

**Marcin Koniak, Andrzej Czerepicki, Piotr Tomczuk**

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

**Burak Şamşul**

Milper Propeller Technologies Inc.

## **CHARAKTERYSTYKI EKSPLOATACYJNE WYBRANEGO PAKIETU BATERYJNEGO DLA ZDEFINIOWANYCH CYKLI PRACY JACHTU NAPĘDZANEGO ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ**

Rękopis dostarczono, marzec 2016

**Streszczenie:** w artykule opisany jest sposób wyznaczania charakterystyk pracy akumulatora w projekcie „Innowacyjny jacht z hybrydowym napędem zasilanym z odnawialnych źródeł energii (REP SAIL)”. W zaproponowanym rozwiązaniu przebieg pracy zasobnika tworzony jest na podstawie jego prądu pracy. Metoda zakłada możliwość symulacji pracy całego pakietu poprzez skalowanie wyniku symulacji pracy jednego ogniwa wchodzącego w jego skład. Autorzy przedstawili sposoby pozyskiwania charakterystyk obciążenia akumulatora podczas cyklu pracy pojazdu, podzielono je na: pomiary przeprowadzane na rzeczywistych pojazdach, symulacje oparte na modelach fizycznych, symulacje korzystające z rzeczywistych danych przejazdu pojazdu innego typu takich jak: prędkość, przyspieszenie, pozycja GPS i z nimi zestawione średnie wartości dla również pomiarowo zebranych danych dotyczących zależności obciążenia baterii od warunków pracy, symulacje oparte na prognozowaniu zapotrzebowania za pomocą sumowania mocy odbiorów wykorzystywanych w pojeździe w funkcji czasu oraz zakładanej charakterystyki pracy napędu. Zaprezentowano przykładowe charakterystyki pracy akumulatora w projekcie REP-SAIL stworzone na podstawie prognozowanych danych dla eksploatacji jachtu w trzech przypadkach: cumowania, rejsu z wykorzystaniem silnika oraz rejsu z wykorzystaniem żagli.

**Słowa kluczowe:** napęd elektryczny, akumulator, symulacja komputerowa

### **1. WSTĘP**

Transport realizowany przez pojazdy zasilane energią elektryczną w dzisiejszych czasach jest już codziennością, a rozwój tej technologii stanowi przedmiot badań w wielu czołowych instytucjach naukowych i przedsiębiorstwach. Według dostępnych analiz w ciągu następujących dwudziestu lat rynek ten ma się rozwinąć do poziomu przy którym przeszło 35% nowych nabywanych samochodów będzie zasilane z akumulatorów [1]. O sile tego zjawiska świadczy również fakt, że w Warszawie po przetestowaniu linii obsługiwanej przez 10 autobusów eklektycznych planowany jest zakup kolejnych 130 sztuk. Największą barierą tej

technologii jest cena i ograniczenia eksploatacyjne akumulatorów. Do podjęcia decyzji o inwestycji w pojazdy elektryczne niezbędna jest więc analiza ich eksploatacji również w odniesieniu do magazynu energii. To właśnie stało się powodem podjęcia przez autorów tematyki modelowania pracy akumulatora współpracującego z pojazdem elektrycznym. Istnieje wiele opisanych w literaturze sposobów modelowania pracy akumulatora. Można je podzielić na następujące kategorie [2]:

- fizyczne [3],
- elektryczne [3],
- elektrochemiczne [4],
- stochastyczne [5],
- analityczne [6],
- empiryczne [7], [8].

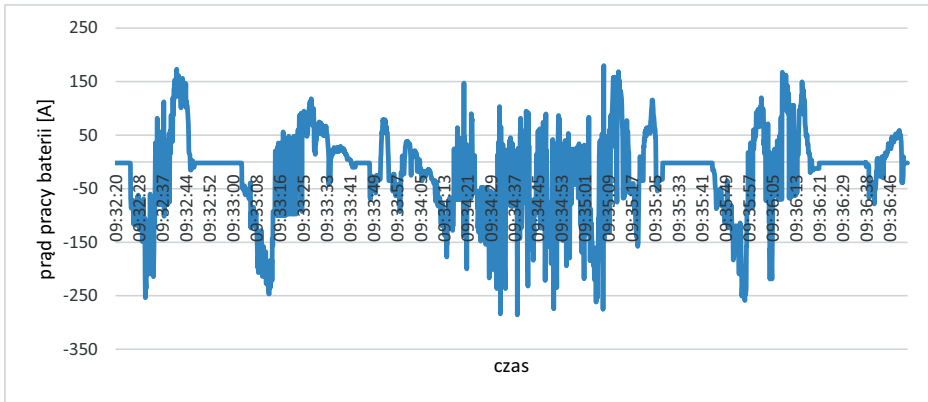
Modelowanie pracy akumulatora zaproponowane przez autorów można zaklasyfikować do modeli empirycznych. Jego charakterystyczną cechą jest oparcie wyników symulacji pracy na charakterystykach eksploatacyjnych zebranych z ogniw zgodnie z opracowanym programem badań. Oryginalny wkład autorów polega na zaproponowaniu modelowania akumulatora na podstawie danych eksploatacyjnych pojedynczego ogniwa pozyskanych pomiarowo. Metoda zakłada zebranie rzeczywistych pomiarów zgodnie założonym programem badań i na podstawie pozyskanych charakterystyk modelowanie pracy całego akumulatora. W skład rejestrowanych danych wchodzi następujące parametry procesu: temperatura, prąd i energia ładowania/ rozładowania, napięcie ogniwa, rezystancja wewnętrzna [9].

Badania prowadzone były w ramach projektu „Innowacyjny jacht z hybrydowym napędem zasilanym z odnawialnych źródeł energii (REP SAIL)”.

## **2. METODA WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK PRACY AKUMULATORÓW TRAKCYJNYCH**

Jak już zostało wspomniane znanych jest wiele modeli opisujących pracę akumulatorów [2]. Jednak barierą do przemysłowego ich zastosowania są występujące w nich liczne założenia upraszczające oraz złożoność procedury obliczeniowej. Wiele z nich wymaga wprowadzenia danych eksperymentalnych, które mogą być pozyskane tylko za pomocą wysoko wyspecjalizowanych testów laboratoryjnych.

Analiza literatury wykazała, brak uniwersalnych metod wyznaczania charakterystyk eksploatacyjnych akumulatorów bazujących na ujednoliconych seriach danych dla różnych technologii bateryjnych, które dodatkowo uwzględniałyby wpływ temperatury i efekt starzenia. Istniejące natomiast metody nie zostały przetestowane dla najnowszych technologii takich jak dla przykładu ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe. Została więc stwierdzona potrzeba wykonania modelu odwzorowującego pracę dowolnego typu akumulatora, dla którego dane wejściowe mogą być zebrane w prosty sposób za pomocą uniwersalnego programu badań. W zaproponowanym rozwiązaniu przebieg pracy zasobnika tworzony jest na podstawie jego prądu pracy. Przykładowa charakterystyka takiego prądu opracowana na podstawie zarejestrowanych parametrów ruchu pojazdu została pokazana na rysunku 1.



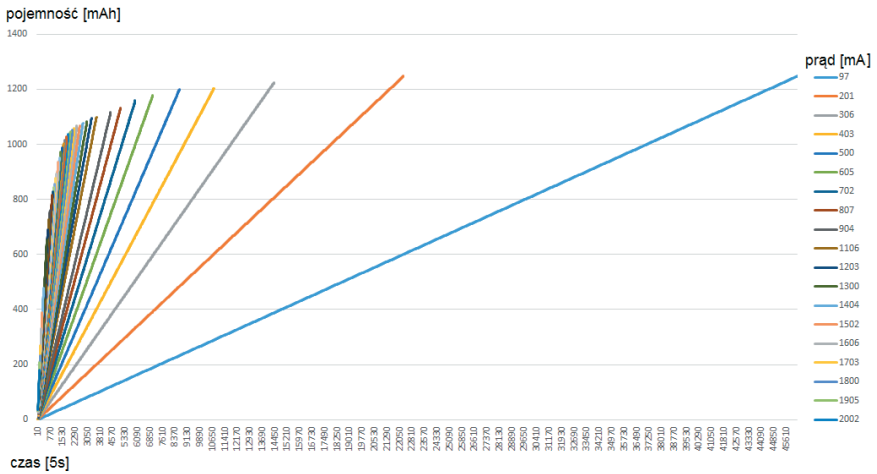
Rys. 1. Przykładowy przebieg prądu pracy akumulatora opracowany na podstawie zarejestrowanych parametrów ruchu pojazdu

W zależności od chwilowego prądu ogniwa wyrysowywany jest odpowiadający mu przebieg dobrany z rodziny charakterystyk, których przykład można znaleźć na rysunku nr 2, przedstawianym wybrane wyniki dla ogniwa typu litowo-polimerowego. Dla każdej zmiany prądu następuje zmiana przebiegu którym podąża proces. Opracowane więc zostało i zaproponowane rozwiązanie komputerowo modelujące charakterystykę pracy pakietu baterijnego bazujące na rzeczywistych danych pomiarowych. Algorytm postępowania jest przedstawiony na rysunku 3. Metoda zakłada możliwość symulacji pracy całego pakietu poprzez skalowanie wyniku symulacji pracy jednego ogniwa wchodzącego w jego skład [10]. Możliwość takiego skalowania potwierdzona została badaniem literaturowym oraz wynika z wcześniejszego doświadczenia zespołu w tej dziedzinie. Podejście to uwzględnia takie cechy charakterystyczne jak:

- dostępna pojemność ogniwa uzależniona od prądu ładowania/ rozładowania,
- rzeczywiste straty energii związane z ogrzewaniem się ogniwa,
- zmianę temperatury ogniwa w zależności od prądu pracy, ten parametr jest istotny ze względów bezpieczeństwa i pozwala na jego podstawie podjąć decyzję o dodanie układu chłodzenia do konstrukcji pakietu baterijnego.

Na potrzeby prezentowanej metody wyznaczania charakterystyk eksploatacyjnych ogniw konieczne było opracowanie programu badań, podczas których zebrane zostaną niezbędne dane. Taki program został ułożony, i jego główne założenia są następujące:

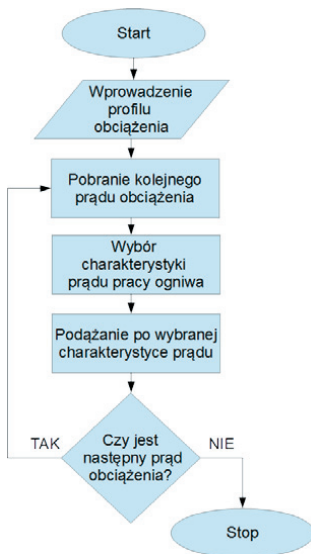
- przeprowadzanie testów dla warunków, które z punktu widzenia eksploatacji mogą mieć największy wpływ na akumulator,
- wyznaczenie prądów pracy dla akumulatora i przeliczeni ich na obciążenie ogniwa, czyli określenie zakresu w jakim zbierane będą charakterystyki ogniwa,
- przeprowadzenie wszystkich pomiarów w identycznych warunkach z rejestracją tych samych danych w równych odstępach czasu i z takim samym krokiem zmiany prądu.



Rys. 2. Zależność pojemności ogniwa litowo-polimerowego od prądu ładowania w funkcji czasu, charakterystyka pozyskana pomiarowo w ramach programu REP-SAIL

Każdy pomiar musi zawierać następujące dane:

- znacznik czasowy,
- temperatura ogniwa,
- prąd pracy,
- energia przesłana/ odebrana,
- napięcie ogniwa.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy algorytmu tworzenia charakterystyki pracy ogniwa na podstawie zadanego profilu obciążenia

### 3. CHARAKTERYSTYKI OBCIĄŻENIA AKUMULATORA TRAKCYJNEGO

Do sporządzenia charakterystyk eksploatacyjnych akumulatorów w zakładanych aplikacjach konieczne jest pozyskanie przebiegów obciążeń, którymi w nich będą obciążane. Istnieje wiele sposobów otrzymania tego typu danych, należą do nich:

1. Pomiar przeprowadzony na rzeczywistych obiektach. Wymagają wykorzystania dedykowanego sprzętu oraz czasu obsługi. Ich wynik jest jednak najdokładniejszy, a ich wartość badawcza największa.
2. Symulacje wykorzystujące istniejące modele pracy oparte na zależnościach fizycznych [11]. W tym przypadku wyniki wymagają dodatkowej walidacji. Otrzymane przebiegi mogą odbiegać od realnych wartości, spowodowane to jest uproszczeniami występującymi w wykorzystanych modelach.
3. Symulacje wykorzystujące realne dane pozyskane pomiarowo. Przykładem tu mogą być charakterystyki przejazdu autobusu oparte o rozkład jazdy oraz warunki drogowe modelowane za pomocą rzeczywistych przebiegów eksploatacyjnych. Taki sposób symulacji jest elastyczny i może zostać zastosowany dla scenariuszy w których rzeczywiste miary są niemożliwe. Pozyskane w ten sposób wyniki dość dobrze odzwierciedlają rzeczywiste warunki.
4. Prognozowanie zapotrzebowania za pomocą sumowania mocy odbiorów wykorzystywanych w pojeździe w funkcji czasu oraz zakładanej charakterystyki pracy napędu. Metoda ta jest niedokładna, ale pozwala na łatwe wyznaczenie najcięższych możliwych do przewidzenia scenariuszy pracy.

Jako dane trasy przejazdu do symulacji 2 oraz 3 mogą być użyte odpowiednio przygotowane wyniki pomiarów drogi pojazdów rzeczywistych. Często jednak konieczna jest ocena pracy i porównanie na podstawie zestandaryzowanych danych wejściowych. W takim przypadku dla samochodów można zastosować charakterystyki zgodne ze zestandaryzowanymi testami przykładowo: New European Driving Cycle(NEDC); Artemis: miejski, wiejski czy na autostradę lub cykl FTP-75. Na potrzeby autobusów opracowane zostały przez Union Internationale des Transports Publics testy o nazwie SORT [12], które służą do oceny zużycia paliwa. Jednak one również mogą stanowić bazę do porównań wykorzystania akumulatorów w tego typu pojazdach elektrycznych.

### 4. WYBRANE WYNIKI SYMULACJI

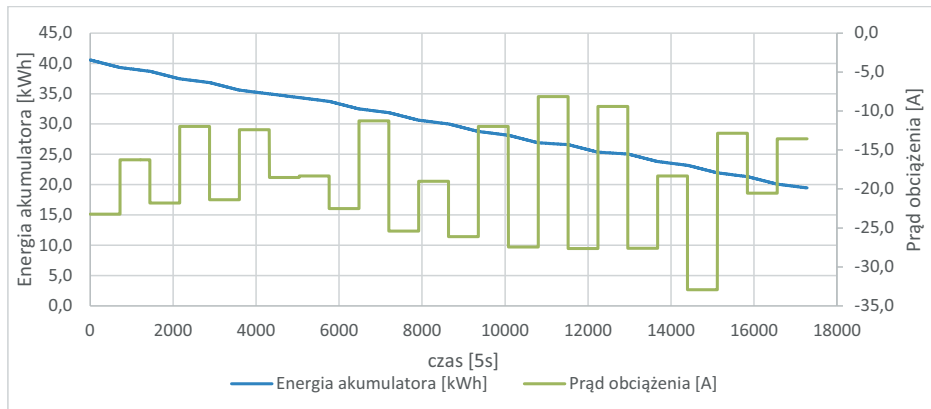
Stworzona metoda symulacji eksploatacji akumulatora doskonale sprawdza się we współpracy z każdym z przedstawionych powyżej modeli pozyskania danych obciążenia. W projekcie REP-SAIL do wyznaczenia zapotrzebowania jachtu na energię został wybrany czwarty sposób, czyli prognozowanie godzinowe wykorzystania każdego dostępnego na pokładzie urządzenia. Przeanalizowane zostało przeszło 50 odborników energii elektrycznej zainstalowanych na jachcie, które można podzielić na pompy, urządzenia wspomagające

żeglugę, nawigację, światła, klimatyzację oraz wyposażenie kabiny. Jacht będzie wyposażony w źródła energii pochodzące z odnawialnych jej zasobów takich jak słońce - panele fotowoltaiczne, woda – hydroturbiny, wiatr – niewielka turbina wiatrowa. Przy tworzeniu charakterystyk obciążenia nie zostały one jednak wzięte pod uwagę, gdyż celem symulacji miała być analiza najcięższych dla akumulatora przypadków, w których to z niego brana jest cała wymagana energia. Symulacje zostały wykonane dla pakietów złożonych z następujących ogniw, których charakterystyki eksploatacyjne zostały zebrane laboratoryjnie zgodnie z opracowanym programem badań:

- litowo-jonowa: Panasonic NCR 18650B,
- litowo-jonowa: Samsung INR 18650-20R,
- litowo-jonowa: A123 ANR 26650,
- litowo-polimerowa: REDOX battery.

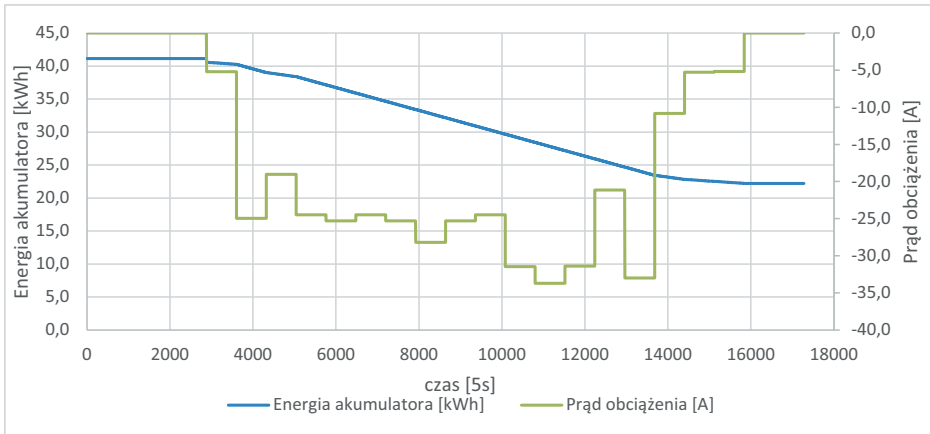
Poniżej przedstawione charakterystyki oparte są o dane ogniwa litowo-polimerowego.

Pierwszym analizowanym trybem pracy było cumowanie w porcie bez połączenia do zasilania na brzegu. Najwięcej energii w czasie doby zostało wykorzystane na podgrzewanie wody- 6 kWh, na klimatyzację i układy w kokpicie po około 2,5 kWh. Pomiędzy 1 a 2 kWh pobrały następujące urządzenia: kuchenka z piekarnikiem, oświetlenie, pompy i wentylacja.



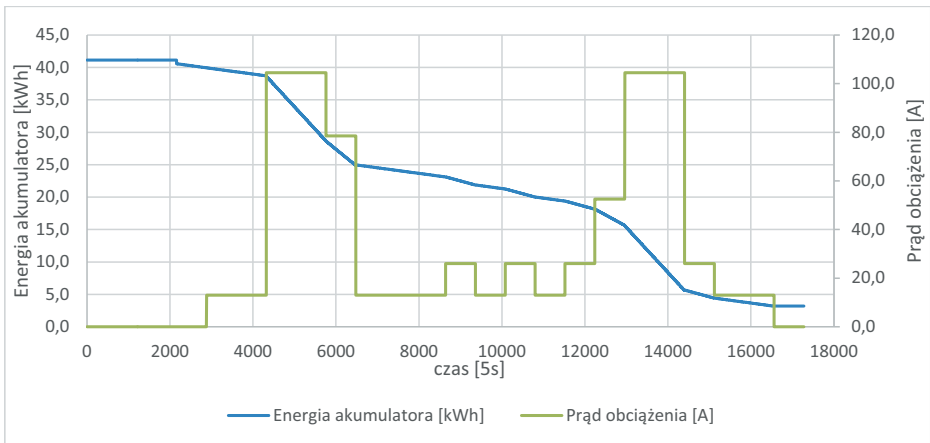
Rys. 4. Przebieg obciążenia i zmiany energii zgromadzonej w baterii w funkcji czasu dla cumowania w porcie bez dostępu do zewnętrznego źródła zasilania

Drugim analizowanym trybem pracy był rejs pod żaglami. Tak jak w poprzednim przypadku obciążenie zostało godzinowo rozłożone w czasie jednej doby. Tym razem najwięcej energii zostało wykorzystane na urządzenia wspomagania żeglugi (sterowanie żalami) ponad 6 kWh, na klimatyzację ponad 3,5 kWh. Pomiędzy 1 a 2 kWh pobrały następujące urządzenia: silnik, wyposażenie kokpitu i wentylacja.



Rys. 5. Przebieg obciążenia i zmiany energii zgromadzonej w baterii w funkcji czasu dla rejsu pod żaglami

Trzecim analizowanym trybem pracy, zarazem najcięższym jeśli chodzi o obciążenie akumulatora, był rejs z wykorzystaniem wyłącznie silnika elektrycznego. Najwięcej energii w czasie doby zostało wykorzystane na pracę silnika elektrycznego wprawiającego w ruch turbinę napędową, było to 24 kWh. Znaczne ilości energii bo ponad 4 kWh pobrał również układ klimatyzacji, ponieważ musiał odprowadzić ciepło wytworzone przez pracujący napęd. Jak w poprzednich od 1 do 2 kWh pobrało wyposażenie kokpitu i wentylacja.



Rys. 6. Przebieg obciążenia i zmiany energii zgromadzonej w baterii w funkcji czasu dla rejsu z wykorzystaniem wyłącznie silnika elektrycznego

## 5. PODSUMOWANIE

Wykonane analizy i uzyskane przebiegi pozwalają na obserwację charakterystyk pracy akumulatorów w zadanych warunkach eksploatacyjnych. Możliwe jest symulowanie pracy wielu typów ogniw na podstawie ich danych eksploatacyjnych zebranych za pomocą uniwersalnego programu badań. Jako dane drogi mogą zostać wykorzystane zarówno rzeczywiste wyniki pomiarów jak również efekty opisanych w artykule metod symulacyjnych.

Zespół autorów planuje rozwijać zarówno komputerowy model odpowiadający za symulacje pracy ogniw i akumulatorów jak i stanowisko badawcze tak by możliwe były testy całych modułów bateryjnych.

Projekt finansowany jest przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu ERA – NET TRANSPORT.

### Bibliografia

1. Randall T: Here's How Electric Cars Will Cause the Next Oil Crisis, "Bloomberg.com" 25.02.2016 [dostęp: 1 sierpnia 2016], <http://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis>.
2. Jongerden M. R., Haverkort B. R., Which battery model to use?, in *IET Software*, vol. 3, no. 6, pp. 445-457, December 2009.
3. Fizyczne Doyle M., Fuller T. F., Newman j., "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, no. 6, pp. 1526 – 1533, 1993.
4. Elektryczne Hageman S. C., "Simple PSpice models let you simulate common battery types," *Electronic Design News*, vol. 38, 1993, pp. 117 – 129.
5. Elektrochemiczne Muralidharan V.S., "Warburg impedance - basics revisited", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 44 Iss: 1, 1997, pp.26 – 29.
6. Stochastyczne Rao V., Singhal G., Kumar A., Navet N., "Battery model for embedded systems," in *Proceedings of the 18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design (VLSID'05)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, pp. 105–110.
7. Analityczne Rakhmatov D., Vruidhula S., Wallach D. A., "Battery lifetime predictions for energy-aware computing," in *Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED '02)*, 2002, pp. 154–159.
8. Empiryczne Samadani E., Farhad S., Scott W., Mastali M., Gimenez L. E., Fowler M., Fraser R. A., *Empirical Modeling of Lithium-ion Batteries Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy Tests*. *Electrochimica Acta*, 169-177.
9. Koniak M., Tomczuk P., Czerepicky A., Jaskowski P.: *Koncepcja stanowiska do badań eksploatacyjnych ogniw chemicznych stosowanych w elektrycznych środkach transportu*, w: *Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów*, Instytut Logistyki i Magazynowania, nr 4, 2015, ss. 475 - 480
10. Dubarry M., Vuillaume N., Liaw B.Y.. From single cell model to battery pack simulation for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 186, 500–507 (2009).
11. Kozłowski M., Tomczuk K., Szczypior J.: *Methodology of determining basic technical parameters of electric-drive car*, *Przegląd Elektrotechniczny(Electrical Review)*, nr 10/2011, str. 299-304.
12. UITP. (2004). *SORT ñ Standardise On-Road Test Cycles*. UITP ñ International Association of Public Transport. Brussels 2004. [www.uitp.com](http://www.uitp.com)



## **OPERATING CHARACTERISTICS OF SELECTED BATTERY FOR DEFINED WORK CYCLES OF ELECTRICALLY POWERED YACHT**

**Summary:** article describes a way to calculate operating characteristics of battery in „Innovative yacht with a hybrid drive powered by renewable energy sources (REP SAIL)” project. In proposed solution the work course of battery is plotted based on operating current. The method assumes possibility of work simulation of whole package by graduation of simulation result of one cell that battery is composed of. The authors present ways of acquiring workload characteristics of battery during work cycle of vehicle, divided into: measurements run on actual vehicles, simulations based on physical models, simulations using actual ride data of other type vehicle such as: velocity, acceleration, GPS coordinates and juxtaposed with them average values for also acquired with measurements data concerning relationship between battery workload and work conditions, simulations based on prognosis of demand with help of summing total power of receivers used in the vehicle in function of time and assumed operating characteristic of the drive. Article presents exemplary operating characteristics of battery in REP-SAIL project developed based on projected data for yacht usage in three cases: moorage, cruise using the engine and cruise using sails.

**Keywords:** electric drive, battery, computer simulation