

Mikołaj Bartłomiejczyk, Marcin Połom

Perspektywa wykorzystania napędu alternatywnego w lubelskiej komunikacji trolejbusowej (2)

Założenia projektowanych tras z wykorzystaniem przejazdu bezsieciowego

Do obliczeń przyjęto eksploatację trolejbusów standardowych, długości 12 m o następujących podstawowych parametrach technicznych:

- masa pojazdu przy pełnym napełnieniu 18 t
- masa pojazdu przy napełnieniu 50% 15 t
- prędkość maksymalna przy zasilaniu bateryjnym 50 km/h
- przyspieszenie maksymalne przy zasilaniu bateryjnym 1 m/s²
- współczynnik mas wirujących 1,2
- moc odbiorów nieatrakcyjnych 6 kW

Przeprowadzono obliczenia dla czterech tras, wyznaczonych przez Zarząd Transportu Miejskiego w Lublinie, których parametry przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 2.

Porównując obliczenia ruchu trolejbusu opisano równaniem (1). Wykorzystywana jest w nim charakterystyka trakcyjna $F(v)$ trolejbusu oraz opory ruchu $W(v)$. W modelu trolejbus analizowany jest jako punkt o skupionej masie, opisany układem równań:

$$\begin{cases} m \cdot k \cdot \frac{dv}{dt} = F(v(t)) - W(v(t)) \\ \frac{ds}{dt} = v \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

k – współczynnik mas wirujących, którego wartość w trakcji trolejbusowej przyjmuje się na poziomie 1,2.

Opory ruchu W pojazdu określono wzorem:

$$W = 0,00981m(7,6 + 0,56v) + 0,018v^2q + 0,00981mi \quad (2)$$

gdzie:

m – masa trolejbusu [kg],
 v – prędkość [km/h],

q – powierzchnia czoła nadwozia [m²],
 i – pochylenie trasy [‰].

Pierwsze dwa składniki sumy są zasadniczymi oporami ruchu, natomiast trzeci składnik odpowiada dodatkowym oporom ruchu wynikającym z nachylenia jezdni. Dodatkowe oporu ruchu, w zależności od kierunku nachylenia, mogą mieć wartość dodatnią lub ujemną.

Charakterystyka trakcyjna $F(v)$ jest określona mocą napędu oraz maksymalnym dopuszczalnym przyspieszeniem. W trakcie hamowania przyjmowane jest stałe opóźnienie wynoszące 1 m/s². Zakłada się brak hamowania odzyskowego przy zasilaniu bezsieciowym.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki obliczeń energetycznych dla poszczególnych tras, przy różnym stopniu napełnienia pojazdów. W tabeli 5 podano energochłonność przejazdu dla poszczególnych wariantów. Widoczny jest wpływ profilu trasy na zużycie energii. Przy obliczeniach zużycia energii dla napełnienia 50% przyjęto optymalny, z energetycznego punktu widzenia, sposób prowadzenia pojazdów.

Dobór baterii trakcyjnych

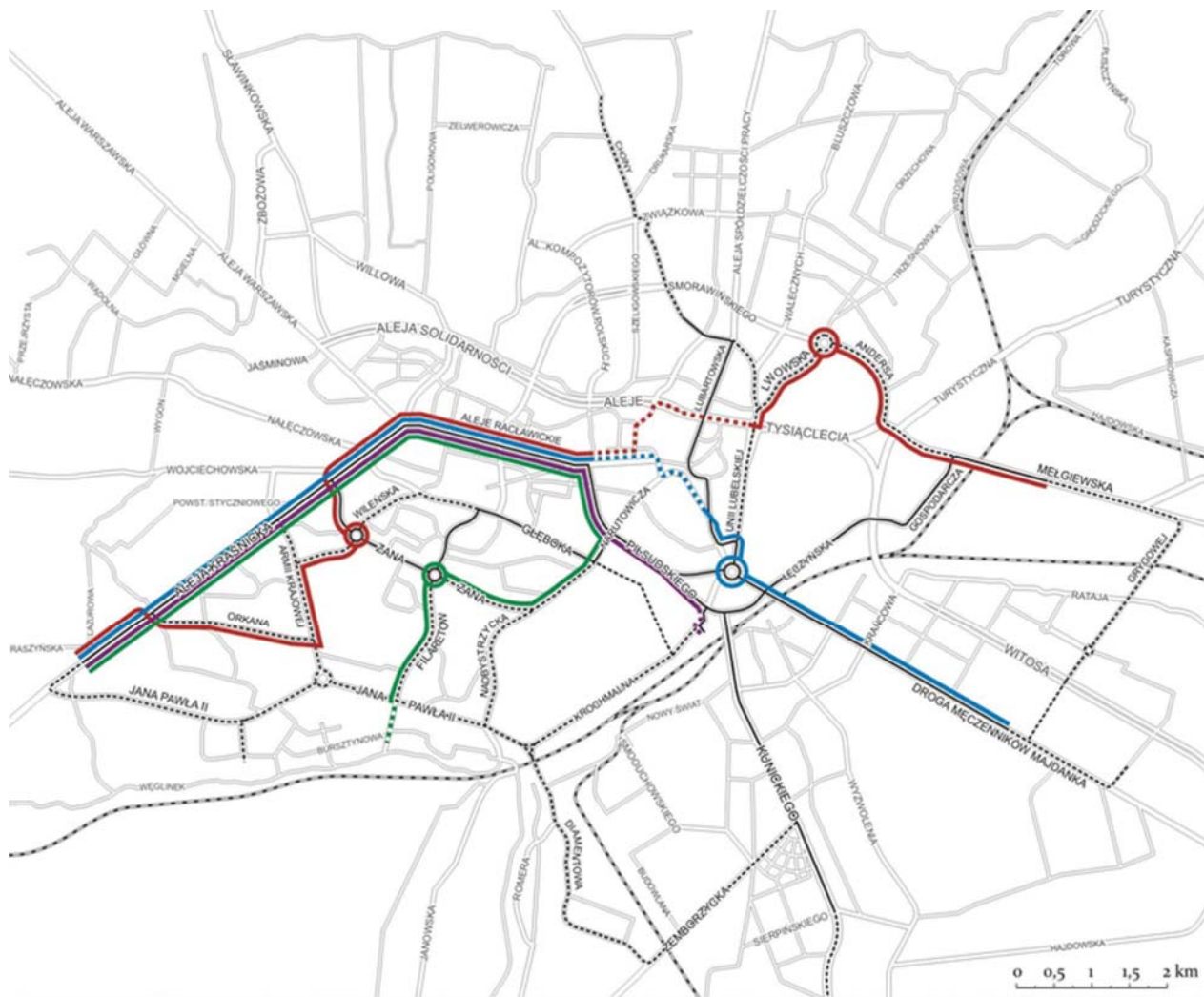
Zależność poszczególnych parametrów baterii można porównać do zasady naczyń połączonych. W uproszczony sposób zilustrowano to na rysunku 3. Strzałki oznaczają zależność zmienności wybranych dwóch parametrów baterii przy założeniu zachowania stałej wartości pozostałych czynników i identycznych ogniw.

Zasadniczym czynnikiem określającym cykliczność, a co za tym idzie czas życia baterii, jest głębokość rozładowania (DOD), określona jako stosunek energii pobranej z baterii w trakcie każdego cyklu do pojemności całkowitej. Przykładowy kształt tej zależności, odniesiony do baterii NiCd, przedstawiono na rysunku 4. Wraz ze zwiększeniem głębokości rozładowania zmniejsza się czas życia baterii.

Tabela 3

Przebieg tras, dla których wykonano obliczenia

Trasa	Przebieg	Odcinek jazdy bateryjnej kierunek A	Odcinek jazdy bateryjnej kierunek B
1. Solidarności	Kierunek 1: Węglin – al. Kraśnicka – Orkana – Armii Krajowej – Bohaterów M. Cassino – Zana – al. Kraśnicka – Al. Raclawickie – Krakowskie Przedmieście – 3 Maja – al. Solidarności – al. Tysiąclecia – Lwowska – Andersa – Melgiewska FS (kierunek 2 – przeciwny)	Przystanek KUL → Przystanek Singera 3 km	Przystanek Singera → Przystanek Ogród Saski 2,5 km
2. Bernardyńska	Kierunek 1: Węglin – al. Kraśnicka – Al. Raclawickie – Krakowskie Przedmieście – Kapucyńska – Plac Wolności – Bernardyńska – Zamojska – Fabryczna – Droga Męczenników Majdanka – Majdaneł (kierunek 2 – przeciwny)	Przystanek KUL → Przystanek Zamojska 2,3 km	Przystanek Zamojska → Przystanek Ogród Saski 1,9 km
3. Dworzec	Węglin – al. Kraśnicka – Al. Raclawickie – Lipowa – al. Piłsudskiego – Młyńska – Dworzec Gł. PKP	Przystanek Targi Międzynarodowe → Dworzec PKP → Przystanek Targi Międzynarodowe 1,5 km; postój na pętli Dworzec PKP 15 min	
4. Osiedle Widok	Węglin – al. Kraśnicka – Al. Raclawickie – Lipowa – Nadbystrzycka – Zana – Filaretów – Os. Widok	Przystanek Fantastyczna → Osiedle Widok → Przystanek Fantastyczna 1,3 km; postój na pętli Osiedle Widok 15 min	



— istniejąca infrastruktura nazimowej sieci trakcyjnej

----- docelowy układ sieci trolejbusowej przewidywany w ramach projektów rozwojowych

TRASA	PRZEBIEG	ODCINEK JAZDY BATERYJNEJ	
		kierunek A	kierunek B
1. „Solidarności”	<p>Kierunek 1: Węglin – al.Kraśnicka – Orkana – Armii Krajowej – Bohaterów M. Cassino – Zana – al.Kraśnicka – Al.Racławickie – Krakowskie Przedmieście – 3 Maja – al.Solidarności – al.Tysiąclecia – Lwowska – Andersa – Melgiewska FS</p> <p>Kierunek 2: przeciwny</p>	<p>Przystanek KUL -> Przystanek Singera</p> <p>3 km</p>	<p>Przystanek Singera -> Przystanek Ogród Saski</p> <p>2,5 km</p>
2. „Bernardyńska”	<p>Kierunek 1: Węglin – al.Kraśnicka – Al.Racławickie – Krakowskie Przedmieście – Kapucyńska – Plac Wolności – Bernardyńska – Zamojska – Fabryczna – Droga Męczenników Majdanka – Majdanek</p> <p>Kierunek 2: przeciwny</p>	<p>Przystanek KUL -> Przystanek Zamojska</p> <p>2,3 km</p>	<p>Przystanek Zamojska -> Przystanek Ogród Saski</p> <p>1,9 km</p>
3. „Dworzec”	<p>Węglin – al.Kraśnicka – Al.Racławickie – Lipowa – al.Piłsudskiego – Młyńska – Dworzec Gł. PKP</p>	<p>Przystanek Targi Międzynarodowe -> Dworzec PKP -> Przystanek Targi Międzynarodowe</p> <p>1,5 km</p> <p>Postój na pętli Dworzec PKP 15 minut</p>	
4. „Os. Widok”	<p>Węglin – al.Kraśnicka – Al.Racławickie – Lipowa – Nadbystrzycka – Zana – Filaretów – Os.Widok</p>	<p>Przystanek Fantastyczna -> Osiedle Widok -> Przystanek Fantastyczna</p> <p>1,3 km</p> <p>Postój na pętli Osiedle Widok 15 minut</p>	

Rys. 2. Schemat przebiegu czterech projektowanych tras z podziałem na jazdę przy zasilaniu sieciowym i korzystaniu z alternatywnego źródła

Wraz ze zwiększeniem odległości pokonywanej przy zasilaniu bateryjnym zwiększa się ilość energii pobranej z baterii, skutkiem czego zwiększa się stopień rozładowania baterii i zmniejsza się ich żywotność – co odpowiada zależności oznaczonej jako (1). Jednym ze sposobów zwiększenia żywotności jest zwiększenie liczby ogniw – a co za tym idzie – zwiększenie masy baterii. Następstwem tego zwiększa się całkowita pojemność baterii i – przy niezmienniej wartości pobranej energii – zmniejsza się stopień rozładowania, efektem tego wydłuża się czas życia baterii (2). Zasięg jazdy jest oczywiście uzależniony od masy baterii (3) – czym więcej ogniw, tym większa jest całkowita pojemność baterii.

Tabela 4

Wyniki obliczeń energetycznych – zużycie energii na poszczególnych odcinkach

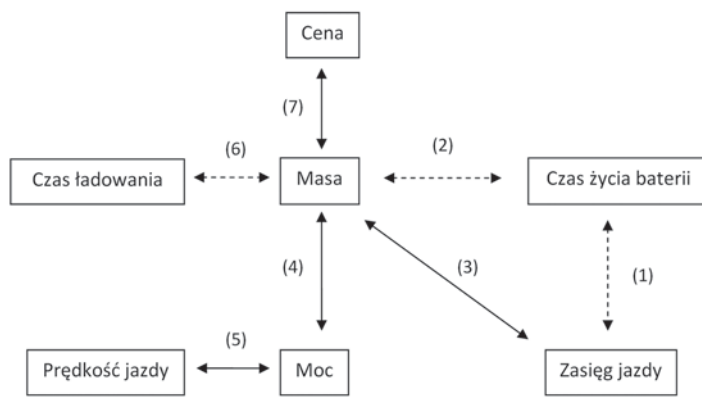
Trasa	Tryb pracy	Kierunek 1	Kierunek 2	Średnia
		[kWh]		
1 – Solidarności	Napełnienie 100%	6,25	6,92	6,59
	Napełnienie 50%	5,12	5,17	5,15
2 – Bernardyńska	Napełnienie 100%	3,93	5,81	4,87
	Napełnienie 50%	3,02	4,35	3,67
3 – Dworzec	Napełnienie 100%	4,09 (2,64)	—	4,09
	Napełnienie 50%	3,64 (2,19)	—	3,64
4 – Os. Widok	Napełnienie 100%	1,94 (3,39)	—	3,39
	Napełnienie 50%	1,47 (2,92)	—	2,92

Tabela 5

Energochłonność na poszczególnych odcinkach

Trasa	Tryb pracy	Kierunek 1	Kierunek 2	Średnia
		[kWh/km]		
1 – Solidarności	Napełnienie 100%	2,08	2,76	2,42
	Napełnienie 50%	1,71	2,07	1,89
2 – Bernardyńska	Napełnienie 100%	1,71	3,06	2,39
	Napełnienie 50%	1,31	2,29	1,80
3 – Dworzec*	Napełnienie 100%	1,76	—	1,76
	Napełnienie 50%	1,46	—	1,46
4 – Os. Widok	Napełnienie 100%	1,49	—	1,49
	Napełnienie 50 %	1,13	—	1,13

* Bez uwzględnienia zużycia energii podczas postoju na pętli.



Rys. 3. Zależność poszczególnych parametrów baterii trakcyjnych
Strzałka ciągła – zależność współbieżna, strzałka przerywana – zależność przeciwniebieżna

W przypadku pracy cyklicznej, jako optymalny poziom rozładowania baterii przyjmuje się 20%, co odpowiada żywotności 10–20 tys. cykli, czyli 5–7 lat eksploatacji. W związku z tym średnie zużycie energii podczas przejazdu odcinkiem bezsieciowym powinno odpowiadać właśnie takiej głębokości rozładowania. W sytuacjach awaryjnych jednak jest dopuszczalne głębsze rozładowanie, rzędu 50–60%. Oznacza to, że prawidłowo zaprojektowany zasobnik baterijny ma znaczną rezerwę pojemności na wypadek sytuacji nieprzewidzianych, takich jak korki na odcinku jazdy autonomicznej. Należy zaznaczyć, że pojęcie żywotności baterii jest umowne. Jest to liczba cykli, po której pojemność baterii zmniejsza się poniżej 80% pierwotnej pojemności – pojemność baterii zmniejsza się z każdym cyklem, co przedstawiono na rysunku 5. W przypadku przewidywanego stopnia wykorzystania baterii na poziomie jedynie 10–20%, możliwa jest ich praca przy większym stopniu zużycia, efektem czego liczba cykli napędu baterijnego może wynieść ok. 20–30 tys.

Kluczowym zagadnieniem przy analizowanym reżimie pracy jest czas ładowania baterii. W uproszczeniu, przy założeniu efektywnego układu BMS, można go opisać wzorem:

$$t = \frac{DOD}{I_c \cdot n}$$

gdzie:

- t – względny czas ładowania baterii,
- DOD – głębokość rozładowania baterii,
- n – sprawność prądowa ładowania baterii,
- I_c – względny prąd ładowania.

Oznacza to, że czas ładowania baterii zależy od stopnia ich rozładowania (dla baterii Li-Ion sprawność prądowa jest rzędu 95%). Przy średnim rozładowaniu rzędu 20% czas ładowania można szacować jako 20–30 min (z uwzględnieniem czasu na balansowanie napięć poszczególnych ogniw). Przy większym stopniu rozładowania czas ten może wydłużyć się do jednej godziny. Można więc stwierdzić, że przy stałym poziomie rozładowania czas ładowania baterii zmniejsza się wraz ze zwiększeniem ich pojemności, a co za tym idzie – ich masy. Na rysunku 3 oznaczono to jako zależność (6).

Istotnym czynnikiem, związanym z doбором baterii trakcyjnych, jest ich maksymalna moc, od której zależą parametry dynamiczne jazdy trolejbusu. Moc jest uzależniona od maksymalnego prądu obciążenia baterii, który w przypadku ogniw Ni-Cd lub Li-Ion wynosi od 1,5 C do 5 C, w zależności od typu baterii. Możliwym sposobem zwiększenia mocy zasobnika, przy ustalonym typie baterii, jest zwiększenie napięcia całkowitego poprzez zwiększenie liczby ogniw. W związku z tym, z masą jest powiązana maksymalna wartość mocy zasobnika baterijnego (4) – zwiększenie liczby ogniw powoduje zwiększenie mocy możliwej do uzyskania z baterii, następstwem czego jest zwiększenie dynamiki jazdy trolejbusu (5). Wraz ze zwiększeniem wielkości baterii oczywiście zwiększa się ich cena (7).

Sposobem na poprawę parametrów systemu baterijnego jest zastosowanie ogniw o lepszych parametrach, co jednak może skutkować zwiększeniem ceny zasobnika.

Na podstawie obliczeń przejazdu teoretycznego, których wyniki przedstawiono, można określić następujące

parametry graniczne dla autonomicznego baterijnego źródła zasilania.

Trasa 1 – Solidarność

Średnie zużycie energii w trakcie przejazdu odcinkiem bezsieciowym wyniesie 5–6 kWh. Zakładając średnie rozładowanie baterii na poziomie 20%, minimalna pojemność baterii trakcyjnych musi wynosić 30 kWh. W przypadku takiej pojemności, w sytuacjach awaryjnych możliwe będzie rozładowanie baterii do 12–15 kWh, co daje rezerwę energii na wypadek wystąpienia znacznych utrudnień ruchowych na trasie przejazdu.

Moc baterii musi umożliwić pokonanie trudnego profilu trasy, którego nachylenie dla tego odcinka osiąga wartość 7%. Moc konieczna do wjechania z prędkością 25–30 km/h na podjazd o tej stromości wynosi 100 kW, jednak konieczne jest także zachowanie rezerwy umożliwiającej rozruch pojazdu z przyspieszeniem 0,3–0,5 m/s² przy jeździe „pod górę”. W związku z tym minimalna moc napędu autonomicznego musi wynosić 150 kW, co spełniają jedynie baterie litowo-jonowe.

Trasa 2 – Bernardyńska

Warunki przejazdu na tej trasie są podobne, jak w przypadku trasy 1 – Solidarność, ze względu na górzisty teren minimalna moc napędu autonomicznego musi wynosić także 150 kW. Ze względu na mniejsze średnie zużycie energii podczas przejazdu odcinkiem bezsieciowym – które wynosi ok. 5 kWh – możliwe jest zastosowanie baterii o pojemności 25 kWh. Analogicznie jak w poprzednim przypadku wymagania te spełniają jedynie baterie litowo-jonowe.

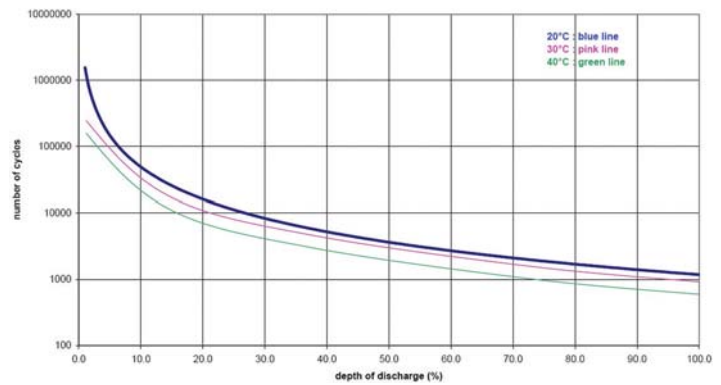
Trasa 3 – Dworzec

Zasadniczym czynnikiem, determinującym rodzaj technologii bateryjnej, jest kwestia zasilania trolejbusu podczas postoju na pętli „Dworzec PKP”. Piętnastominutowy postój wiąże się z pobraniem z baterii 1–2 kWh energii, podczas gdy średnia wartość energii niezbędna na pokonanie tego odcinka wynosi 2,2 kWh. Oznacza to, że w przypadku zapewnienia tzw. zasilania postojowego na pętli trolejbusowej, niezbędnego na podtrzymanie pracy odbiorów nieatrakcyjnych lub całkowitego wyłączenia pojazdu na czas postoju, możliwe jest wykorzystanie baterii niklowo-kadmowych o parametrach identycznych, jak w znajdujących się obecnie w eksploatacji w Gdyni trolejbusach Solaris Trollino/Medcom. Należy wziąć w uwagę, że moc tego zasobnika jest ograniczona do 80 kW, co ogranicza maksymalne nachylenie możliwe do pokonywania w ruchu liniowym do 4%, w związku z czym możliwość zastosowania baterii Ni-Cd na tym odcinku jest jeszcze uzależniona od konstrukcji planowanego wiaduktu.

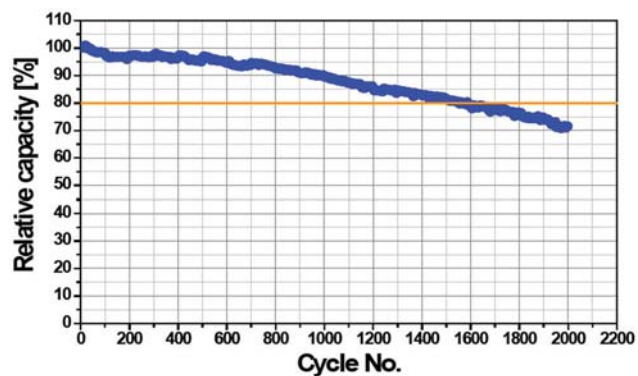
W innym przypadku, czyli jeśli nie zostanie zapewnione zasilanie postojowe na pętli trolejbusowej i nie będzie możliwości całkowitego wyłączenia pojazdu na czas postoju lub nachylenie wiaduktu będzie większe niż 4%, konieczne stanie się zastosowanie baterii litowo-jonowych. Pojemność tych baterii musi wynosić 20 kWh, natomiast moc będzie uzależniona od nachylenia jezdni na wiadukcie i wyniesie 100–150 kW.

Trasa 4 – Osiedle Widok

Analogicznie jak w przypadku trasy nr 3, zasadniczym czynnikiem determinującym rodzaj technologii bateryjnej jest kwestia zasilania trolejbusu podczas postoju na pętli Osiedle Widok. Przy bra-



Rys. 4. Zależność cykliczności baterii od głębokości rozładowania



Rys. 5. Zależność pojemności baterii od liczby wykonanych cykli pracy

ku postojowi lub przy zapewnieniu zasilania na czas postoju możliwe jest zastosowanie baterii niklowo-kadmowych. Wynika to z krótkiego odcinka jazdy bezsieciowej i płaskiego profilu terenu. W przypadku przewidzenia postoju na pętli Osiedle Widok i braku zasilania postojowego konieczne będzie zastosowanie baterii litowo-jonowych.

Proponowane rozwiązania bateryjne

Wyniki omówionych analiz pozwalają na zdefiniowanie dwóch możliwych rozwiązań pomocniczego napędu baterijnego:

- zespół baterii litowo-jonowych o pojemności 25–30 kWh i mocy 150 kW, który umożliwi obsługę wszystkich analizowanych wariantów;
- zespół baterii niklowo-kadmowych o pojemności 16 kWh i mocy 80 kW, który umożliwi ruch liniowy pojazdów w wariantach 3 i 4, czyli tras „Dworzec” i „Os. Widok” (przy spełnieniu warunków dotyczących postoju na pętli).

Podstawowym ograniczeniem pojemności baterii jest ich masa. Jako górną granicę należy przyjąć 800–900 kg, co odpowiada 5% masy całkowitej pojazdu i nie powoduje znaczącego ograniczenia pojemności trolejbusu. W tabeli 6 przedstawiono przykładowe trzy rozwiązania zasobników bateryjnych.

Zasadnicza różnica między wariantami 1 i 2 baterii Li-Ion wynika z różnej technologii wykonania poszczególnych ogniw. Ogniwa Kokam charakteryzują się większą zawartością litu niż ogniwa Thunder Sky, dzięki czemu mają znacznie lepsze parametry elektro-energetyczne, a przede wszystkim bardzo duży dopuszczalny prąd obciążenia. Właśnie wymagana maksymalna moc chwilowa – wynosząca 150 kW – jest zasadniczym czynnikiem narzucającym parametry baterii w analizowanych zastosowaniach. Zastosowanie ogniw Thunder Sky, ze względu na małą ich przeciężal-

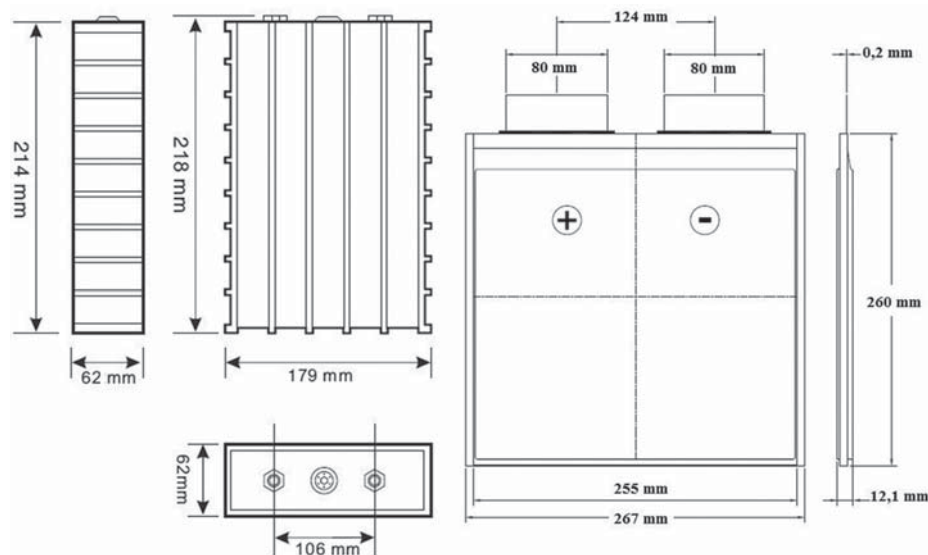
Tabela 6

Proponowane rozwiązania baterii trakcyjnych

	Rozwiązanie		
	Li-Ion 1	Li-Ion 2	NiCd
Producent ogniw	Kokam	Thunder Sky	SAFT
Typ ogniw	SLPB, 75 Ah	TS-LFP100AHA, 100 Ah	STH 800, 80 Ah
Liczba ogniw	120 (szeregowo)	240 (szeregowo – równoległe)	168
Napięcie znamionowe	444 V	384 V	201,6 V
Pojemność energetyczna	33,3 kWh	76,8 kWh	16,1 kWh
Maksymalna moc	200 kW	154 kW	80 kW
Masa ogniw	190 kg	840 kg	560 kg
Szacunkowa objętość ogniw	210 l	800 l	500 l
Przykładowe gabaryty baterii	2×1×0,4 m	1×0,7×0,3 m	1,2×0,9×0,7 m
Cena ogniw	130 tys. zł	140 tys. zł	80 tys. zł
Cena łączna wraz z układem sterowania i przetwornicą	210 tys. zł	220 tys. zł	160 tys. zł
Szacunkowa żywotność przy pracy w wariancie 1 (Al. Solidarności)	20 000 cykli	25 000–30 000 cykli	15 000 cykli (wariant 4, Os. Widok)



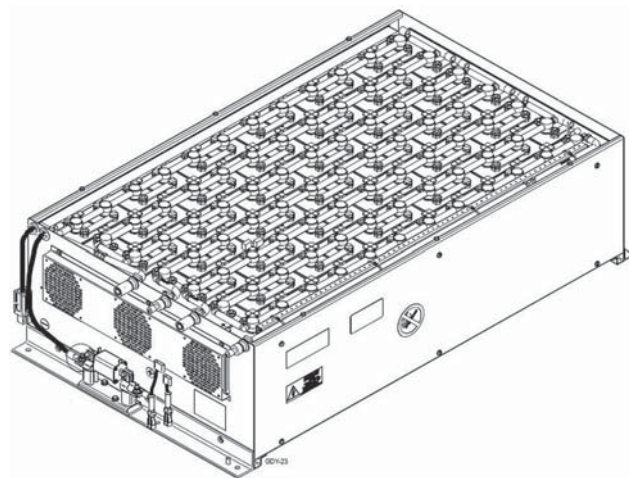
Rys. 6. Widok dwóch typów ogniw litowo-jonowych: Thunder-Sky (żółte ogniwa) i Kokam (srebrne ogniwo); pojemność ogniwa Kokam jest równa połowie pojemności ogniwa Thunder-Sky



Rys. 7. Porównawcze rysunki gabarytowe ogniw Li-Ion
a) Thunder Sky, b) Kokam

ność, wiąże się z koniecznością znacznego przewymiarowania systemu bateryjnego. Z drugiej strony takie przewymiarowanie skutecznie wpływa na żywotność baterii. Na rysunku 6 przedstawiono widok obydwu typów ogniw. Rozwiązanie Ni-Cd, możliwe do zastosowania w przypadku tras 3 i 4, jest identyczne z rozwiązaniem eksploatowanym w PKT Gdynia.

Na rysunku 8 pokazano jedną skrzynię bateriową, zawierającą 68 ogniw Ni-Cd STH 800 SAFT, o wymiarach 1,2×0,7×0,35 m. Trolejbusy Solaris Trollino 12/Medcom, eksploatowane w Gdyni, są wyposażone w dwie takie skrzynie.



Rys. 8. Skrzynia bateriowa zawierająca 68 ogniw STH 800 SAFT

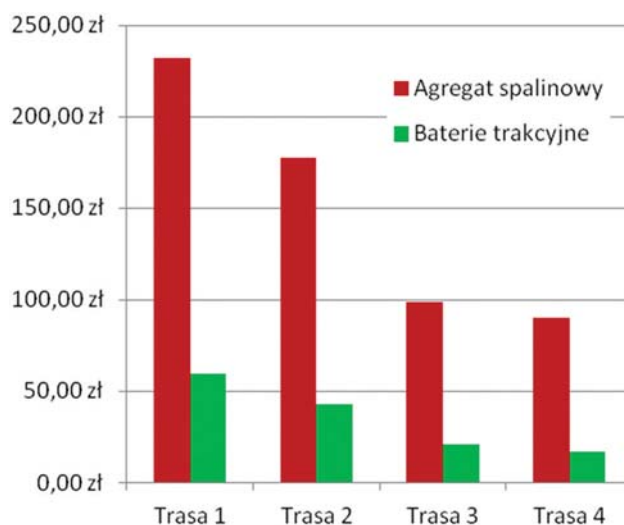
Obliczenia ekonomiczne i podsumowanie

Poddając analizie koszty energii potrzebnej do zasilania układu napędowego trolejbusu przy jeździe bez zasilania z sieci trakcyjnej na czterech wybranych trasach przyjęto naładowanie trolejbusu (średniobowe) na poziomie 50%. Kalkulując koszt energii elektrycznej (oleju napędowego w przypadku agregatu spalinowego) przyjęto uśrednioną cenę rynkową z sierpnia 2011 r. Przy wyliczeniu kosztów energii elektrycznej przyjęto 20% zwiększenie zużycia ze względu na potencjalne straty na przesyłce. W przypadku agregatu spalinowego przyjęto średnie spalanie oleju napędowego na poziomie 80 l/100 km. Wartość ta została skalkulowana na

podstawie doświadczeń eksploatacyjnych z miast Republiki Czeskiej (Opawa, Mariańskie łaźnie), gdzie średnie zużycia paliwa przez trolejbusy z pomocniczym silnikiem spalinowym wynosi 60 l/100 km. Mając na uwadze konieczność zastosowania silnika spalinowego, spełniającego normę Euro V, co jest równoważne ze zwiększeniem zużycia paliwa o 25%, do obliczeń przyjęto wartość 80 l/100 km. Koszt energii elektrycznej, niezbędnej na przejazd odcinka pozbawionego sieci trakcyjnej, waha się od 0,78 zł (1,55 zł w wariancie z postojem na pętli) w przypadku trasy 4, do 2,73 zł w przypadku trasy 1. Dzienny koszt eksploatacji trolejbusu, przy założeniu 11 cykli, wynosi odpowiednio 59,73 zł dla trasy nr 1, 42,90 zł – dla trasy nr 2, 12,76–21,12 zł – dla trasy nr 3 i 8,58–17,04 zł – dla trasy nr 4.

Odpowiednio koszty dziennie wykorzystania trolejbusu z agregatem spalinowym wynoszą 232,32 zł; 177,43 zł; 63,36–98,56 zł; 54,89–90,09 zł. Znacząca różnica w kosztach eksploatacyjnych między trolejbusem z bateriami trakcyjnymi a trolejbusem z agregatem spalinowym wynika z wysokich kosztów oleju napędowego, dużej masy agregatu i dużych wartości spalania w przeliczeniu na 100 km. Podsumowując warto podkreślić, że w przypadku wykorzystania trolejbusu z agregatem spalinowym istotny jest reżim pracy kierowców, ich wysoka kultura jazdy i niewykorzystywanie agregatów na odcinkach innych, niż pozbawione sieci trakcyjnej – wówczas koszty eksploatacyjne mogą odegrać znaczącą rolę w funkcjonowaniu przewoźnika.

W przeanalizowanych wariantach zastosowania różnych technologii zasilania pomocniczego (przy jeździe bez zasilania z sieci trakcyjnej) scharakteryzowano koszty implementacji rozwiązań oraz koszty późniejszej eksploatacji. Cena zakupu baterii trakcyjnych kształtuje się na poziomie od 160 do 220 tys. zł, przy czym wariant najtańszy (baterie Ni-Cd) nie kwalifikuje się do zastosowania w Lublinie ze względu na ograniczone możliwości zastosowania



Rys. 9. Porównanie kosztów dziennych wykorzystania trolejbusów z zasilaniem pomocniczym na analizowanych trasach bez sieci trakcyjnej

Tabela 7

Kalkulacja kosztów zastosowania i eksploatacji analizowanych rozwiązań w zakresie napędów pomocniczych

Proponowane rozwiązanie	Opis	Dzienne straty miejsc pasażerskich ze względu na masę napędu pomocniczego	Koszt implementacji	Koszty eksploatacyjne
Baterie litowo-jonowe (wariant 1)	Producent KOKAM Liczba ogniw 120 (szeregowo) Maksymalna moc 200 kW Masa 190 kg Szacunkowa żywotność przy pracy w wariantcie 1 (al. Solidarności) 17000 cykli	190 kg – 2,8 pas (31*)	210.000 zł (w tym ogniwa 130.000 zł)	Przy maksymalnym wykorzystaniu trolejbusu (11 cykli/dzień) wymiana ogniw baterii co 2,5 roku. Przy zmiennym wykorzystaniu trolejbusu (większa liczba trolejbusów z bateriami względem zadań przewozowych) proporcjonalnie. Baterie litowo-jonowe są całkowicie bezobsługowe więc nie pojawiają się bieżące koszty eksploatacyjne. Wariant maksymalny 130.000 zł co 2,5 roku
<i>Zakładając wariant 1 jako najbardziej odpowiedni do zastosowania w warunkach Lublina należy przyjąć założenia uśrednione na podstawie doświadczeń innych przewoźników eksploatujących trolejbusy z bateryjnym źródłem zasilania. Posiadając większą liczbę trolejbusów wyposażonych w baterie trakcyjne względem zaprojektowanych zadań przewozowych w rozkładzie jazdy można przyjąć 5-letni cykl wymiany ogniw bateryjnych ze względu na mniejszą pracę przewozową poszczególnych pojazdów. Wówczas koszty eksploatacyjne wynoszą średnio 130.000 zł co 5 lat dla poziomu cen z 2011 r. dla każdego trolejbusu. Przykładem potwierdzającym takie założenia są trolejbusy Solaris Trollino 18 wyposażone w baterie niklowo-wodorkowe, eksploatowane w Rzymie. Zaprojektowana żywotność okazała się być mniejsza względem stanu faktycznego.</i>				
Baterie litowo-jonowe (wariant 2)	Producent Thunder SKY Liczba ogniw 240 (szeregowo-równolegle) Maksymalna moc 154 kW Masa 840 kg Szacunkowa żywotność przy pracy w wariantcie 1 (al. Solidarności) 25000-30000 cykli	840 kg – 12,35 pas. (136*)	220.000 zł (w tym ogniwa 140.000 zł)	Przy maksymalnym wykorzystaniu trolejbusu (11 cykli/dzień) wymiana ogniw baterii co 3,5-3,7 roku. Przy zmiennym wykorzystaniu trolejbusu (większa liczba trolejbusów z bateriami względem zadań przewozowych) proporcjonalnie. Baterie litowo-jonowe są całkowicie bezobsługowe więc nie pojawiają się bieżące koszty eksploatacyjne. Wariant maksymalny 140.000 zł co 3,5-3,7 roku
Baterie niklowo-kadmowe	Producent SAFT Liczba ogniw 168 Maksymalna moc 80 kW Masa 560 kg Szacunkowa żywotność przy pracy w wariantcie 4 (os. Widok) 15000 cykli	560 kg – 8,24 pas. (91*)	160.000 zł (w tym ogniwa 80.000 zł)	Rozwiązanie kwalifikuje się wyłącznie do obsługi tras 3 i 4. Przy maksymalnym wykorzystaniu trolejbusu (11 cykli/dzień) wymiana ogniw baterii co 4-4,5 roku. Przy zmiennym wykorzystaniu trolejbusu (większa liczba trolejbusów z bateriami względem zadań przewozowych) proporcjonalnie. Baterie niklowo-kadmowe wymagają nieznacznej obsługi serwisowej polegającej na sprawdzaniu okresowym baterii oraz uzupełnianiu wody destylowanej w cyklu półrocznym. Koszt wymiany ogniwa 80.000 zł co 4-4,5 roku
Agregat spalinowy 150 kW	Producent Kirsch Maksymalna moc 150 kW Masa 1500 kg	1500 kg – 22,06 pas. (243*)	250.000 zł	Przy maksymalnym wykorzystaniu trolejbusu (11 cykli/dzień) remont kapitalny agregatu spalinowego należy przewidzieć co 5-6 lat. W przypadku eksploatacji agregatu spalinowego pojawiają się bieżące koszty eksploatacyjne porównywalne z kosztami obsługi silnika spalinowego autobusu miejskiego dotyczące serwisowania oraz wymiany elementów zużytych i zużywalnych, takich jak olej silnikowy, filtry itp. W przypadku agregatu o mniejszej emisji spalin do atmosfery (silniki EEV i nowsze) mogą pojawić się koszty dodatkowe związane z plynami eksploatacyjnymi (AdBlue itp.) Wariant maksymalny 100.000-150.000 zł co 5 lat

* Liczba pasażerów przy założeniu maksymalnego zapelnienia w 11 kursach/dzień.

wania (tylko trasa nr 3 i 4). W łącznej cenie przedstawiono koszty samych ogniw, co jest istotne z punktu widzenia użytkownika ze względu na ograniczoną żywotność baterii i późniejsze koszty wymiany ich na nowe. Przedstawione warianty są skalkulowane dla cen obowiązujących w 2011 r., a należy jednoznacznie podkreślić, że technologia baterii rozwija się dynamicznie i wraz z pojawieniem się nowych rozwiązań oraz producentów ceny systematycznie ulegają obniżeniu, co jest zauważalne od kilku lat. Jako alternatywę dla baterii trakcyjnych przeanalizowano zastosowanie agregatu spalinowego, a więc przedstawiono koszty zakupu i eksploatacji także dla tego wariantu. Podobnie, jak w przypadku baterii, agregat spalinowy ulega zużyciu i wymaga po kilku latach eksploatacji napraw głównych. Przedstawiona cena przeprowadzenia takich czynności oparta jest na doświadczeniach przewoźników czeskich, eksploatujących trolejbusy z takim rozwiązaniem. Koszt zakupu agregatu znacząco przewyższa koszt baterii trakcyjnych. Istotną kwestią jest także masa jednostkowa proponowanych rozwiązań. Negatywnie w analizie pod kątem masy wypadła agregat spalinowy, który ma masę ok. 1,5 tys. kg, co odpowiada utracie ok. 22 miejsc pasażerskich. Zwrócić uwagę należy, że w każdym kursie, w każdym miejscu eksploatacji jest to martwa masa pojazdu, zwiększająca koszty eksploatacyjne. W przypadku baterii trakcyjnych w technologii li-ion masa jest znacząco mniejsza, co odpowiada w wariantcie 1 baterii – utracie 2,8 miejsc pasażerskich, w wariantcie 2 – utracie 12,35 miejsc pasażerskich.

Trolejbus pozostaje bez wątpienia jednym z najbardziej ekologicznych pojazdów w komunikacji miejskiej. Jego ważną zaletą jest nieemisyjność w miejscu eksploatacji. Do niedawna jedną z głównych wad, a może nawet jedyną istotną było uwiązanie trolejbusu z siecią trakcyjną poprzez odbieraki prądu. Co prawda, w odróżnieniu od tramwaju, trolejbus miał możliwość omijania przeszkody na jezdni, ale jego przywiązanie do sieci trakcyjnej było znamienne w sytuacji zaniku zasilania, zerwania przewodów trakcji, planowej przebudowy ulicy lub czasowego wyłączenia jezdni z eksploatacji w takich sytuacjach jak przemarsze, festyny itp. Obecny rozwój innowacyjnych technologii wzmacnia pozycję trolejbusu i daje szansę jego częściowego uniezależnienia od sieci trakcyjnej. Dzięki alternatywnym źródłom zasilania trolejbusy mogą omijać nawet kilkukilometrowe fragmenty sieci trakcyjnej. Organizatorzy eksploatujący komunikację trolejbusową ograniczają koszty przez brak konieczności utrzymywania rezerwy autobusowej na wypadek wyłączenia trolejbusów z ruchu. Komunikacja trolejbusowa staje się elastyczna w stopniu coraz bardziej porównywalnym do autobusów. Rosnące ceny paliw i rozwój wymagań technologicznych w stosunku do silników spalinowych (normy emisji spalin) generują większe koszty eks-

ploatacji i zakupu autobusów, przez co dotychczas drogi w zakupie, a tańszy w eksploatacji trolejbus staje się realną alternatywą. □

Literatura:

- [1] Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Trakční baterie v trolejbusích jako alternativní zdroj napájení*. VL. Sešit katedry elektrotechniky, s. 35–37.
- [2] Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Provozní zkušenosti trolejbusových pohonů napájených pomocí akumulátorů*. [w:] Bartłomiejczyk M., Hamaček Š.: *Workshop na podporu sítí*, VSB Ostrava, 2013, s. 26–30.
- [3] Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Dwa lata doświadczeń w eksploatacji trolejbusów z baterijnym źródłem zasilania w Gdyni*. *Pojazdy Szynowe* 3/2011, s. 68–71.
- [4] Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Trolejbusy z baterijnym źródłem zasilania – doświadczenia eksploatacyjne i koncepcja liniowego zastosowania w Gdyni*. *Technika Transportu Szynowego* 5-6/2011, s. 76–80.
- [5] Połom M., Bartłomiejczyk M.: *Alternatywne źródła zasilania w trolejbusach – przegląd rozwiązań stosowanych w miastach europejskich*. *Transport Miejski i Regionalny* 7-8/2011, s. 16–20.
- [6] Połom M., Palmowski T.: *Rozwój i funkcjonowanie komunikacji trolejbusowej w Gdyni*. Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin, ss. 152.
- [7] Połom M., Tarnawski R.: *Wsparcie modernizacji i rozwoju komunikacji miejskiej w Lublinie z funduszy strukturalnych*. *Transport Miejski i Regionalny* 10/2011, s. 35–41.
- [8] Połom M., Turzański B.: *Doświadczenia Solaris Bus&Coach w produkcji trolejbusów*. *Technika Transportu Szynowego* 4/2011, s. 42–49.

dr inż. Mikołaj Bartłomiejczyk
Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu
Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska
mbartlom@ely.pg.gda.pl

mgr Marcin Połom
Katedra Geografii Rozwoju Regionalnego, Instytut Geografii,
Wydział Oceanografii i Geografii, Uniwersytet Gdański
geompo@univ.gda.pl