

## Symulacja układu chłodzenia baterii trolejbusu

# Innowacyjny system bateryjny dla trolejbusu o podwyższonych możliwościach jazdy ciągłej z użyciem dodatkowego magazynu energii

Paweł Irzmański, Maciej Kwiatkowski, Bartłomiej Kras

## 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 zapewniać 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. Układ napędowy trolejbusu. Założenia systemu

Projektowane trolejbusy będą wyposażone w układ telemetry 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

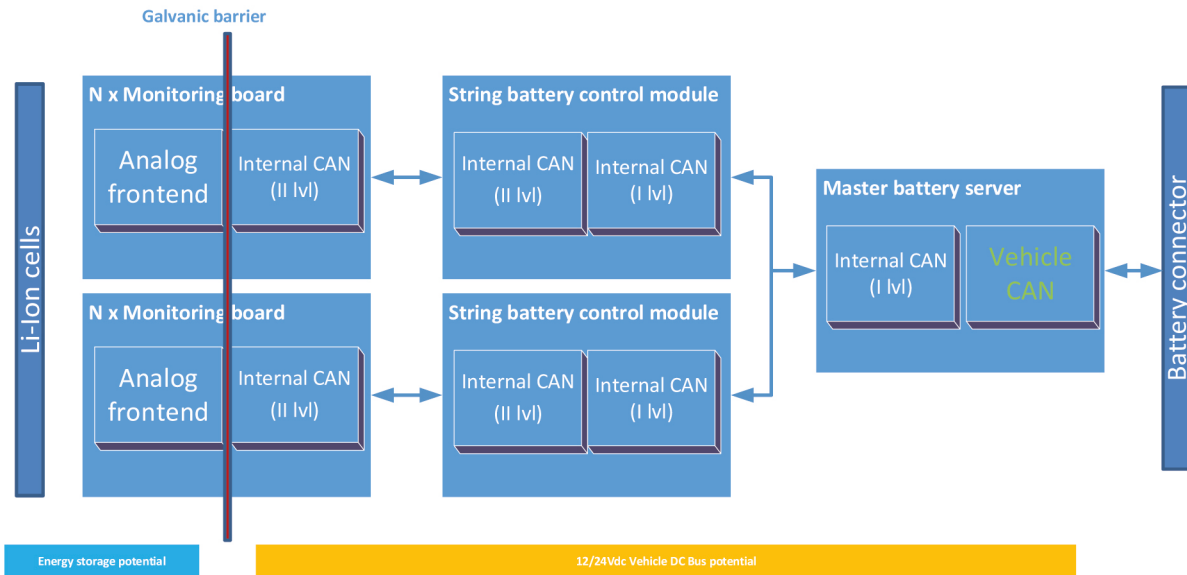
**Streszczenie:** Autorzy przedstawiają projekt, którego celem jest opracowanie, wykonanie i wdrożenie całkowicie innowacyjnego trolejbusu z dodatkowym zasilaniem bateryjnym o podwyższonych możliwościach jazdy ciągłej z użyciem magazynu energii. Projektowane trolejbusy będą wyposażone w układ telemetry 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.

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

 **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.

Keywords: Energy storage, Trolleybus, LTO, EMS, HEV, EV, scalable, CAN

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 innowację 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 systemy 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



Rys. 1. Struktura komunikacyjna systemu – założenia

ograniczania parametrów użytkowych. Istotną cechą tego rozwiązania będzie modułowość, a co za tym idzie – skalowalność, które zaoferują możliwość konfiguracji systemu baterijnego.

### 3. Symulacja układu chłodzenia baterii.

#### Struktura zasobnika

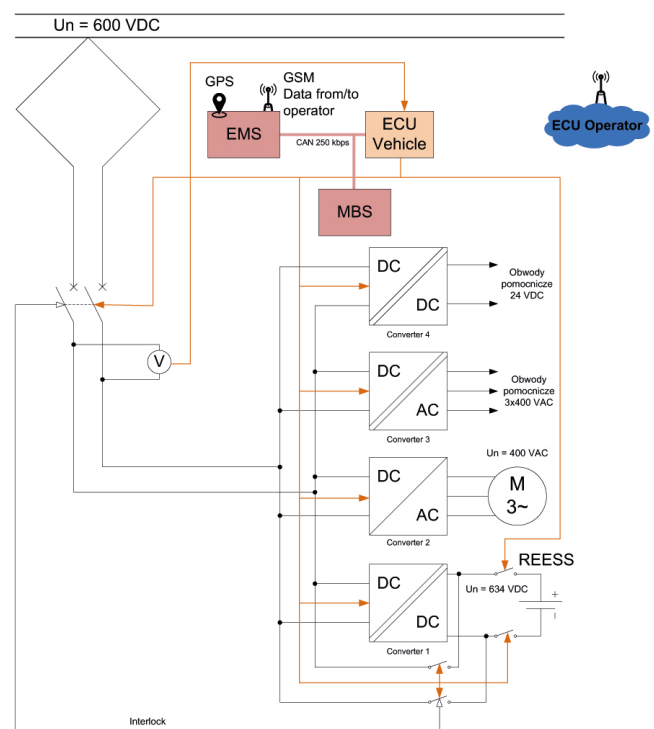
Ustalono, że struktura systemu [3] będzie zbliżona do systemów składowych o mocy maksymalnej przekraczającej 28 kWh opracowanych w ramach wcześniejszych projektów. Postanowiono, że system baterijny (dalej BP) do zabudowy w trolejbusie dwunastometrowym musi składać się z dwóch takich modułów bateryjnych, z kolei w trolejbusie 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). Zobrazowano 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 ogni w co najmniej kilkunastu sesjach na sekundę. Łączy ona moduły ogni w jednolity system podrzędny, symulujący jednostkowy zasobnik stanowiący składową dla całego systemu magazynu energii dla pojazdu. Średnia warstwa komunikacyjna (internal – 1st lvl) pozwala na logiczne zarządzanie przepływem energii pomiędzy zasobnikami. Odpowiada ona za zebranie danych z najniższej warstwy, 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*) innowacyjne rozwiązanie pozwalające na automatyczne dołączanie pojazdu (trolejbusu) do trakcji [4].

### 4. Wyniki symulacji. 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).



Rys. 2. Schemat poglądowy pojazdu

Przewidziano szereg trybów pracy systemu. Oto niektóre z nich:

- praca na trakcji – 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 – tryb rozważany teoretycznie dla projektu;
- praca na trakcję – oddawanie energii odzyskowej z hamowania.

Wybór danego trybu pracy będzie realizowany przez jednostkę EMS. Jej 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.

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.

Założono do symulacji określony profil obciążenia obejmujący dystans 0,92 km (rys. 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.

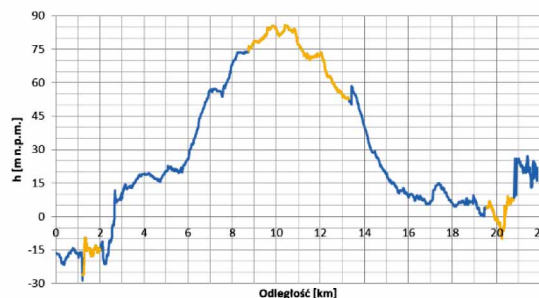
Uzyskany przebieg mocy pobieranej z zasobnika bateryjnego przedstawia rysunek 5.

Następnie, uwzględniając krzywą rozładowania dla ogniwa litowo-tytanowego, wyznaczono przebiegi prądu, napięcia oraz strat w zasobniku energii. Otrzymane przebiegi przedstawiono na rysunkach 6–8.

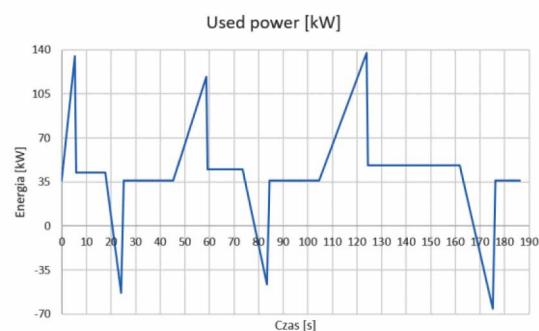
Otrzymany przebieg strat w funkcji przejechanego dystansu posłużył do przeprowadzenia symulacji odbioru energii cieplnej z zasobnika bateryjnego. Symulacje przeprowadzono dla czynnika chłodzącego G13 o temperaturze maksymalnej 15°C, przy założonym przepływie 50 l/min. Przyjęto moc chłodniczą urządzenia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

Symulacje prowadzono dla temperatury początkowej ogniów wynoszącej 15°C, 25°C oraz 35°C.

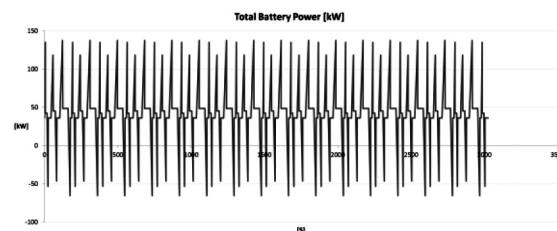
Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że moc chłodnicza 1500 W jest niewystarczająca dla powstrzymania wzrostu temperatury zasobnika bateryjnego. Wykresy poniżej (rys. 9 i 10) przedstawiają zmianę temperatury dla wybranej temperatury początkowej oraz mocy układu chłodniczego odpowiednio 1500 W oraz 3000 W.



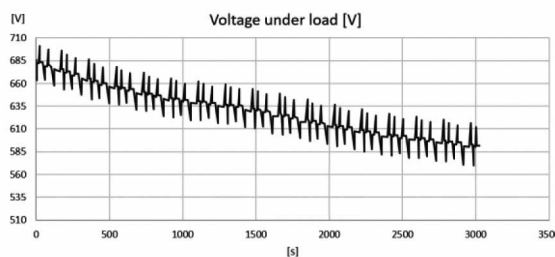
Rys. 3. Profil trasy odniesienia – na pomarańczowo zaznaczono odcinki bez sieci



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

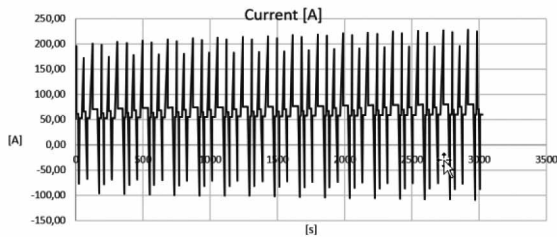


Rys. 5. Wykres mocy zasobnika energii na dystansie 15 km

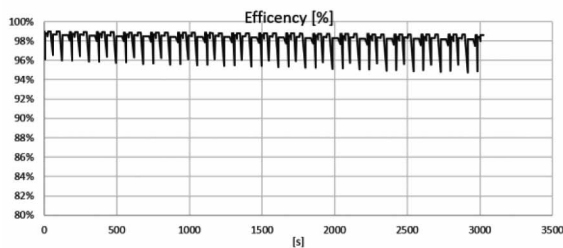


Rys. 6. Wykres napięcia zasobnika energii na dystansie 15 km

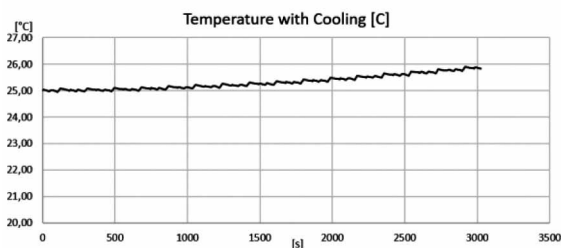
Dodatkowo przeprowadzono symulację zdolności układu chłodzenia do odebrania ciepła z zasobnika bateryjnego rozgrzanego do temperatury 55°C. W przypadku montażu zasobnika energii na dachu pojazdu pod wpływem promieni słonecznych może dojść do rozgrzania zasobnika, a taka temperatura jest zbyt wysoka,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



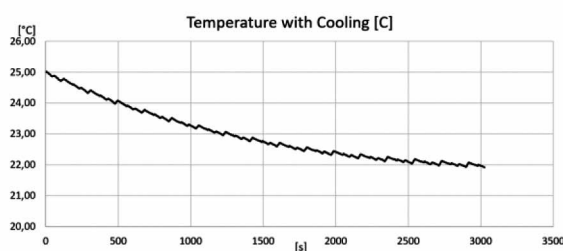
Rys. 7. Wykres natężenia prądu zasobnika energii na dystansie 15 km



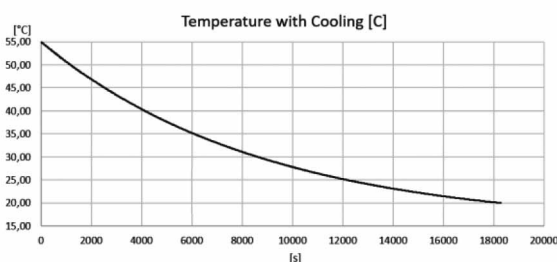
Rys. 8. Wykres strat zasobnika energii na dystansie 15 km



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



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. Odbyła 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.

## 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] MICHNA M., ADAMCZYK D., KUT F., RONKOWSKI M., BERNATT J., PISTELOK P., KRÓL E., KUCHARSKI Ł., KWIATKOWSKI M., BYRSKI Ł., KOZIOŁ M.: *Koncepcja, modelowanie i symulacja układu napędowego prototypu samochodu elektrycznego „Elv001”*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 92/2011.
- [4] KRAS B., IRZMAŃSKI P., KWIATKOWSKI M.: *DCCS-ECU jako innowacyjna jednostka kontrolna dla aplikacji EV i HEV*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 3(119)/2018.
- [5] ICPT SA, Development of universal electronic control unit for electric and hybrid vehicles, ICPT SA., <http://icpt.pl/innovations.aspx#tab1>.

**Informacje dodatkowe.** Projekt realizowany jest w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 oraz programu sektorowego „INNO-MOTO” 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

-  Paweł Irzmański – M.Sc., Impact Clean Power Technology SA,  
e-mail: [bk@icpt.pl](mailto:bk@icpt.pl);  
Maciej Kwiatkowski – M.Sc., Impact Clean Power Technology SA,  
e-mail: [bk@icpt.pl](mailto:bk@icpt.pl).  
Bartłomiej Kras – PhD, Impact Clean Power Technology SA,  
e-mail: [bk@icpt.pl](mailto:bk@icpt.pl)