

# Zarządzanie przepływem energii w pojeździe elektrycznym wyposażonym w pokładową baterię trakcyjną

Witold Kobos, Piotr Chudzik

## 1. Wstęp

Niedoskonałość i bardzo wysoka cena dostępnych zasobników energii przez wiele lat hamowały powszechne stosowanie napędów elektrycznych w pojazdach pozbawionych połączenia z siecią trakcyjną. Dopiero w ostatnich latach, dzięki rozwojowi technologii budowy ogniw elektrochemicznych opartych na litie (Li), rozpoczęto masową produkcję zasobników mogących sprostać wymaganiom napędu pojazdu biorącego udział w ruchu ulicznym. Zasilanie z nowoczesnych baterii trakcyjnych praktycznie nie wprowadza ograniczeń ani podczas rozpędzania, ani podczas hamowania ze zwrotem energii. Choć ogniwa te umożliwiają dynamiczną jazdę, to nadal pozostawiają wiele do życzenia pod względem pojemności i trwałości, mierzonej ilością cykli pracy. Bardzo ważną rolę podczas doboru rozmiaru baterii dla konkretnego pojazdu pełni również stosunkowo wysoka cena zakupu ogniw oraz znaczna masa baterii. Dlatego bardzo ważnym elementem procesu projektowego jest etap oceny potrzeb energetycznych pojazdu oraz dostosowanie do rzeczywistych potrzeb całej infrastruktury towarzyszącej pojazdowi elektrycznemu, czyli systemu ładowania i doładowywania (ładowania szybkiego).

## 2. Zapotrzebowanie energetyczne pojazdu elektrycznego

W pojazdach, w których bateria ogniw jest jedynym magazynem energii poza samym napędem, musi ona zapewnić zasilanie układów pomocniczych, takich jak wspomaganie, nagrzewanie czy klimatyzacja. Z tego powodu istnieje spore zróżnicowanie zapotrzebowania na energię w skali doby czy roku. Ilość zużytej energii zależy również od stylu jazdy i od sytuacji na drodze [1]. Przyjęcie najgorszego przypadku prowadzi do przewymiarowania zasobnika, a z kolei niedoszacowanie prowadzi do zatrzymania pojazdu przed osiągnięciem celu. W przypadku pojazdów komunikacji miejskiej sens ma tylko pierwsze podejście do doboru pojemności zasobnika energii. Dlatego w badaniach symulacyjnych założono wystąpienie wszystkich najbardziej niekorzystnych zjawisk, mających wpływ na zużycie energii. Analiza dotyczy tramwaju, gdyż tylko dla tramwaju dysponowaliśmy wiarygodnymi i potwierdzonymi danymi eksploatacyjnymi, takimi jak: prędkość komunikacyjna, odcinki międzyprzystankowe, prędkość jazdy przy zachowaniu – podobnych do autobusów elektrycznych – parametrów napędu: moc, napięcia i prąd. Wyniki tej analizy odnoszą się

**Streszczenie:** W artykule została omówiona tematyka związana z magazynowaniem, ładowaniem i uzupełnianiem energii w elektrycznych pojazdach komunikacji miejskiej, w których głównym źródłem energii dla potrzeb jezdnych jest bateria trakcyjna. W ramach artykułu zostały zamieszczone przykładowe przebiegi wielkości elektrycznych i mechanicznych reprezentatywne dla pojazdu w ruchu miejskim. W artykule omówiono sposoby ładowania i doładowywania baterii, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczeń technicznych spotykanych w rzeczywistych rozwiązaniach. Jako przykłady poszczególnych urządzeń biorących udział w dystrybucji energii zostały przedstawione rzeczywiste urządzenia zrealizowane w autobusie elektrycznym oddanym do eksploatacji w Lublinie.

Słowa kluczowe: pojazdy elektryczne, ładowanie baterii trakcyjnych

## MANAGING THE FLOW OF ENERGY IN THE ELECTRIC VEHICLE EQUIPPED WITH ON-BOARD TRACTION BATTERY

**Abstract:** The article deals with supplying energy to the electric bus with electrochemical cells. Particular examples of two types of chargers: fast and slow are presented along with their most important operating parameters. It also presents a simplified schematic diagrams that allow you to get to know their principle of operation and pay attention to how the most significant structural problems can be resolved. In addition, article contains description of a photovoltaic system, which provides the circuits of an electric vehicle with energy made from the sunlight. It also includes sample waveforms of energy produced daily from the cells placed on the bus body along with the analysis of the impact that the cells presence has on the energy balance of the whole vehicle.

Keywords: DC diagnostic tests

jednak zarówno do tramwajów, jak i autobusów elektrycznych. Wyniki obliczeń zużycia energii dla tramwaju, który ma przebyć w ruchu miejskim drogę 3 kilometrów, pozwoliły oszacować rozmiar baterii ogniw, jaki powinien zostać użyty do realizacji założonego przejazdu. W badaniach uwzględniono opory

reklama

ruchu, profil trasy, czasy postoju między przystankami oraz bardzo dynamiczny sposób jazdy, polegający na maksymalnym rozpędzeniu pojazdu, jeździe z maksymalną prędkością (40 km/h) i hamowaniu maksymalną siłą, tak aby osiągnąć cel (następny przystanek) w możliwie najkrótszym czasie. Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi przebytej drogi i prędkości pojazdu.

Całkowite zużycie energii z baterii wyniosło 51 kWh. Na potrzeby samego napędu wykorzystano zaledwie 20 kWh.

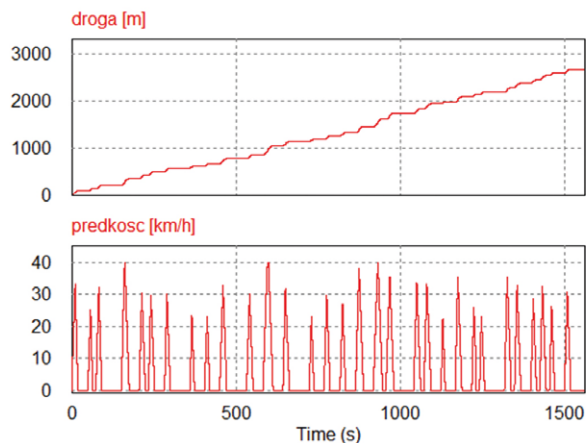
Uwzględnienie w badaniach poboru mocy przez inne niż napęd urządzenia (latem klimatyzacja, zimą ogrzewanie) pokazały, że rozmiar baterii pojazdu w znacznej mierze zależy właśnie od tych dodatkowych urządzeń. Na rys. 3 pokazano wyniki badań symulacyjnych tego samego przejazdu, pokazujące charakter poboru prądu z baterii przez napęd i urządzenia pomocnicze. Z punktu widzenia mocy napęd stawia o wiele wyższe wymagania niż pozostałe odbiorniki razem wzięte. Dynamika zmian mocy napędu jest bowiem aż dziesięć razy większa.

Rozmiary baterii, które spełniają zapotrzebowanie energetyczne pojazdu, są znaczne, zarówno pod względem zajmowanej przestrzeni, jak i masy. Pewnym rozwiązaniem problemu „wożenia” ciężkiego magazynu baterii jest przyjęcie założenia, że pojazd na swej drodze będzie miał możliwość „doładowania”. Rozmiary zasobnika można więc ograniczyć do wartości wystarczających na pokonanie najdłuższego etapu. Współczesne baterie, na szczęście, nawet przy ograniczonych pojemnościach pozwalają pod względem mocy dostępnej w baterii ogniw pokryć zapotrzebowanie układu napędowego. W autobusach elektrycznych do zaopatrywania w energię innych niż napęd odbiorników często stosuje się dodatkowe generatory z silnikiem spalinowym. Pozwalają one, oczywiście za cenę emisji spalin i hałasu, znacznie ograniczyć rozmiary baterii pojazdowej [5].

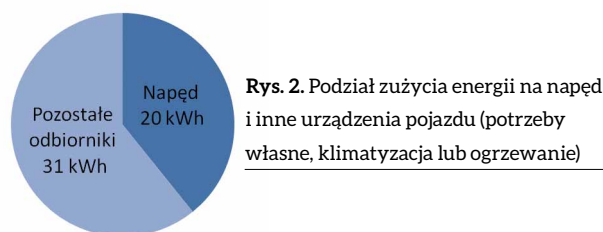
### 3. Ładowanie baterii pojazdu elektrycznego

Specyficzne i dość kłopotliwe dla układów regulacji właściwości ogniw wykorzystywanych do budowy baterii pojazdowych praktycznie nie wpływają na zachowanie pojazdu podczas jazdy. Ograniczenia związane z technologią ogniw dają o sobie znać dopiero podczas procesu ładowania. Najważniejszym z nich jest stosunkowo mała szybkość dostarczania energii do baterii. Ograniczenie wiąże się z wydzielaniem ciepła na skutek przepływu prądu przez elementy ogniwa. Moce ładowania są więc zbliżone do maksymalnych mocy rozładowania ogniw. Przyjęcie szybkości ładowania na poziomie nawet kilkukrotnie przekraczającym moc maksymalną napędu pozwala na osiągnięcie zaledwie kilkuset kilowatów. Dla autobusu elektrycznego o długości 12 m, o mocy znamionowej napędu 200–250 kW, dopuszcza się maksymalną moc ładowania o wartości około 300 kW [2]. Jest to wielkość zdecydowanie niższa niż w przypadku dostarczania energii w postaci paliwa płynnego. Typowy dystrybutor paliwa o wydajności 40 l paliwa na 1 minutę osiąga przeliczeniową moc rzędu 25 MW (dla wartości opałowej oleju napędowego równej 36 MJ/dm<sup>3</sup>).

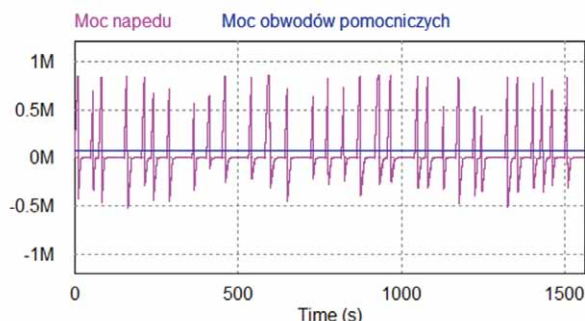
Naturalną konsekwencją tak znacznego ograniczenia mocy dostarczanej do baterii jest bardzo długi czas ładowania pojazdu. Dodatkowym utrudnieniem, wynikającym ze stosowania



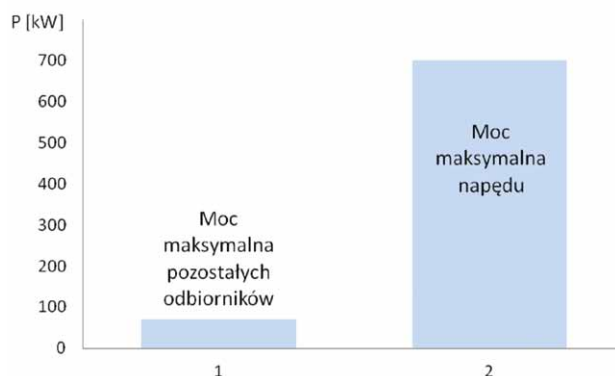
Rys. 1. Przebiegi drogi i prędkości pojazdu uzyskane w badaniach symulacyjnych



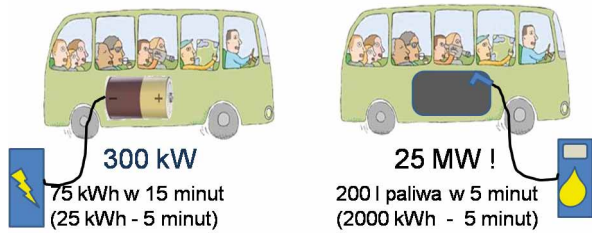
Rys. 2. Podział zużycia energii na napęd i inne urządzenia pojazdu (potrzeby własne, klimatyzacja lub ogrzewanie)



Rys. 3. Przebiegi pokazujące moc napędu na tle mocy pobieranej przez inne niż napęd urządzenia pojazdu



Rys. 4. Porównanie mocy maksymalnej napędu na tle mocy maksymalnej pozostałych odbiorników czerpiących energię z baterii pojazdu

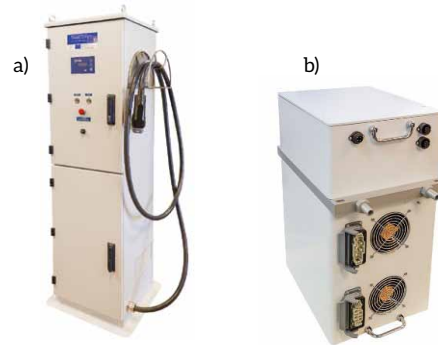


Rys. 5. Porównanie sposobów dostarczania energii do pojazdu pod względem mocy

baterii złożonych z bardzo dużej liczby szeregowo połączonych ogniw elektrochemicznych o niewielkich napięciach, jest konieczność zapewnienia bezpośredniej kontroli naładowania każdego z nich oraz spełnienie bardzo rygorystycznych wymagań podczas ładowania ogniw o wysokim stopniu rozładowania lub naładowania. W praktyce problemy te rozwiązuje się, stosując mieszany sposób prowadzenia procesu ładowania, który zakłada dwa rodzaje dostarczania energii: szybki i wolny. W przypadku autobusu elektrycznego potrzeby energetyczne procesów szybkiego i wolnego ładowania można określić na poziomie 20–60 kW dla ładowarek wolnych i 100–400 kW (a nawet 600 kW) dla ładowarek szybkich. Ze względu na dużą rolę, jaką pełni konieczność bilansowania energii w pojeździe zasilanym z baterii, poszukuje się rozwiązań, które choć w niewielkim stopniu mogłyby wspomagać zasobnik energii poprzez pozyskiwanie energii z innych źródeł. Praktycznie jedyną dostępną i spełniającą wymagania o charakterze środowiskowym, formą takiego dostarczania energii jest stosowanie ogniw słonecznych umieszczonych na konstrukcji pojazdu. Stosunkowo niewielkie moce, sięgające zaledwie pojedynczych kilowatów (przy dobrym nasłonecznieniu), w całkowitym bilansie energetycznym pojazdu pozwalają uzyskać poprawę zasięgu pojazdu w ciągu dnia o około 6–8 km.

#### 4. Ładowarka wolna

Ładowarki „wolne”, o mocach nieprzekraczających 60 kW, znajdują zastosowanie głównie na zajezdniach, gdzie mogą przez wiele godzin dostarczać energię do pojazdu, który nie bierze udziału w ruchu miejskim. Potrzeba ładowania wolnego wynika głównie z konieczności balansowania ogniw, podlegających procesowi ładowania. O wartości prądu dostarczanego do baterii decyduje specjalny układ nadzorujący (BMS – *Battery Management System*), który przekazuje systemowi sterowania ładowarki zadaną wartość prądu. Ładowarka jest odpowiedzialna za regulację tego prądu na zadanym poziomie [3]. Ważną zaletą ładowarek o niewielkich wymaganiach mocy jest możliwość ich zasilania z sieci energetycznej niskiego napięcia. Na rys. 1 a przedstawiono uproszczony schemat ideowy obwodu mocy ładowarki o mocy 40 kW. Urządzenie zbudowane jest z aktywnego prostownika wejściowego i przetwornicy DC/DC. Prostownik aktywny zapewnia kompensację mocy biernej i pozwala na zachowanie sinusoidalnego kształtu prądu pobieranego z sieci. Tego typu rozwiązania mają szczególne znaczenie w przypadkach jednoczesnego stosowania wielu



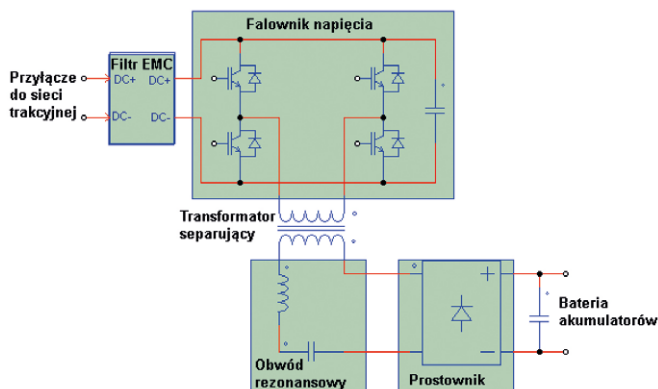
Rys. 6. a) Fotografia ładowarki stacjonarnej o mocy 40 kW; b) fotografia ładowarki pojazdowej o mocy 40 kW

ładowarek w obrębie wspólnego systemu energetycznego, np. zajezdni. Na rys. 6 a. zamieszczono fotografię stacjonarnej ładowarki o mocy 40 kW. Ładowarki o niewielkich mocach są również chętnie montowane w pojazdach. Dzięki ich obecności możliwe jest prowadzenie procesu ładowania w oparciu o ogólnie dostępną sieć energetyczną, bez konieczności zapewnienia specjalnej infrastruktury w miejscu postoju i ładowania [4]. Na rys. 6 b przedstawiono rozwiązanie ładowarki pojazdowej o mocy 40 kW, która podłączana jest do sieci energetycznej za pomocą typowego gniazda trójfazowego o prądzie maksymalnym 63 A.

W tego typu rozwiązaniach również celowe jest stosowanie prostowników aktywnych ze względu na możliwość ograniczenia rozmiarów i wagi urządzenia dzięki znacznej redukcji sieciowych filtrów wejściowych.

#### 5. Ładowarki szybkie

Ładowarki szybkie to urządzenia o mocach zwykle przekraczających możliwości typowych przyłączy energetycznych NN. Uzyskanie mocy na poziomie kilkuset kilowatów wymaga dostępu do przyłączy średniego napięcia (SN). Z tego względu bardzo chętnie przedsiębiorstwa komunikacyjne korzystają do zasilania ładowarek szybkich z istniejących zwykle w dużych miastach sieci trakcyjnych tramwajowych i trolejbusowych, które poprzez prostownikowe podstacje trakcyjne zasilane są z sieci SN. Sieci te w naturalny sposób pozwalają na krótkotrwałe (sięgające od kilkunastu do kilkudziesięciu minut) pobory mocy o wartościach setek kilowatów. Rozwiązanie takie jest korzystne z ekonomicznego punktu widzenia, ponieważ pozwala przedsiębiorstwom komunikacyjnym na uniknięcie ponoszenia znacznych kosztów na inwestycje związane z budową nowych podstacji czy korzystania z sieci średniego napięcia. Niestety jako potencjalne źródło energii dla układu ładowania baterii ogniw sieć trakcyjna posiada poważne wady. Największą z nich jest bardzo duży zakres zmian wartości napięcia. Dla sieci trakcyjnej o znamionowym napięciu 600 V DC, w typowych przypadkach polskich miast najniższą wartością, jaka może wystąpić jest 400 V, a najwyższą 850 V. Zapewnienie precyzyjnej regulacji prądu dostarczanego do baterii w takich okolicznościach jest zadaniem o wiele bardziej złożonym w porównaniu z ładowarkami zasilanymi z sieci energetycznej, charakteryzującej się dużą stałością napięcia. Energoelektroniczne układy przetwarzania muszą bowiem umożliwiać szeroki zakres regulacji, co jest związane z koniecznością



Rys. 7. Uproszczony schemat ideowy obwodu mocy ładowarki o mocy 120 kW

przewymiarowania elementów biernych i samych tranzystorów. Poważnym problemem, jaki pojawia się w tego typu układach, jest również konieczność minimalizacji strat mocy powstających w tranzystorach oraz ograniczanie emitowanego przez ładowarkę hałasu emitowanego przez obwody magnetyczne. Oba te wymagania z technicznego punktu widzenia są trudne do jednoczesnego spełnienia, ponieważ zwiększanie częstotliwości przełączania tranzystorów ponad częstotliwość akustyczną powoduje wzrost powstających w nich strat energii. Jedną z powszechnie stosowanych metod uniknięcia wzrostu strat mocy wraz ze wzrostem częstotliwości jest stosowanie przetwornic rezonansowych, w których przełączanie tranzystorów odbywa się bezprądowo lub beznapięciowo.

Kolejnym sposobem podniesienia sprawności układów energoelektronicznych jest ograniczanie ilości stopni przetwarzania energii. Na rys. 7 zamieszczono uproszczony schemat blokowy układu ładowarki szybkiej o prądzie wyjściowym 200 A, w której tor przetwarzania i regulacji realizowany jest przez jedno-stopniową przetwornicę rezonansową. Na rys. 6 zamieszczono fotografię ładowarki rezonansowej o mocy 240 kW zasilanej z trolejbusowej sieci trakcyjnej.

## 6. Przyłącza ładowarek szybkich

Ogromne wartości prądów, jakie występują w ładowarkach szybkich, oraz konieczność zapewnienia łatwego dołączenia ich do baterii na czas ładowania wymagają specjalnych rozwiązań technicznych. Typowe połączenie kablowe z wyjmowaną ręcznie wtyczką pozwala na przepływ prądu o maksymalnej wartości 200 A. W przypadku napięcia baterii na poziomie 500 V możliwe jest więc dostarczanie energii z mocą nieprzekraczającą 100 kW.

Dla autobusów elektrycznych jest to wartość zdecydowanie za niska. Doładowywanie energii podczas postoju na przystanku powinno trwać możliwie jak najkrócej, a to oznacza, że powinno odbywać się z mocą przynajmniej zbliżoną do mocy napędu (w przypadku pojazdów przeznaczonych do pokonywania dużych dystansów bez doładowywania, gdzie rozmiary baterii są znaczne, moce maksymalne ładowania baterii są odpowiednio wyższe w stosunku do mocy napędu, ale ograniczeniem może się stać sama instalacja elektryczna,



Rys. 8. Fotografia ładowarki szybkiej o mocy 240 kW z wtyczką o prądzie maksymalnym 200 A

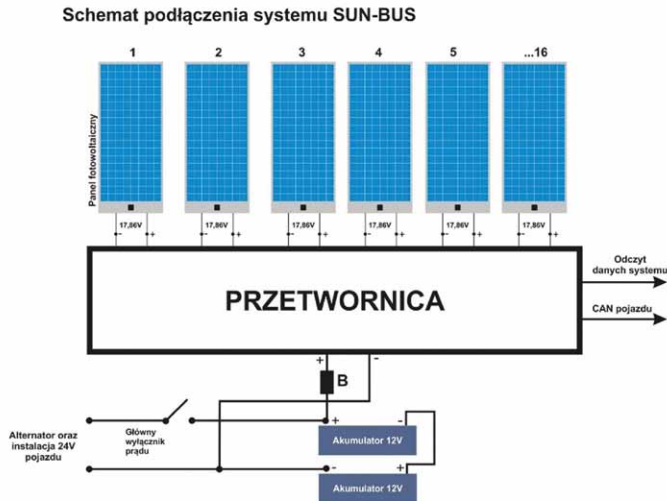


Rys. 9. Fotografia stanowiska ładowania z pantografu o prądzie maksymalnym 1000 A

której parametry są zwykle dostosowane do mocy napędu). Dla autobusu o mocy 240 kW dopuszczalny przez BMS prąd maksymalny ładowania przekracza 500 A. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem technicznym, pozwalającym na łatwe doprowadzenie do pojazdu prądu o tak dużej wartości, jest specjalny pantograf. Jego konstrukcja pozwala na bezpieczne i łatwe dla kierowcy podłączenie pojazdu do źródła zasilania bez konieczności opuszczania pojazdu. Ostatnim ze spotykanych sposobów dostarczania energii do pojazdu jest bezprzewodowe ładowanie indukcyjne. Znany przykładem tego typu ładowarki jest PRIMOVE firmy Bombardier. Jest to system indukcyjnego przekazywania energii o mocy 200 kW, który stosowany jest z powodzeniem od kilku lat do ładowania autobusów elektrycznych Solaris Urbino w niemieckim mieście Brunshwiku.

## 7. Panel fotowoltaiczny

Panele fotowoltaiczne w pojazdach elektrycznych zawsze cieszyły się sporym zainteresowaniem, ponieważ są praktycznie jedynym łatwym sposobem na pozyskiwanie energii odnawialnej przez poruszający się pojazd. Ilość energii możliwa do „zdobycia” z paneli zamontowanych na karoserii pozwala nawet lekkim pojazdom na autonomiczne poruszanie się przy sprzyjających warunkach nasłonecznienia. W przypadku autobusów elektrycznych ilość energii możliwej do uzyskania z powierzchni dachu i ścian bocznych jest zdecydowanie zbyt mała, w porównaniu z potrzebami napędu.



Rys. 10. Schemat blokowy pojazdowego systemu fotowoltaicznego

Na rys. 11 zamieszczono przebiegi przykładowych wartości mocy uzyskanych z 10 m<sup>2</sup> powierzchni paneli fotowoltaicznych, rozmieszczonych na karoserii autobusu o długości 12 m, poruszającego się przez dwie godziny dnia 9 lutego 2016 r. po ulicach Lublina, uzyskanych z systemu o następujących danych technicznych:

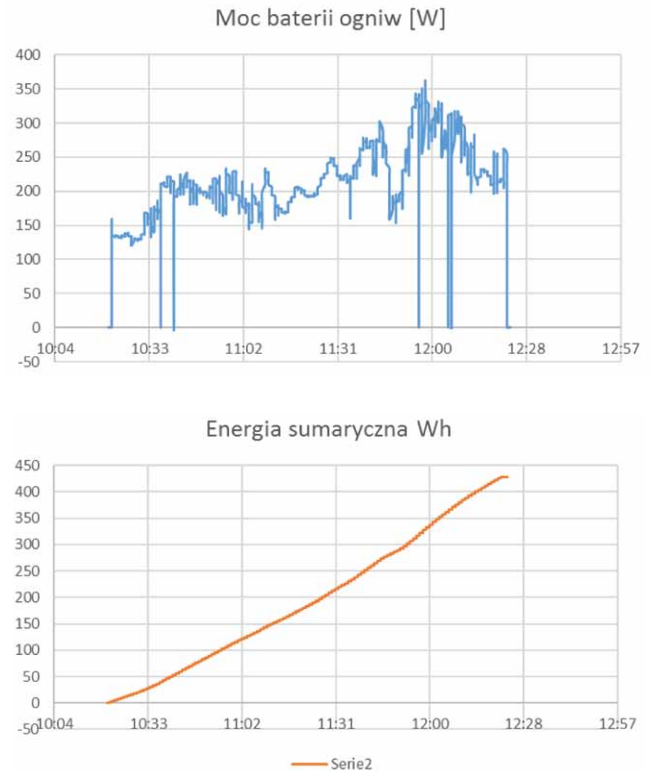
- napięcie wyjściowe systemu PV: 24 V DC;
- napięcie z panelu PV: 3 V do 23 V DC ;
- max. prąd panelu PV: 10 A;
- moc maksymalna: 150 Wp;
- sprawność: >97%;
- nominalne napięcie wyjściowe: 24 V DC;
- max. prąd wyjściowy: 144 A.

Jak widać na załączonych wykresach, całkowita energia uzyskana z systemu osiągnęła wartość niemal 0,5 kWh (dla 2 godzin ruchu). Przy dobrym nasłonecznieniu na tym samym autobusie uzyskuje się ok. 1 kWh energii na godzinę. Dla układu napędowego (bez uwzględnienia innych odbiorników) oznacza to na każdą godzinę dodatkowe 120 m zasięgu przy słabym nasłonecznieniu lub 500 m przy dobrym nasłonecznieniu.

Stosowanie paneli fotowoltaicznych w autobusach elektrycznych nie przynosi aż tak dużych korzyści, jak w autobusach z napędem spalinowym, gdzie energia uzyskana z paneli pozwala na całkowite pokrycie potrzeb własnych pojazdu podczas postoju, dzięki czemu silnik spalinowy nie musi pracować tylko dla napędzania alternatora.

## Podsumowanie

Doprowadzanie energii do autonomicznego pojazdu elektrycznego wymaga uwzględnienia wielu ważnych czynników. Najważniejszymi z nich są: parametry zasobników, sposoby przekazywania energii (stykowy – bezstykowy), istniejący system energetyczny (sieć niskiego napięcia – sieć średniego napięcia – sieć trakcyjna) czy odnawialne źródła energii (elektrownie wodne, wiatrowe, fotowoltaika). Specyficzną właściwością ładowarek bywa ogromne zapotrzebowanie na moc chwilową, która pozwala na szybkie przekazywanie energii do zasobnika bez wywoływania długiej przerwy w ruchu pojazdu.



Rys. 11. Przebiegi mocy i sumarycznej energii systemu fotowoltaicznego

Dlatego, zdaniem autorów, należy poszukiwać rozwiązań stacji ładowania, które byłyby zasilane z różnych źródeł energii, nawet o znacznych ograniczeniach mocy, lecz dysponujących dużą chwilową mocą wyjściową dzięki własnemu, buforowemu zasobnikowi energii.

## Literatura

- [1] ŁEBKOWSKI A.: *Badania eksploatacyjne elektrycznego układu napędowego z falownikiem MOSFET samochodu Fiat Panda 2*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(109)/2016.
- [2] ROGGE M., WOLLNY S., SAUER D.U.: *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport. A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*. „Energies” 8/2015.
- [3] NEVES A., SOUSA D.M., ROQUE A., TERRAS J.M.: *Analysis of an inductive charging system for a commercial electric vehicle*. Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011–14th European Conference on.
- [4] GUZIŃSKI A., ADAMOWICZ M., KAMIŃSKI J.: *Pojazdy elektryczne – rozwój technologii. Układy ładowania i współpraca z siecią elektroenergetyczną*. „Automatyka – Elektryka – Zakłócenia” 2012.
- [5] KRÓL E., SKĘCZEK W.: *Autobus miejski z napędem spalinowo-elektrycznym – wyniki badań drogowych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(105)/2015.

Witold Kobos – ENIKA Łódź

Piotr Chudzik – Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki

artykuł recenzowany