

Paweł Irzmański, Maciej Kwiatkowski, Bartłomiej Kras  
ICPT S.A., Warszawa

## INNOWACYJNY SYSTEM BATERYJNY DLA TROLEJBUSU O PODWYŻSZONYCH MOŻLIWOŚCIACH JAZDY CIĄGŁEJ Z UŻYCIEM DODATKOWEGO MAGAZYNU ENERGII

### INNOVATIVE BATTERY SYSTEM FOR TROLLEYBUS ABOUT THE EXTRAORDINARY DRIVING POSSIBILITIES USING AN ADDITIONAL MAGAZINE OF ENERGY

**Streszczenie:** Autorzy przedstawiają projekt, którego celem jest opracowanie, wykonanie i wdrożenie całkowicie innowacyjnego trolejbusu z dodatkowym zasilaniem bateryjnym o podwyższonych możliwościach jazdy ciągłej z użyciem magazynu energii. Projektowane trolejbusy będą wyposażone w układ telemetrii umożliwiający operatorowi nadzór oraz optymalizację zużycia energii całej floty poprzez możliwość przechodzenia poszczególnych pojazdów na zasilanie z baterii na wybranych fragmentach trasy oraz w okresach wzmożonego zużycia energii np. w szczytach komunikacyjnych.

**Abstract:** The aim of the project is to develop, construct and implement a fully innovative trolleybus with additional battery supply, of enhanced continuous driving capacity using energy storage. It will be equipped with the telemetry system enabling the operator to supervise and optimize energy consumption of the whole fleet through possible switching of individual vehicles to battery supply at selected fragments of the route and in periods of increased energy consumption, e.g. during rush hours.

**Słowa kluczowe:** magazyn energii, trolejbus, LTO, EMS, HEV, EV, skalowalność, CAN

**Keywords:** energy storage, trolleybus, LTO, EMS, HEV, EV, scalable, CAN

#### 1. Wstęp

Obecne akumulatory trolejbusowe nie są przystosowane do rutynowych przejazdów podczas służby liniowej. Współcześnie stosowane akumulatory trakcyjne mają małą pojemność i mogą być używane tylko w przypadku bardzo krótkiego dystansu lub podczas manewrów w zajezdni. Nowy akumulator wymaga opracowania nowych struktur, dedykowanych zarówno dla zabudowy mechanicznej konstrukcji akumulatora, jak również dla większości jej układów funkcjonalnych. W związku z tym, konieczne jest przeprojektowanie zasobnika w celu spełnienia wymagań mechanicznych oraz ważniejszych, specjalnych wymagań dla standardów trolejbusowych, które różnią się od standardów dla elektrycznych autobusów. Konieczne jest wyposażenie modułu w nowe funkcje, np. klimatyczny komfort akumulatora trakcyjnego i zarządzanie energią dla współpracy z siecią trolejbusową.

Dodatkowo, jednym z celów projektu jest zadanie zbudowania takiego algorytmu sterowania pracą trolejbusu wyposażonego w zasobnik energii, żeby mógł on wspomagać sieć trakcyjną w czasie jazdy, a jednocześnie zapew-

niona będzie możliwość przejazdu odcinka bez sieci – zwany dalej algorytmem dołączania pojazdu do trakcji. Przy czym zapewnienie przejazdu odcinka bez sieci przy zasilaniu z baterii ma wyższy priorytet niż wspomaganie sieci trakcyjnej. Tradycyjne trolejbusy pobierają całą potrzebną energię z sieci trakcyjnej. W wypadku dużych długości sekcji i małych przekrojów przewodów, zwłaszcza jezdnych, wiąże się to z poważnymi spadkami napięcia, które uniemożliwiają prawidłową pracę pojazdu, a w skrajnych wypadkach mogą powodować odłączenie trolejbusu od sieci.

#### 2. Założenia systemu

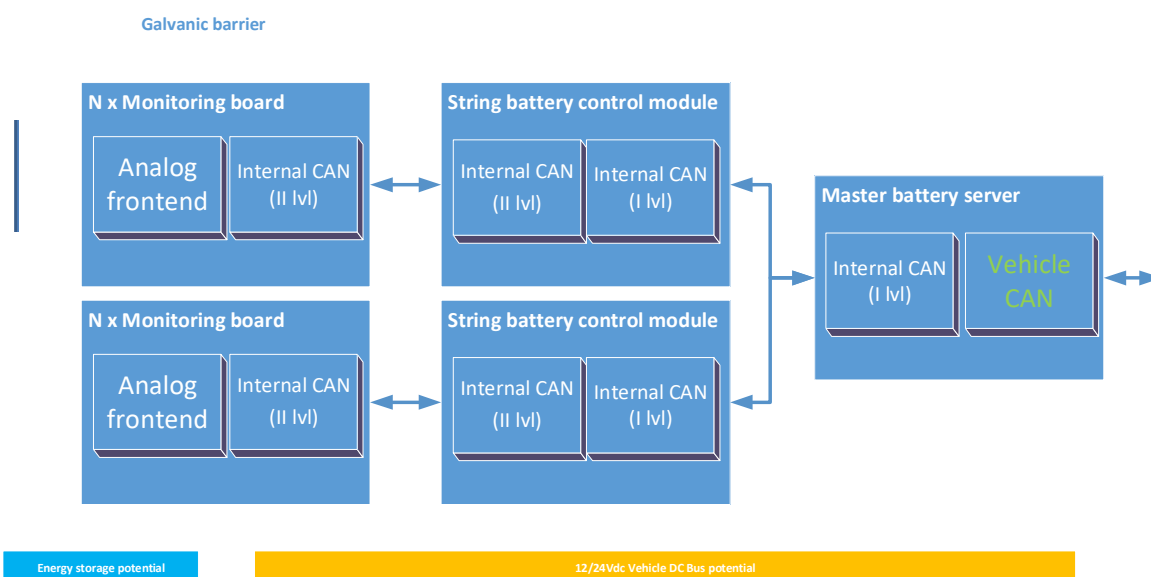
Projektowane trolejbusy będą wyposażone w układ telemetrii umożliwiający operatorowi nadzór oraz optymalizację zużycia energii całej floty poprzez możliwość przechodzenia poszczególnych pojazdów na zasilanie z baterii na wybranych fragmentach trasy oraz w okresach wzmożonego zużycia energii np. w szczytach komunikacyjnych. Zastosowanie niewielkiej, ale bardzo nowoczesnej baterii litowo-tytanowej (LTO) [1] z chłodzeniem cieczą, umożliwi

ciągłą pracę trolejbusu zasilanego z baterii i dojazd do osiedli i miejsc, gdzie nie przewidziano budowy sieci trolejbusowej lub taka inwestycja jest bardzo kosztowna. Dodatkowo w centrach miast możliwe będzie zwiększenie elastyczności w tworzeniu układu linii, na której poruszał się będzie pojazd poprzez uzupełnienie trasy o odcinki pozbawione trakcji. Umożliwi to łatwiejsze adaptowanie tras trolejbusowych w miastach do zmieniających się warunków i powiększenie flot ekologicznych pojazdów jakimi są trolejbusy. Kosztowny rozwój nowej trakcji był do tej pory jednym z największych ograniczeń dla miast w rozwoju ekologicznej sieci trolejbusowej. Połączone i zastosowane w jednym pojeździe rozwiązania opracowane w projekcie stanowią będą innowacją na skalę światową. Wnioskodawcy zamierzają osiągnąć zamierzone w projekcie cele poprzez opracowanie szeregu nowych rozwiązań. W projekcie zakłada się uzyskanie zwiększenia gęstości mocy baterii, stworzenie sterowanego predykcji systemu komfortu klimatycznego oraz umożliwienie zarządzania wykorzystaniem baterii na poziomie floty, a nie pojazdu w celu niwelacji skoków mocy. Opracowany w ramach projektu pojazd będzie umożliwiał jazdę na zasilaniu bateryjnym bez ograniczania parametrów użytkowych. Istotną cechą tego rozwiązania będzie modułowość, a co za tym idzie skalowalność, które zaoferują możliwość konfiguracji systemu bateryjnego.

### 3. Struktura zasobnika

Ustalono, że struktura systemu [3] będzie zbliżona do systemów składowych o mocy maksymalnej przekraczającej 28 kWh opracowanych w ramach wcześniejszych projektów. Postanowiono, że system bateryjny (dalej BP) do zabudowy w trolejbusie dwunastometrowym musi składać się z dwóch takich modułów bateryjnych, z kolei trolejbus o długości 18 metrów – z trzech. BP będą połączone równolegle. Ogniwa w pojedynczym BP będą w konfiguracji 276S2P. W strukturze przewidziano także systemy zarządzające bateriami oraz układ dostarczający zaawansowane funkcje nadzoru nad flotą tego typu pojazdów w odniesieniu do sieci trakcyjnej.

Topologia systemu nadzorczo-pomiarowego przedstawiona została na rysunku (Rys. 1), przedstawiono najważniejsze jej elementy opierając się o najniższą warstwę komunikacyjną (internal - 2nd lvl) wykorzystującą sieć opartą na protokole CAN 2.0B [2]. Na niej to odbywa się wymiana podstawowych informacji związanych ze stanem ogniów w co najmniej kilkunastu sesjach na sekundę. Łączy ona moduły ogniów w jednolity system podrzędny symulujący jednostkowy zasobnik stanowiący składową dla całego systemu magazynu energii dla pojazdu. Średnią warstwę komunikacyjną (internal - 1st lvl) pozwalającą na logiczne zarządzanie przepływem energii pomiędzy zasobnikami. Odpowiada ona za zebranie danych z najniższej war-



Rys. 1 Struktura komunikacyjna systemu - założenia

stwy, przetworzenie ich do postaci umożliwiającej zarządzanie parametrami wyższego rzędu takimi jak SOC (State of Charge), SOH (State of Health). Najwyższa warstwa komunikacyjna (Vehicle CAN) służy do wymiany danych z komputerem pojazdu oraz zgodnie z założeniami projektu będzie współtworzyć wraz z EMS (Energy Management System) innowacyjnym rozwiązaniem pozwalającym na automatyczne dołączanie pojazdu (trolejbusu) do trakcji [4].

## 4. Wybrane funkcje systemowe

### 4.1. Algorytm dołączania pojazdu do trakcji

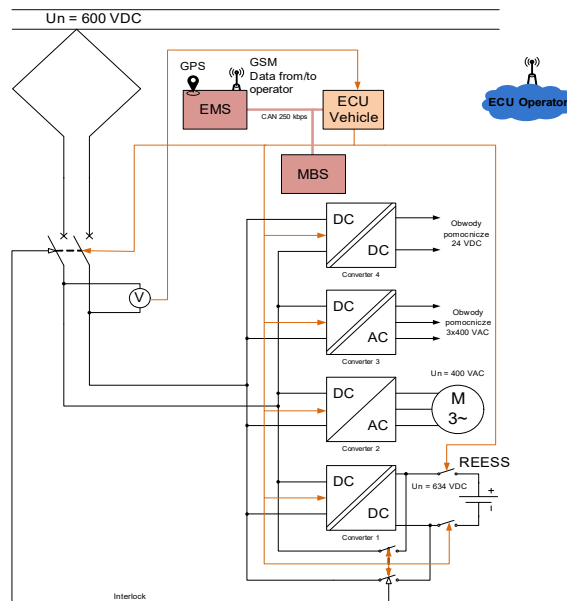
Innowacyjne rozwiązanie pozwalające na automatyczne dołączanie pojazdu (trolejbusu) do trakcji jest jednym z podstawowych elementów projektu, a zarazem najistotniejszym z nich. Układ kontrolno – sterowniczy EMS (Energy Management System) realizuje przełączenia pomiędzy poszczególnymi trybami pracy. Zakładano, że musi zapewniać odpowiednią kontrolę nad przepływem energii pomiędzy trakcją, układem napędowym, obwodami pomocniczymi oraz magazynem energii elektrycznej (Rys. 2).

Przewidziano szereg trybów pracy systemu, oto niektóre z nich:

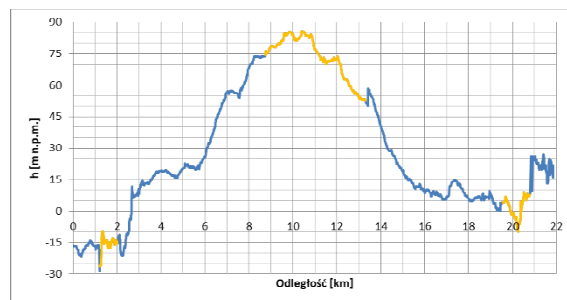
- praca na trakcję - pobór energii tylko z sieci z jednoczesnym ładowaniem zasobnika;
- praca na zasobniku - pobór energii tylko z baterii;
- praca na trakcję - oddawanie energii do sieci z zasobnika – rozważany teoretycznie dla projektu;
- praca na trakcję - oddawanie energii odzyskowej z hamowania.

Wybór danego trybu pracy będzie realizowany przez jednostkę EMS. Jego głównym zadaniem będzie wyznaczenie trybu pracy, w którym powinien znaleźć się pojazd. Ostatecznie o przejściu na dany tryb pracy będzie decydował komputer pojazdu, ponieważ posiada on kompleksowe informacje dotyczące pozostałych układów pracujących w aplikacji (trolejbus).

Na podstawie powyższego dokonano analizy sieci trakcyjnej pod kątem jej cech elektrycznych (długości odcinków sekcji, zależności prądu oddawanego z trakcji w funkcji odległości). Przeprowadzono analizy na przykładowej trasie (Rys. 3) oraz modelu pojazdu.



Rys. 2. Schemat poglądowy pojazdu

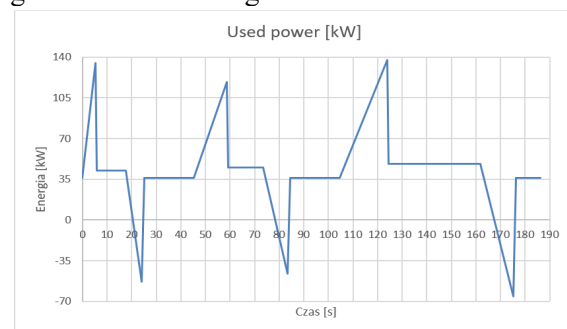


Rys. 3. Profil trasy odniesienia, na pomarańczowo zaznaczono odcinki bez sieci

Opracowany w ramach tego projektu algorytm zapoczątkował dalsze prace inżynierskie mające na celu wdrożenie rozwiązania w rzeczywistej aplikacji.

### 4.2. Symulacje układu chłodzenia

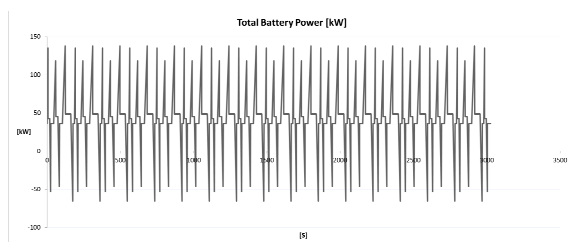
Do symulacji układu chłodzenia brano pod uwagę charakterystykę obciążenia dla trolejbusu 12-metrowego, przedstawioną na wykresie poniżej. Kierunek dodatni oznacza pobór energii z zasobnika energii.



Rys. 4. Typowy profil obciążenia trolejbusu T12 dla dystansu 0,92 km

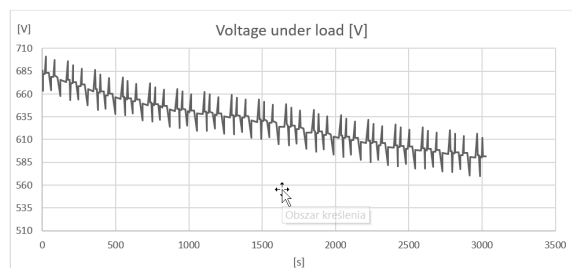
Założono do symulacji określony profil obciążenia otrzymano obejmujący dystans 0,92 km (Rysunek 4). Proporcjonalnie obliczono zużycie energii dla 15 km jazdy o tym profilu, a wynosi ono 45 kWh. W obliczeniach energii nie uwzględniano odzysku energii z hamowania regeneracyjnego. W trolejbusie T12 przewidziano montaż układu magazynowania z wykorzystaniem dwóch baterii.

Uzyskany przebieg mocy pobieranej z zasobnika bateryjnego przedstawia rysunek 5.

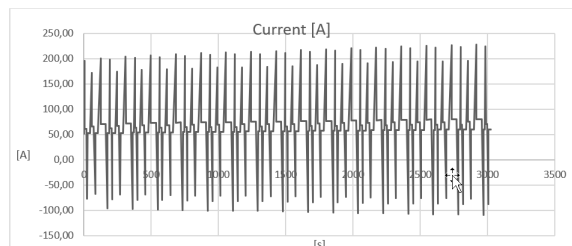


Rys. 5. Wykres mocy zasobnika energii na dystansie 15 km

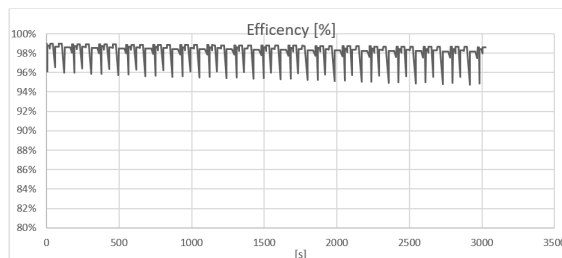
Następnie uwzględniając krzywą rozładowania dla ogniwa litowo-tytanowego wyznaczono przebiegi prądu, napięcia oraz strat w zasobniku energii. Otrzymane przebiegi przedstawiono na rysunkach poniżej.



Rys. 6. Wykres napięcia zasobnika energii na dystansie 15 km



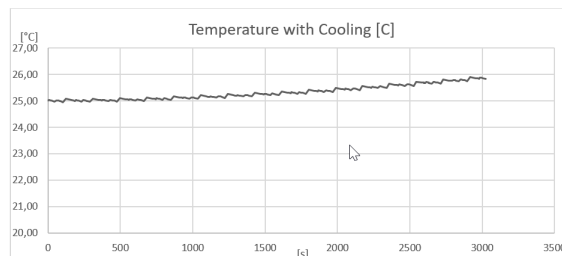
Rys. 7. Wykres natężenia prądu zasobnika energii na dystansie 15 km



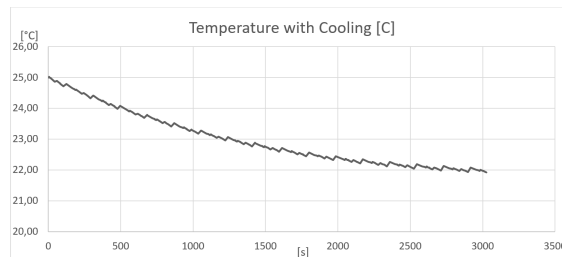
Rys. 8. Wykres strat zasobnika energii na dystansie 15 km

Otrzymany przebieg strat w funkcji przejechanego dystansu posłużył do przeprowadzenia symulacji odbioru energii cieplnej z zasobnika bateryjnego. Symulacje przeprowadzono dla czynnika chłodzącego G13 o temperaturze maksymalnej 15 °C, przy założonym przepływie 50 l/min. Przyjęto moc chłodniczą urządzenia układu klimatyzacji zasobnika bateryjnego 1500 W oraz 3000 W.

Symulacje prowadzono dla temperatury początkowej ogniwo wynoszącej 15 °C, 25 °C oraz 35 °C. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że moc chłodnicza 1500 W jest niewystarczająca dla powstrzymania wzrostu temperatury zasobnika bateryjnego. Wykresy poniżej (Rysunki 9 i 10) przedstawiają zmianę temperatury dla wybranej temperatury początkowej oraz mocy układu chłodniczego odpowiednio 1500 W oraz 3000 W.

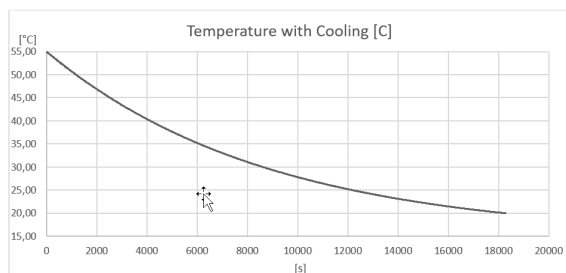


Rys. 9. Przebieg zmian temperatury w systemie dla mocy chłodzenia 1500 W i temperatury początkowej 25°C



Rys. 10. Przebieg zmian temperatury w systemie dla mocy chłodzenia 3000 W i temperatury początkowej 25°C

Dodatkowo przeprowadzono symulację zdolności układu chłodzenia do odebrania ciepła z zasobnika bateryjnego rozgrzanego do temperatury 55 °C. W przypadku montażu zasobnika energii na dachu pojazdu pod wpływem promieni słonecznych może dojść do rozgrzania zasobnika, a taka temperatura jest zbyt wysoka, aby wprowadzić pojazd do pracy.



Rys. 11. Spadek temperatury w nieobciążonym zasobniku energii dla mocy układu chłodzenia 3000 W

Przeprowadzone symulacje wskazują, że moc układu klimatyzacji wynosząca 3000 W będzie wystarczająca dla osiągnięcia wymaganego komfortu termicznego dla zasobnika bateryjnego.

## 5. Wnioski i podsumowanie

Projekt jest aktualnie w ostatniej fazie realizacyjnej. Większość wymienionych założeń została wprowadzona do systemu prototypowego i przetestowana w laboratorium. Otrzymała się również pierwsza część testów homologacyjnych (Regulamin 100.02). Potwierdzają one słuszność obranej koncepcji i dają nadzieję, że dalsza część prac testowych realizowana bezpośrednio w pojeździe przebiegnie pomyślnie.

## 6. Literatura

- [1]. Toshiba's SCiB™ Rechargeable Battery <https://www.scib.jp/en/>
- [2]. BOSCH, CAN Specification Version 2.0, 1991 ([www.can.bosch.com](http://www.can.bosch.com))

- [3]. Michał Michna, Dominik Adamczyk, Filip Kut, Mieczysław Ronkowski, Jakub Bernatt, Paweł Piśtelok, Emil Król, Łukasz Kucharski, Maciej Kwiatkowski, Łukasz Byrski, Mariusz Koziół., Koncepcja, modelowanie i symulacja układu napędowego prototypu samochodu elektrycznego „Elv001”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 92/2011*,
- [4]. DCCS-ECU jako innowacyjna jednostka kontrolna dla aplikacji EV i HEV, Bartłomiej Kras, Paweł Irzmański, Maciej Kwiatkowski, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2018*,
- [5]. ICPT SA., Development of universal electronic control unit for electric and hybrid vehicles, ICPT SA., <http://icpt.pl/innovations.aspx#tab1>

## Autorzy

Paweł Irzmański M.Sc., Impact Clean Power Technology S.A., Aleje Jerozolimskie 424 A, 00-116 Pruszków, E-mail: [bk@icpt.pl](mailto:bk@icpt.pl) / 40%;  
Maciej Kwiatkowski M.Sc., Impact Clean Power Technology S.A., Aleje Jerozolimskie 424 A, 00-116 Pruszków, E-mail: [bk@icpt.pl](mailto:bk@icpt.pl) / 40%.

Bartłomiej Kras PhD, Impact Clean Power Technology S.A., Aleje Jerozolimskie 424 A, 00-116 Pruszków, E-mail: [bk@icpt.pl](mailto:bk@icpt.pl) / 20%;

## Informacje dodatkowe

Projekt realizowany jest w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 - 2020 oraz programu sektorowego "INNOMOTO" w ramach Działania 1.2 "Sektorowe programy B+R", wdrażanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Projekt współfinansowany jest ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Zadanie 4 projektu zostało zrealizowane przy współpracy z Instytutem Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Nr projektu: POIR.01.02.00-00-0313/16-00