryczny prądu stałego LEMCO sterowany dedykowanym przekształtnikiem energoelektronicznym. Aktualność tematu badań związana jest z popularyzacją personalnych środków transportu, które są coraz bardziej dostępne dla zwykłego użytkownika. Przedstawiono istotne charakterystyki energetycznego układu pojazdu. Przeprowadzono eksperymentalne jazdy na wyznaczonych trasach, podczas których za pomocą autorskiego systemu telemetrii zgromadzono pomiary bieżących charakterystyk eksploatacyjnych pojazdu w ruchu. Następnie na podstawie wyników pomiarów oszacowano średnie zużycie elektrycznej energii na wybranych odcinkach trasy, a także sumaryczną dla wszystkich tras. Porównując krótkie przejazdy dla różnych tras, stwierdzono zależność zużycia energii od profilu trasy przemieszczania się pojazdu oraz stylu jazdy kierowcy. Po ukończeniu jazdy próbnej przeprowadzono rejestrację procesu uzupełnienia energii w baterii pojazdu i na tej podstawie zweryfikowano poprawność obliczeń zużycia energii. Uzyskane w trakcie eksperymentu dane będą stanowić podstawę do budowy modelu małowabarytowego pojazdu elektrycznego.

**Słowa kluczowe:** osobowe pojazdy elektryczne, zużycie energii, telemetria

### **1. WSTĘP**

W dzisiejszych czasach coraz więcej zainteresowania oraz uwagi przyciągają pojazdy elektryczne. Z punktu widzenia zwykłego użytkownika, istotną zaletą elektrycznych środków personalnej komunikacji są koszty użytkowania pojazdu, ponieważ ceny energii elektrycznej w porównaniu z cenami paliw są niższe. Kolejnym argumentem przemawiającym na korzyść elektrycznych środków transportu są wartości etyczne związane z troską o środowisko. Pojazdy elektryczne nie emitują szkodliwych substancji, a ich silnik zapewnia cichszą pracę co również wpływa pozytywnie na otoczenie [4]. W rezultacie w ostatnich latach obserwowany jest znaczący wzrost popularności personalnego transportu elektrycznego, do których zaliczane są już nie tylko samochody, ale również rowery i nawet hulajnogi ze wspo-

maganiem elektrycznym. Z drugiej strony, wyniki badań naukowych w zakresie elektromobilności dotyczą przede wszystkim pojazdów zbiorowej komunikacji miejskiej [6], samochodów dostawczych lub osobowych [5], a nawet jachtów z silnikiem elektrycznym [3].

Studenckie koło naukowe Systemów Elektrotechnicznych w Transporcie (KNEST) działające na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, skonstruowało własny pojazd elektryczny typu gokart w ramach grantu rektorskiego [1]. Następnie został on wyposażony w opracowany przez studentów zaawansowany system telemetryczny, za pomocą którego można monitorować najważniejsze charakterystyki eksploatacyjne pojazdu w trybie online wykorzystując modemy radiowe o dużym zasięgu [2].

Jednym z problemów współczesnej elektromobilności jest stosunkowo niski zasięg pojazdów o napędzie elektrycznym ze względu na ograniczoną pojemność akumulatora. W przypadku pojazdów o małych gabarytach brak jest możliwości znaczącego zwiększenia pojemności baterii. Dlatego istotne jest badanie rozchodowania energii na trącję w celu oszacowania maksymalnej odległości, którą można pokonać bez doładowania baterii.

Celem prac badawczych zaprezentowanych w niniejszym artykule było przedstawienie wyników eksperymentalnych pomiarów najważniejszych eksploatacyjnych charakterystyk gokarta elektrycznego z wykorzystaniem autorskiego systemu telemetrii. Ponadto dokonano estymacji zużycia energii na podstawie charakterystyk pomiarowych pojazdu w ruchu.

## 2. CHARAKTERYSTYKI POJAZDU ELEKTRYCZNEGO TYPU GOKART

Gokart stanowi jednoosobowy pojazd o napędzie elektrycznym o wadze 218 kg (łącznie z bateriami litowo-jonowymi) oraz mocy silnika 10 kW. Układ zasilania składa się z 4-ch identycznych akumulatorów podłączonych szeregowo o sumarycznej pojemności 2,9 kWh i napięciu znamionowym 48 V. Układ sterowania składa się z kierownicy złączonej z wałkiem, który przytwierdzony jest bezpośrednio do drążków kierowniczych połączonych z ramionami zwrotnic. Na pokładzie gokarta umieszczono układ telemetrii. Zdjęcie pojazdu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Gokart elektryczny wykorzystany w badaniach  
*Źródło: opracowanie własne*

Gokart jest specyficznym pojazdem elektrycznym. Mała masa łącznie z dużą mocą silnika oraz nisko położony środek ciężkości zapewniają dobrą zwrotność, sterowalność oraz stateczność ruchu pojazdu. Pojazd tego typu wymaga eksperymentalnego przeanalizowania charakterystyk ruchu, ponieważ znane metody szacowania zużycia energii elektrycznej są zorientowane na pojazdy o znacznie większej masie i gabarytach.

### 3. ZAŁOŻENIA EKSPERYMENTU POMIAROWEGO

Celem eksperymentu jest zbieranie charakterystyk eksploatacyjnych pojazdu elektrycznego typu gokart z wykorzystaniem autorskiego systemu telemetrii. Ideą eksperymentu jest zestawienie estymowanego zużycia energii obliczonego na podstawie chwilowych pomiarów charakterystyk ruchu pojazdu (prąd, napięcie etc.) z faktycznym zużyciem energii na baterii. Faktyczne zużycie energii elektrycznej może być zmierzone w trakcie ładowania baterii do stanu sprzed rozpoczęcia próbnych przejazdów.

Do rejestrowanych pomiarowych charakterystyk pojazdu należą:

- napięcie baterii pojazdu  $U$  [V],
- natężenie prądu baterii pojazdu  $I$  [A],
- temperatura układu chłodzenia -  $T1$  [°C]; temperatura przekształtnika -  $T2$  [°C]; temperatura podwozia -  $T3$  [°C],
- dane GPS (długość i szerokość geograficzna),
- prędkość  $V$  [km/h],
- przyspieszenie  $A$  [ $m/s^2$ ].

Przykładowy fragment charakterystyk eksploatacyjnych pojazdu uzyskanych w trakcie eksperymentalnego przejazdu za pośrednictwem układu telemetrii przedstawia tablica 1.

Tab. 1

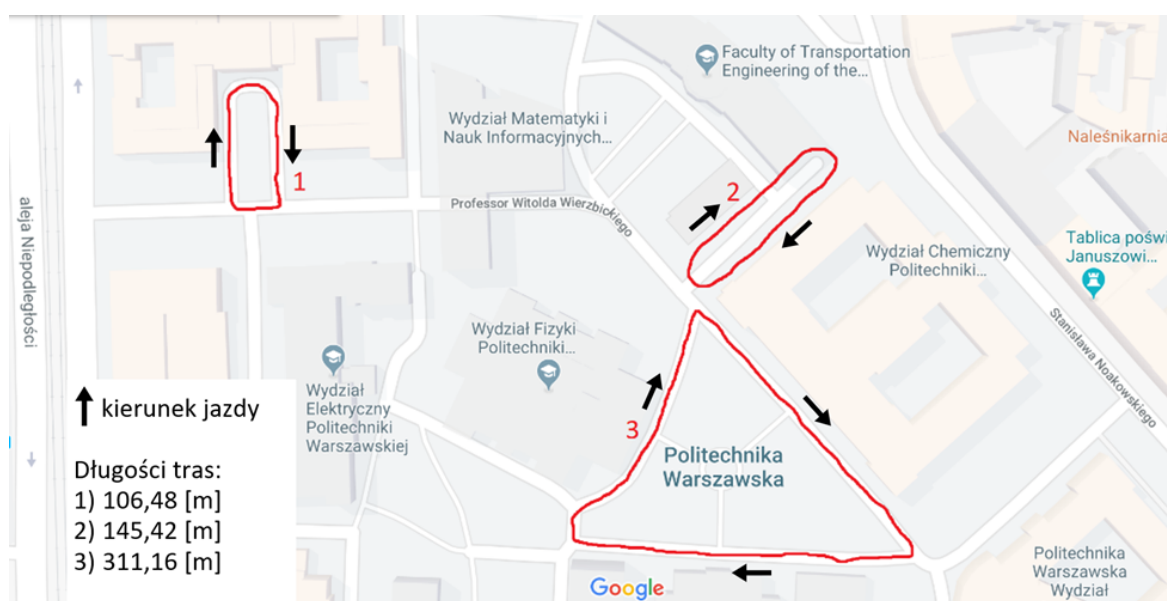
Wybrany fragment charakterystyk eksploatacyjnych gokarta

Time [s]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	I [A]	A [ $m/s^2$ ]	V [km/h]	U [V]	Lon	Lat
620,0	31,20	21,91	13,03	15,66	-2,6820	58,76	43,24	21,00783166	52,22205833
621,0	31,20	21,91	13,03	15,66	-2,6820	58,76	43,24	21,00783166	52,22205833
622,0	31,20	21,91	13,30	15,66	-0,1532	43,63	44,04	21,00783166	52,22205833
623,0	31,20	21,91	13,30	15,66	-1,9920	43,63	44,04	21,00783166	52,22205833
624,0	31,20	21,99	12,94	18,42	-3,410	33,16	44,69	21,00783166	52,22205833
625,0	31,20	21,99	12,94	18,42	0,6514	33,16	44,69	21,00783166	52,22205833

Źródło: opracowanie własne

## 4. PRZEPROWADZENIE EKSPERYMENTU POMIAROWEGO

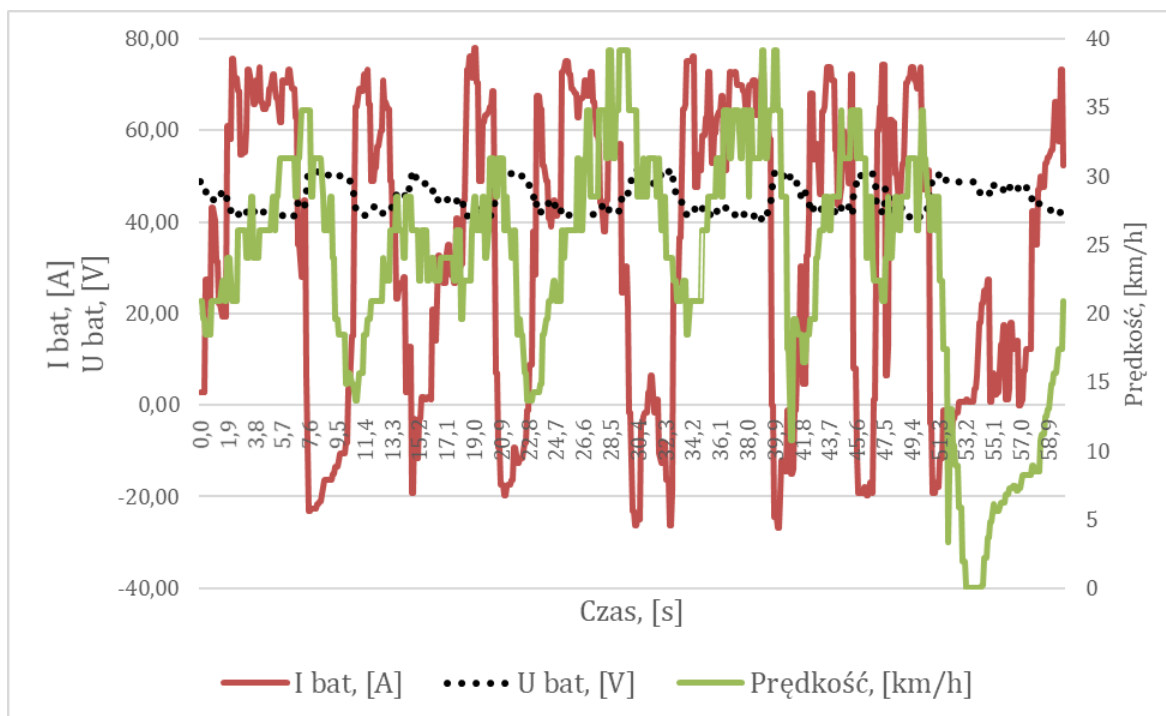
Eksperymenty zostały przeprowadzone na terenie kampusu Politechniki Warszawskiej w sąsiedztwie Wydziału Transportu. Wyznaczone zostały 3 trasy. Trasa 1 w kształcie eliptycznym, po której pojazd elektryczny poruszał się bez zatrzymania wykonując kolejne okrążenia. Trasa 2 stanowiła prostą, po której pojazd poruszał się ze zmienną prędkością, po wielokroć hamując oraz przyspieszając. Trasa 3 stanowiła przykład drogi z lokalnym ograniczeniem prędkości. Rysunek 2 przedstawia przybliżoną wizualizację tras utworzoną na podstawie danych GPS pozyskanych z systemu telemetrii pojazdu.



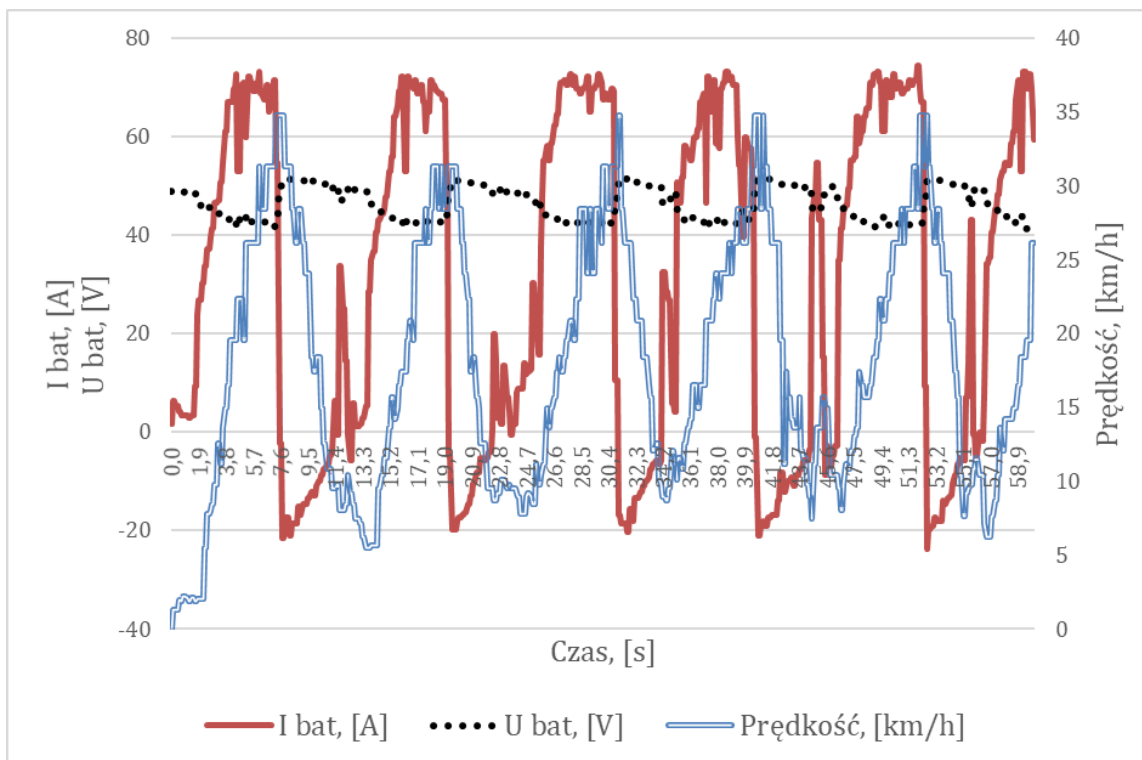
Rys. 2. Wizualizacja wybranych tras przejazdu  
Źródło: opracowanie własne

## 5. WSTĘPNA ANALIZA POZYSKANYCH POMIAROWYCH CHARAKTERYSTYK

Rysunki 3, 4 przedstawiają wykresy zależności pomiędzy prądem silnika i napięciem baterii, a prędkością poruszania się pojazdu dla trasy 1 i trasy 2.



Rys. 3. Dane z odczytu czujników prędkości pojazdu, napięcia baterii i prądu silnika dla trasy 1  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie pozyskanych pomiarowych charakterystyk



Rys. 4. Dane z odczytu czujników prędkości pojazdu, napięcia baterii i prądu silnika dla trasy 2  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie pozyskanych pomiarowych charakterystyk

Dane analizowano w jednonominutowym przedziale czasu. W trakcie postoju napięcie baterii pojazdu wynosiło 48 V. Wciśnięcie dźwigni przyspieszenia gokarta powodowało stopniowe zwiększenie prądu płynącego przez silnik od 0 do maksymalnie ~70 A, co skutkowało przyspieszeniem pojazdu do osiągnięcia maksymalnie zarejestrowanej prędkości ~40 km/h oraz obniżeniem napięcia baterii do ~42 V. Na odcinkach trasy pokonywanych ze stałą prędkością prąd i napięcie utrzymywały się na stałym poziomie. Hamownie powodowało zmianę kierunku prądu (wartości ujemne na wykresie), na skutek czego bateria była doładowywana energią generowaną przez silnik pojazdu (tzw. rekuperacja). Odnotowano przy tym wzrost napięcia na baterii do ~52 V.

Na podstawie chwilowych pomiarów prądu silnika i napięcia baterii można estymować zużycie energii na wybranym odcinku trasy  $S(t_x, t_y)$  gdzie  $t_x$  jest numerem pierwszego pomiaru należącego do odcinka,  $t_y$  – numerem ostatniego pomiaru,  $t_x < t_y$ . Wówczas moc bieżąca silnika w momencie  $t_i$  można obliczyć jako  $P(t_i) = I(t_i) \times U(t_i)$ . Uwzględniając stałą częstotliwość  $f$  dokonywania pomiarów, zużycie energii na trakcję w przedziale  $(t_x, t_y)$  można oszacować jako

$$E_{tr}(t_x, t_y) = \sum_{i=x}^y \left( \frac{I(t_i) \times U(t_i)}{f} \right) \quad (1)$$

Całkowite zużycie energii na pokonanie odcinka trasy składa się z energii na trakcję  $E_{tr}$  oraz energii  $E_{dod}$  zużywanej przez inne elektroniczne podzespoły pojazdu, do których należy m. innymi komputer pokładowy wraz z zespołem czujników, modemy radiowe przekazujące informacje na odległość itp.

$$E_{całk}(t_x, t_y) = E_{tr} + E_{dod} \quad (2)$$

Zakłada się, że wartość składnika  $E_{dod}$  w czasie jest stała. Na podstawie pomiarów w trakcie postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem uzyskano wynik pomiaru  $E_{dod} = 0,5A \times 48V \times 1h = 24 Wh$ .

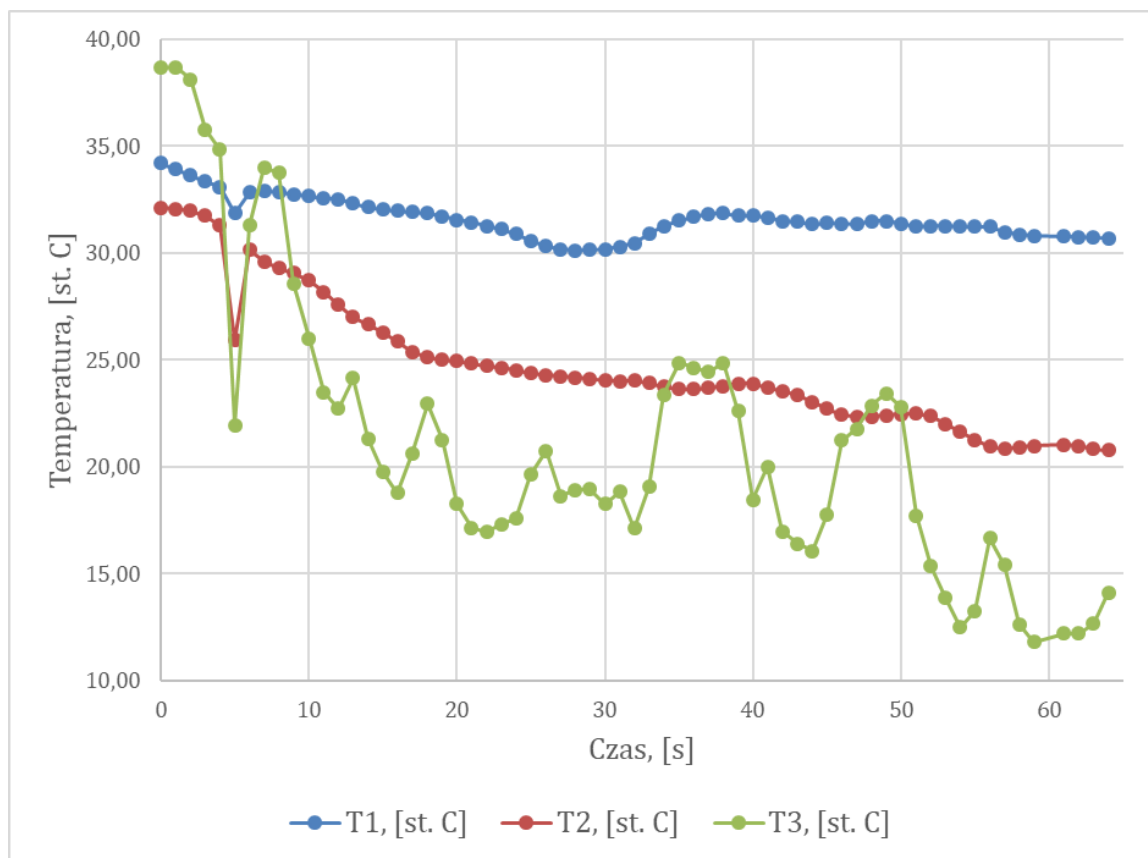
Dokonując obliczeń wg wzoru (2) na podstawie eksperymentalnych danych dla poszczególnych tras przejazdu, uzyskujemy wyniki przedstawione w tab. 2.

Tab. 2

#### Wyniki estymacji zużycia energii elektrycznej przez gokarta

Trasa	Czas przejazdu, [min]	Energia zużyta na trakcję, [Wh]	Energia odzyskana przy hamowaniu, [Wh]	Sumaryczne zużycie energii na trasie, [Wh]
Odcinek trasy 1	1	25,77	2,44	23,33
Odcinek trasy 2	1	24,01	3,02	20,99
Trasa 1+2+3	65	463,67	38,20	425,47

Dane przekazywane przez układ telemetrii zawierają również pomiary bieżących wartości temperatury układu chłodzenia (T1), podwozia (T2) oraz przekształtnika prądu (T3). Na rysunku 5 przedstawiono uśrednione w przedziale 1-minutowym wartości poszczególnych pomiarów.



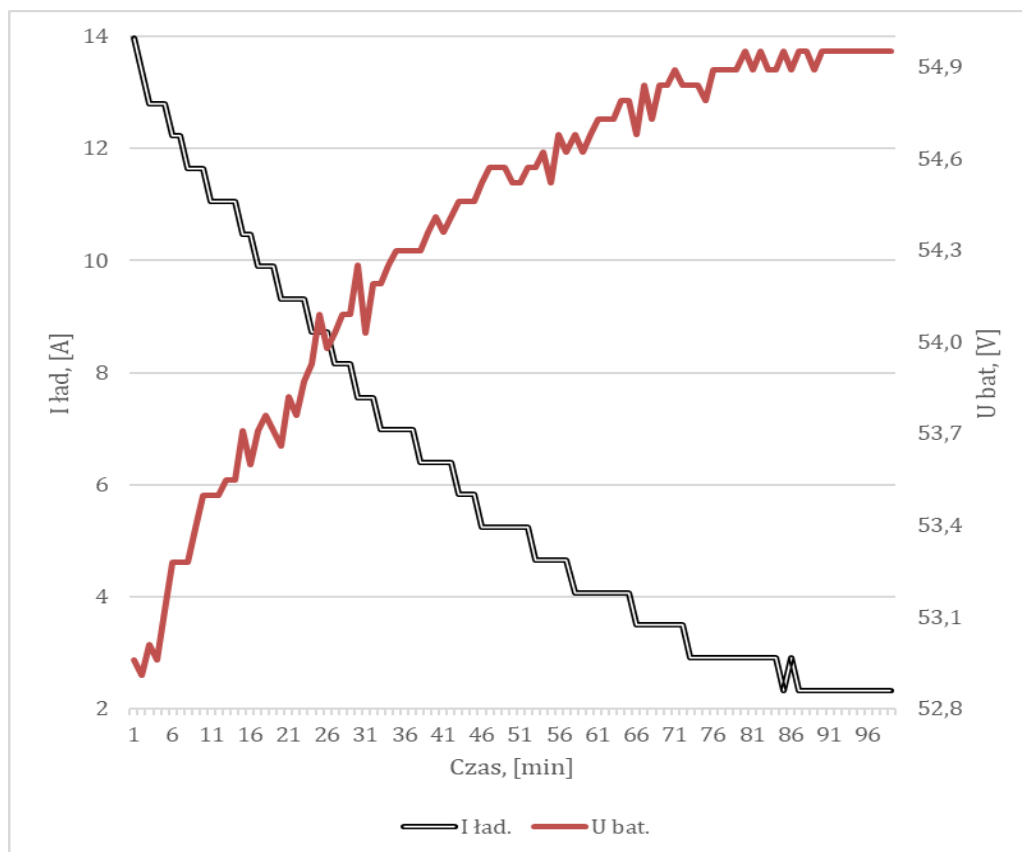
Rys. 5. Dane z odczytu czujników temperatury podwozia, układu chłodzenia oraz przekształtnika  
*Źródło:* opracowanie własne na podstawie pozyskanych pomiarowych charakterystyk

W dniu przeprowadzenia eksperymentu temperatura otoczenia wynosiła ok  $10^{\circ}\text{C}$ , słonecznie i bez wiatru. Gokart był przechowywany w pomieszczeniu laboratorium w temperaturze pokojowej  $24^{\circ}\text{C}$ . Przed rozpoczęciem eksperymentu baterie pojazdu były ładowane w celu osiągnięcia maksymalnej pojemności, co spowodowało zwiększenie temperatury odczytywanej przez czujniki. Analizując zmiany temperatury układu chłodzenia T1 należy zauważyć, że przez cały czas eksperymentu oscyluje ona w przedziale  $(30\text{--}35)^{\circ}\text{C}$ . Można wnioskować, że jest ona zdeterminowana warunkami pracy silnika określanymi przez prąd i w niewielkim stopniu zależy od temperatury otoczenia. Temperatura podwozia T2 praktycznie nie zależy od trybu jazdy i stopniowo dąży do temperatury otoczenia. Temperatura przekształtnika T3 również dąży do temperatury otoczenia, jednocześnie wykazując się największymi odchyleniami pomiarów od wartości uśrednionej. Jest to związane z niewielkimi rozmiarami urządzenia, przez które płyną intensywnie zmieniające się prądy o znacznej wielkości, oraz umieszczeniem go na radiatorze co skutkuje szybkim schładzaniem się podczas jazdy. Podsumowując analizę zmiany temperatury w trakcie eksperymentalnego przebiegu, można wnioskować o braku zagrożenia związanego z przegrzewaniem się istotnych elementów elektrycznego pojazdu.

## 6. WERYFIKACJA ILOŚCI ZUŻYTEJ ENERGII NA PODSTAWIE DANYCH ŁADOWANIA

Przed rozpoczęciem eksperymentu bateria pojazdu były naładowane do maksymalnej pojemności. W trakcie jazdy próbnej trwającej 65 min (bez uwzględnienia postojów z wyłączonym silnikiem) nastąpiło częściowe rozładowanie baterii w wysokości oszacowanej w pkt. 4.

W celu weryfikacji poprawności powyższego oszacowania zużycia energii przeprowadzono pomiary prądu i napięcia na baterii pojazdu w procesie ponownego ładowania. W tym celu pojazd z wyłączonym silnikiem podłączono do stacjonarnego źródła zasilania. Uruchomiono pokładowy moduł telemetrii, za pomocą którego rejestrowano parametry ładowania. Zmierzono również prąd pobierany przez układ telemetrii. Wynosił on 0,5 A, co zostało uwzględniono w dalszych obliczeniach. Przyjęto założenie, że proces ładowania zostanie przerwany w momencie, kiedy prąd ładowania zmniejszy się do wartości prądu pobieranego przez układ telemetrii. Przebieg procesu ładowania przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Przebieg procesu ładowania baterii pojazdu

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych ładowania baterii pojazdu

Ilość energii elektrycznej zużytej na ładowanie do baterii obliczono wg wzoru (3)



$$E_{lad}(x, y) = \sum_{i=x}^y \left( \frac{I_i \times U_i}{f} \right) \quad (3)$$

gdzie:  $x$  – numer pomiaru rozpoczynającego rejestrację procesu ładowania,  $y$  – numer pierwszego pomiaru, dla którego  $I_y < 0,5A$ ,  $f$  – częstotliwość pomiarów ( $f = 10$ ).

W rezultacie obliczeń uzyskano wartość  $E_{lad} = 399 Wh$ . Porównując tę wartość z energią zużytą na trakcję  $E_{tr} = 425 Wh$  należy stwierdzić zadowalającą dokładność zastosowanej metody szacowania zużycia energii przez pojazd elektryczny na podstawie danych telemetrycznych.

## 7. WNIOSKI

Aktualność zagadnień poruszanych w artykule jest związana z popularyzacją personalnych środków elektrycznego transportu. Należy do nich gokart, który został zbudowany przez członków Studenckiego koła naukowego KNEST Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej w ramach grantu rektorskiego. Analiza literatury wykazała brak szczegółowych informacji z zakresu eksploatacji pojazdu elektrycznego o małych gabarytach. Celem prac przedstawionych w artykule było oszacowanie zużycia energii elektrycznej przez pojazd typu gokart na podstawie chwilowych pomiarów charakterystyk ruchu. Metoda badawcza polegała na przeprowadzeniu eksperymentalnych jazd na wyznaczonych trasach, podczas których za pomocą autorskiego systemu telemetrii zgromadzono dane pomiarowe wybranych charakterystyk eksploatacyjnych. Do estymacji zużycia energii wykorzystano dyskretne pomiary wartości prądu silnika pojazdu oraz napięcia na baterii. Uwzględniono przy tym częściowe odzyskiwanie energii w trakcie hamowania. Porównując krótkie przejazdy dla różnych tras, stwierdzono zależność zużycia energii od profilu trasy oraz stylu jazdy kierowcy. Następnie ilość energii zużytej na trakcję została porównana z ilością energii uzupełnionej w czasie stacjonarnego ładowania. Przy tym uzyskano wysoki stopień zgodności wyników. Zastosowana metoda estymacji zużycia energii elektrycznej na trakcję charakteryzuje się wysokim stopniem dokładności i jest wystarczająca do prowadzenia dalszych badań. Uzyskane w trakcie eksperymentu dane będą stanowić podstawę do budowy fizycznego modelu małego gabarytowego pojazdu elektrycznego.

## Bibliografia

1. Koniak M., Czerepicki A., Jaskowski P. [i in.]: Modyfikacje pojazdu elektrycznego umożliwiające zewnętrzne bezprzewodowe sterowanie, na przykładzie gokarta elektrycznego, w: Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów, nr 4, 2015, ss. 467 – 474
2. Czerepicki A., Tomczuk P., Koniak M., Jaskowski P., Kowalski R., Mytrovtsi S.: Układ telemetrii do rejestracji parametrów eksploatacyjnych pojazdów elektrycznych, w: Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, nr 113, 2016, ss. 75-88 (7 pkt)
3. Koniak M., Czerepicki A., Tomczuk P.: Test bench for battery energy storage selection for use on solar powered motor yachts, w: Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie, vol. 46, nr 118, 2016, ss. 197-202, DOI:10.17402/137

4. Koniak M.: Aspekty ekonomiczne, techniczne i środowiskowe ładowania pojazdów elektrycznych, w: Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, nr 98, 2013, ss. 271-278
5. Moćko W., Ornowski M., Szymańska M.: Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny w czasie testów drogowych, w: Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe, nr 2(99), 2013, ss. 31-35
6. Choromański W. (red.): Ekomobilność. Innowacyjne i ekologiczne środki transportu, vol. 1, 2015, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności

### **ENERGY CONSUMPTION TESTING OF AN ELECTRIC VEHICLE OF THE GO-KART TYPE WITH THE USE OF TELEMETRY SYSTEM**

**Summary:** The article presents the results of the analysis of energy consumption for traction by a passenger electric go-kart vehicle. The topicality of the research problem is related to the popularization of personal means of transport, which are becoming more and more accessible to the ordinary user. Important characteristics of the energy system of the vehicle are presented. Experimental driving on designated routes was carried out, during which the original telemetry system was used to collect measurement data of selected operating characteristics of the vehicle in motion. Then, on the basis of the measurement results, the average electricity consumption on the selected sections of the route was estimated, as well as the total consumption for all routes. Comparing short trips for different routes, the dependence of energy consumption on the route profile and driving style of the driver have been confirmed. After completion of the test drive, the process of energy replenishment in the vehicle battery was recorded and on this basis the correctness of energy consumption calculations was verified. The data obtained during the experiment will form the basis for the construction of a small electric vehicle model.

**Keywords:** passenger electric vehicles, energy consumption, telemetry