

Mikołaj Bartłomiejczyk, Marcin Połom

Perspektywa wykorzystania napędu alternatywnego w lubelskiej komunikacji trolejbusowej (1)

Trolejbus stanowi pośrednie rozwiązanie między autobusem a tramwajem. System klasycznej komunikacji trolejbusowej nie wymaga tak znaczących nakładów inwestycyjnych jak w przypadku tramwaju, lecz nie jest porównywalnie elastyczny ruchowo. Komunikacja trolejbusowa uzależniona od zasilania trakcyjnego stała się uciążliwa w eksploatacji. Poszukiwano więc rozwiązań umożliwiających „uelastyczenie” trolejbusów. W wyniku rozwoju technologii pojawiły się alternatywne sposoby zasilania układu napędowego trolejbusów przez zabudowanie agregatów spalinowych spełniających rolę prądnicy, akumulatorów o dużej pojemności energetycznej lub zasobników superkondensatorowych.

Przesłanką kierującą uwagę przewoźników na poprawę warunków eksploatacyjnych były przede wszystkim wysokie koszty utrzymania rezerwy autobusów na ewentualność zaniku zasilania w sieci trakcyjnej, poważnego zerwania przewodów jezdnych lub długotrwałej przebudowy ulicy. Trolejbusy pozostające w zajezdni nie zarabiały na swoje utrzymanie, a autobusy kursujące na liniach trolejbusowych generowały większe koszty przez co komunikacja trolejbusowa wypadła w bilansie ekonomicznym negatywnie.

Podobne przesłanki kierowały uwagę władz Lublina i dyrekcji Zarządu Transportu Miejskiego w Lublinie ku innowacyjnym rozwiązaniom alternatywnego zasilania układów napędowych w trolejbusach. Pod uwagę brano rozwiązania umożliwiające jazdę w sytuacji awaryjnej lub przy stałym wykorzystaniu na linii, jako rozwiązania docelowego.

W artykule przedstawiono zarys opracowania wykonanego dla organizatora komunikacji miejskiej w Lublinie, które miało umożliwić uzyskanie odpowiedzi na pytanie „Czy w Lublinie jest zasadne i możliwe wykorzystanie alternatywnego źródła zasilania w regularnej obsłudze tras trolejbusowych?”.

Doświadczenia z innych miast w Polsce i Europie

Spośród ponad 150 sieci trolejbusowych zlokalizowanych w Europie (z wyłączeniem Federacji Rosyjskiej), ponad 50 ma doświadczenia w zakresie wykorzystania w ruchu awaryjnym lub regularnym alternatywnych źródeł zasilania. Najwięcej systemów komunikacji trolejbusowej wykorzystuje pojazdy wyposażone w agregat spalinowy. Mniejsze doświadczenia, przede wszystkim ze względu na ograniczoną dostępność rozwiązania w przeszłości, dotyczą baterii trakcyjnych i superkondensatorowych zasobników energii. Pojawiają się także rozwiązania hybrydowe – superkondensator i agregat spalinowy lub baterie trakcyjne.

Wiodący producenci taboru trolejbusowego w Europie oferują pojazdy wyposażone w agregaty spalinowe lub superkondensatory. Baterie trakcyjne implementowane są w układach napędowych trolejbusów marki Solaris lub Škoda (na nadwoziach Solaris, SOR, Irisbus, Breda) oraz w trolejbusach różnych producentów oferujących napęd Cegelec (w tym Bogdan, Łaz, Maz, SOR).

Układ komunikacji trolejbusowej w Lublinie

W okresie przygotowywania analizy wykorzystania trolejbusów z alternatywnym źródłem zasilania, w Lublinie funkcjonowało 8 regularnych linii trolejbusowych oraz 1 sezonowa linia turystyczna. Układ przestrzenny Lublina umożliwia stworzenie gwiazdowego układu sieci i taki charakter miał system komunikacji trolejbusowej w Lublinie do 1994 r. Wówczas podjęto decyzję o wyłączeniu z ruchu kołowego części Krakowskiego Przedmieścia. Kursującym tą ulicą autobusom zmieniono trasy, natomiast linie trolejbusowe z braku innej możliwości przebiegu zlikwidowano. Udział komunikacji trolejbusowej w ogólnej pracy przewozowej systemu transportowego mała, głównie przez niefunkcjonalność układu sieci trakcyjnej. Istniała co prawda możliwość wybudowania objazdu zamkniętego odcinka, lecz przez wąskie uliczki o zabytkowym charakterze i nie było możliwości wybudowania na nich sieci trakcyjnej. Alternatywą mogłyby stać się trolejbusy z alternatywnym źródłem zasilania, które omijałyby zamknięty odcinek sieci przez inne ulice centrum miasta. Opracowanie przygotowane dla ZTM w Lublinie zakłada poprawę funkcjonalności układu komunikacji trolejbusowej dzięki wprowadzeniu do eksploatacji baterii trakcyjnych lub agregatów spalinowych.

Dostępne rozwiązania techniczne

Analizując możliwość wprowadzenia do eksploatacji w Lublinie trolejbusów z alternatywnym źródłem zasilania prześlędono dostępne rozwiązania techniczne. W Polsce, tylko gdyńskie Przedsiębiorstwo Komunikacji Trolejbusowej miało wówczas pewne doświadczenia związane z wykorzystaniem baterii trakcyjnych, lecz w ruchu incydentalnym. Wykonując opracowanie poszukiwano się więc doświadczeniami przedsiębiorstw zagranicznych, głównie z Czech (agregaty spalinowe) oraz informacjami pochodzącymi od producentów taboru i alternatywnych źródeł zasilania (agregaty, baterie, superkondensatory). Przyjęto, że rozwiązaniem docelowym w Lublinie powinno być bezemisyjne, przynajmniej w miejscu eksploatacji, źródło zasilania układu napędowego trolejbusu przy jeździe bezsieciowej, bez względu na rodzaj eksploatacji – awaryjnej lub liniowej. Rozwiązaniem najpopularniejszym, a więc teoretycznie najłatwiej dostępnym były baterie trakcyjne. Agregat spalinowy bez względu na poziom emisji spalin, zawsze pozostanie rozwiązaniem mniej ekologicznym niż

baterie trakcyjne. Jest to szczególnie istotne w przypadku trolejbusów, zazwyczaj kursujących w ścisłym centrum miast i w miejscach o największej kongestii. Aby rekomendować władzom Lublina jakiegokolwiek rozwiązanie, należało prześledzić nie tylko dostępność sugerowanej propozycji, ale także zasadność ekonomiczną. Wobec powyższego końcowej analizie poddano także superkondensatory i agregaty spalinowe w odniesieniu do projektowanych tras wykorzystujących autonomiczne źródło zasilania.

Analiza dostępnych technologii bateryjnych

Pierwszym analizowanym rodzajem baterii były baterie ołowiowe. Jest to najstarsza i stale najbardziej popularna technologia ogniw elektrochemicznych. Jej popularność wynika z niskiej ceny, kilkakrotnie niższej niż w przypadku innych technologii. Baterie ołowiowe były powszechnie stosowane jako źródło zasilania pomocniczego w trolejbusach w latach pięćdziesiątych dwudziestego wieku. Do tego celu wykorzystywano baterie samochodowej instalacji elektrycznej 24 V, które w trakcie jazdy łączone były szeregowo i zasilają silnik trakcyjny napięciem 72 V lub 92 V. Ołowiowe baterie przez długi czas były także stosowane – i w licznych przypadkach, za sprawą niskiej ceny, są nadal w użyciu – do zasilania elektrycznych pojazdów autonomicznych, takich jak wózki akumulatorowe lub elektrobusy.

W ciągu ostatnich lat, z powodu ich wielu wad: dużej masy, braku możliwości szybkiego ładowania, małej mocy, następuje odejście od tej technologii w zastosowaniach trakcyjnych.

Przykładem wykorzystania ołowiowych baterii do napędu trolejbusów są pojazdy Solaris Trollino/Cegelec w wykonaniu solowym (fot. 1) i przegubowym dla szwajcarskiego miasta La Chaux des Fonds (pojazdy przegubowe zostały w 2012 r. odsprzedane do Salzburga). Baterie trakcyjne, służące głównie do poruszania się po zajezdni i przejazdu przez myjnie, mają następujące parametry:

- producent – Hopecke;
- pojemność – 150 Ah;
- całkowite napięcie – 96 V (pojazdy 12-metrowe) lub 120 V (pojazdy przegubowe);
- moc – 28,8 kW (pojazdy 12-metrowe) lub 36 kW (pojazdy przegubowe);
- pojemność energetyczna – 14,4 kWh (pojazdy 12-metrowe) lub 18 kWh (pojazdy przegubowe);
- masa – 640 kg (pojazdy 12-metrowe) lub 800 kg (pojazdy przegubowe);
- miejsce zabudowy – na dachu pojazdu.

W trakcie jazdy autonomicznej napęd trolejbusu jest zasilany bezpośrednio napięciem baterii, co skutkuje jego ograniczeniem do 15 km/h.

Drugim typem baterii wziętych pod uwagę były akumulatory nikielowo-kadmowe. Swoją popularność w zakresie zastosowań trakcyjnych baterie Ni-Cd zyskały głównie za sprawą ich bardzo dużej obciążalności prądowej oraz możliwości ładowania prądem 1 C, czyli kilkakrotnie większym niż w przypadku baterii ołowiowych. Należy także nadmienić bardzo dobrą żywotność baterii Ni-Cd, dzięki czemu w niektórych aplikacjach baterie te pracują ponad 20 lat. Istotną zaletą jest także wysoki stopień tzw. „głupodporności” tych ogniw: nie wymagają skomplikowanych układów BMS, mogą pracować w szerokim zakresie temperatur oraz konsekwencje złego użytkowania są stosunkowo niewielkie.



Fot. 1. Trolejbus Solaris Trollino/Cegelec w La Chaux des Fonds

Przykładem zastosowania baterii Ni-Cd do zasilania awaryjnego trolejbusów są pojazdy Solaris Trollino 12/Medcom eksploatowane przez PKT Gdynia. Baterie trakcyjne są połączone z pozostałą instalacją elektryczną 600V za pomocą rezonansowego przekształtnika DC/DC, który w trakcie jazdy autonomicznej podwyższa napięcie baterii do napięcia znamionowego układu napędowego a w trakcie jazdy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej pełni rolę ładowarki akumulatorów. Ponadto, przekształtnik ten zapewnia separację galwaniczną pomiędzy ogniwami a potencjałem sieci trakcyjnej. Baterie trakcyjne oraz przekształtnik są umieszczone w tylnej części pojazdu. Trolejbus jest wyposażony w automatyczne odbieraki prądu umożliwiające przyłączenie i odłączenie się od sieci trakcyjnej bez konieczności ręcznego manipulowania przez kierowcę.

Charakterystyka baterii nikielowo-kadmowych zastosowanych w Gdyni:

- producent ogniw – SAFT,
- typ ogniw – STH 800,
- pojemność baterii – 80 Ah,
- pojemność energetyczna baterii – 16,1 kWh,
- moc chwilowa baterii – 80 kW,
- masa baterii wraz z przekształtnikiem DC/DC – 800 kg,
- prąd ładowania szybkiego/standardowego – 1 C/0,1 C,
- miejsce zabudowy – w tylnej części pojazdu.

Następnym przeanalizowanym typem baterii były ogniwa nikielowo-wodorkowe (Ni-MN), które są powszechnie stosowane pod postacią akumulatorów „paluszkowych” 1,2 V do aparatów fotograficznych, stosowanych w miejsce jednorazowych baterii alkalicznych. Ogniwa Ni-MN są rozwinięciem technologii nikielowo-kadmowej, od swych poprzedników różnią się przede wszystkim bardzo dużą cyklicznością. Z tego powodu w pojazdach trakcyjnych mają zastosowanie tam, gdzie jest wymagana zdolność do częstego ładowania i rozładowania, czyli głównie w pojazdach hybrydowych. Dzięki swej dużej cykliczności znalazły zastosowanie także jako autonomiczne źródło zasilania trolejbusów kursujących liniowo po odcinkach pozbawionych sieci trakcyjnej (np. w Solarisach Trollino 18 w Rzymie).

Zasadniczą wadą baterii Ni-MH jest bardzo duża zmienność ich parametrów w zależności od temperatury. W przypadku szeregowego łączenia wielu ogniw, co ma miejsce w pojazdach elektrycznych, nawet niewielkie różnice temperatury poszczególnych ogniw skutkują nierównością napięć na ogniwach, co może do-

przewodzą nawet to uszkodzenia baterii. Zapobiec można temu poprzez zastosowanie układu BMS regulującego proces rozładowania i ładowania baterii lub poprzez wyposażenie zespołu baterii w cieżkową regulację temperatury, pozwalającą na utrzymanie stałej temperatury wszystkich ogniw. Drugie rozwiązanie jest stosowane przez firmę SAFT w zasobnikach dla tramwajów hybrydowych.

Ze względu na swoją wysoką cenę, spowodowaną jednostkową produkcją wielkopojemnych modułów bateryjnych Ni-MH, w ostatnim czasie widoczne jest zmniejszenie zainteresowania tą technologią na rzecz baterii litowo-jonowych.

Jednym z zastosowań baterii Ni-MH są trolejbusy dla Rzymu, przejeżdżające pięciokilometrowy odcinek w centrum bez zasilania z sieci trakcyjnej. Wyposażono je w baterie firmy Goldpeak cechujące się następującymi parametrami:

- zastosowane moduły – GPEVS 10M80EVS02, każdy moduł ma 10 szeregowo połączonych ogniw o pojemności 80 Ah;
- liczba szeregowo połączonych modułów – 40;
- całkowite napięcie baterii – 480 V;
- pojemność energetyczna – 38,4 kWh;
- całkowita masa – 1120 kg;
- umieszczenie baterii – w pierwszym członie, pod siedzeniami.

Baterie są chłodzone powietrzem, co w pierwszych latach było powodem problemów wywołanych nierównomierną temperaturą poszczególnych ogniw. Konieczne było późniejsze wyposażenie zespołu baterii w BMS.

Ostatnim, czwartym rozwiązaniem podlegającym ocenie były baterie Li-Ion, które od wielu lat są stosowane powszechnie jako źródło zasilania telefonów komórkowych oraz komputerów i stopniowo wypierają wszystkie pozostałe technologie bateryjne. Ich bezsporną zaletą jest mała masa w przeliczeniu na jednostkę pojemności, kilkukrotnie mniejsza niż w przypadku innych baterii. Napięcie pracy ogniwa mieści się w zakresie 3,2–3,8 V, co umożliwia uzyskanie relatywnie wysokich napięć, dzięki czemu zbędne jest stosowanie przetwornic zwiększających napięcie.

Przez długi czas główną przeszkodą w rozpowszechnieniu się baterii Li-Ion jako źródła zasilania pojazdów komunikacji miejskiej było zastosowanie w nich niebezpiecznego litu, co stwarza zagrożenie wybuchu w przypadku zwarcia baterii. Jednak dotychczasowa eksploatacja pojazdów wyposażonych w baterie litowe o wielkiej pojemności pozwala stwierdzić, iż jest to technologia bezpieczna dla pasażerów. W ostatnich latach widoczne też jest zmniejszenie cen baterii litowo-jonowych. Obecnie ceny tych baterii, w przeliczeniu na jednostkę pojemności są porównywalne z bateriami niklowo-kadmowymi i znacznie niższe od baterii niklowo-wodorkowych.

Baterie litowo-jonowe nie powinny pracować w temperaturze poniżej zera stopni Celsjusza, a praca w temperaturach poniżej –20°C jest zupełnie niemożliwa. W związku z tym konieczne jest uwzględnienie tego faktu przy projektowaniu systemów bateryjnych. Ogniwa litowe są także bardzo wrażliwe na parametry procesu ładowania, co stawia wysokie wymagania układom BMS, od których w znacznym stopniu zależy żywotność ogniw.

Jako przykład praktycznego zastosowania baterii litowo-jonowych można przedstawić trolejbus OAF Graf & Siffert NGE 152 M17 hybrid, który znajduje się w eksploatacji w niemieckim mieście Eberswalde. Podczas jazdy bezsieciowej zasilany jest z hybrydowego zasobnika energii wyprodukowanego przez firmę RWR Railway Service GMBH, zawierającego:

- superkondensatory o pojemności energetycznej 0,4 kWh do zwiększenia efektywności hamowania odzyskowego;
- litowe baterie o pojemności 12 kWh, mające za zadanie zwiększenie zasięgu jazdy przy zasilaniu bezsieciowym, o masie 170 kg.

Baterijna część zasobnika składa się z 10 litowo-jonowych modułów HEB 40/36 produkcji RWR o następujących parametrach technicznych:

- napięcie – 36 V, każdy moduł składa się z 10 ogniw Li-Ion;
- pojemność – 40 Ah;
- maksymalny prąd ładowania – chwilowy (30 s) 160 A, ciągły 80 A;
- maksymalny prąd obciążenia – 200 A;
- masa – 17 kg.

Każdy moduł jest wyposażony w indywidualny system sterowania. Ze względu na minimalną temperaturę pracy ogniw wynoszącą –20°C, każdy z modułów jest wyposażony w grzejnik elektryczny o mocy 50 W.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie pojemności energetycznej baterii trakcyjnych stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych różnego typu. Należy zwrócić uwagę na bardzo duży rozrzut parametrów wśród poszczególnych technologii. W tabeli 2 przedstawiono uproszczone porównanie cech poszczególnych technologii bateryjnych.

Tabela 1

Porównanie podstawowych cech poszczególnych technologii bateryjnych (znak „+” oznacza stopniowanie pozytywne a znak „-” – negatywne)

| Technologia | Pb | Ni-Cd | Ni-MH | Li-Ion |
|------------------------------|----|-------|-------|--------|
| Masa | + | + | + | +++ |
| Żywotność | + | +++ | + | + |
| Cykliczność | + | + | +++ | + |
| Moc | + | +++ | ++ | +++ |
| Szybkość ładowania | + | +++ | +++ | +++ |
| Złożoność BMS | - | - | --- | --- |
| Wrażliwość na temperaturę | - | - | --- | --- |
| Cena za jednostkę pojemności | - | --- | --- | - |

Tabela 2

Porównanie pojemności energetycznej baterii trakcyjnych stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych

| Miasto/producent | Zastosowanie | Technologia | Stosunek pojemność/masa |
|---------------------------|---------------------------------|-------------|-------------------------|
| Coimbra | Elektrobus | Pb | 28,0 |
| Solaris/La Chaux de Fonds | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Pb | 22,5 |
| Neoplan/Vancouver | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Ni-Cd | 12,0 |
| ČAS SERVICE | Elektrobus | Ni-Cd | 50,0 |
| Škoda/Mariańskie Łaźnie | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Ni-Cd | 22,0 |
| Solaris/Gdynia | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Ni-Cd | 22,0 |
| Solaris/Rzym | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Ni-MH | 34,3 |
| SAFT | Tramwaj hybrydowy | Hi-MH | 22,5 |
| Triple Hybrid T2 Bus | Autobus hybrydowy | Ni-MH | 26,0 |
| Ostrava/SOR EBN 10,5 | Elektrobus | Li-Ion | 104,0 |
| Eberswalde/OAF Graf | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Li-Ion | 71,0 |
| Hoppecke | Trolejbus – zasilanie dodatkowe | Li-Ion | 42,0 |