

Marcin Połom¹Mikołaj Bartłomiejczyk²

ALTERNATYWNE ŹRÓDŁA ZASILANIA W TROLEJBUSACH – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ STOSOWANYCH W MIASTACH EUROPEJSKICH

Trolejbus jest jednym z bardziej ekologicznych pojazdów w komunikacji miejskiej. Jego ważną zaletą jest nieemisyjność w miejscu eksploatacji. Do niedawna jedną z głównych wad było połączenie trolejbusu z siecią trakcyjną poprzez odbieraki prądu. Obecny rozwój innowacyjnych technologii wzmacnia pozycję trolejbusu i daje szansę jego częściowego uniezależnienia od sieci trakcyjnej. Dzięki alternatywnym źródłom zasilania (agregaty spalinowe, baterie trakcyjne, superkondensatory) trolejbusy mogą omijać nawet kilkukilometrowe fragmenty sieci trakcyjnej. W artykule dokonano przeglądu stosowanych rozwiązań na rynku europejskim.

Wprowadzenie

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 tak elastyczny w stosunku do sytuacji drogowych jak autobus. W celu uruchomienia komunikacji trolejbusowej należy dobudować do istniejącej infrastruktury drogowej napowietrzną trację elektryczną wraz z układem zasilania. Nie ma potrzeby budowy wydzielonych pasów ruchu jak w przypadku torów tramwajowych.

Trolejbusy w budowie są podobne do autobusów, lecz różni je rodzaj napędu i związanie pojazdów z siecią trakcyjną przez pantografy umieszczone na dachu. Odbieraki prądu umożliwiają odchylenie się trolejbusu od osi zawieszenia sieci jezdnej w zakresie +/- 4,5 m, co pozwala wymijać wszelkie przeszkody na jezdni o szerokości 9 metrów [1]. Klasyczny wzorzec komunikacji trolejbusowej

to pojazdy poruszające się wyłącznie po ulicach wyposażonych w napowietrzną sieć trakcyjną bez możliwości uniezależnienia pojazdu od źródła zasilania.

Zarys idei wprowadzenia alternatywnego źródła zasilania w napędach trolejbusów

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, montaż akumulatorów o dużej pojemności energetycznej lub zasobników superkondensatorowych. Przesłanką kierującą uwagę przewoźników na poprawę warunków eksploatacyjnych były przede wszystkim wysokie koszty utrzymywania rezerwy autobusów na ewentualność zaniku zasilania w sieci trakcyjnej, poważnego zerwania przewodów jezdnych lub długotrwały remont, przebudowę ulicy. Trolejbusy pozostające w zajezdni nie zarabiały na swoje utrzymanie, a autobusy kursujące na liniach trolejbusowych generowały większe koszty, co powodowało, że komunikacja trolejbusowa negatywnie wypadła w bilansie ekonomicznym.

Przeгляд rozwiązań stosowanych w trolejbusach

W latach 80. XX w. pojawiły się w eksploatacji liniowej pierwsze trolejbusy z alternatywnymi źródłami zasilania, były to pojazdy wyposażone w agregaty spalinowe oraz próby wykorzystania baterii trakcyjnych. Na szerszą skalę alternatywne źródła zasilania zadomowiły się w komunikacji trolejbusowej na początku XXI wieku. Poza miastami Europy Zachodniej, w szczególności w Szwajcarii i Włoszech, wprowadzono do produkcji seryjnej środkowo-europejski trolejbus niskopodłogowy – Škoda 21TrACI [2] (fot. 1.).

Pojazd ten został wyposażony w wysokoprężny silnik diesla o mocy 100kW, który stanowił prądnicę do zasilania elektrycznego układu napędowego trolejbusu. Pierwszym,

¹ Mgr, Instytut Geografii, Wydział Oceanografii i Geografii, Uniwersytet Gdański, geompo@univ.gda.pl

² Mgr inż., Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, mbartlom@ely.pg.gda.pl

liniowym zastosowaniem tego trolejbusu była linia nr 1 w czeskim mieście Hradec Králové, gdzie końcowy odcinek pojazd wykonywał po ulicy niewyposażonej w sieć trakcyjną. Fabrycznie nowy trolejbus zastąpił prowizoryczne rozwiązanie stosowane przez kilka lat w postaci wysokopodłogowej Škody 14Tr wyposażonej w przyczepę z agregatem spalinowym. Trolejbusy Škoda 21TrACI dostarczone zostały jeszcze do Pilzna (fot. 2). Podobne rozwiązania stosują obecnie wszyscy producenci trolejbusów niskopodłogowych w Unii Europejskiej oraz Szwajcarii. Swoje pojazdy, na życzenie klienta, wyposażają w agregaty spalinowe tacy producenci jak: Solaris, Škoda, Viseon, HESS, Van Hool (fot. 3 i 4).

Są to zestawy o różnej mocy, od 50kW do 250kW, a zatem i zróżnicowanej masie własnej, która znacząco wpływa na pojemność trolejbusów. Zaletą agregatu spalinowego jest jego nieograniczony zasięg – trolejbus może być eksploatowany na takim dystansie, na jaki pozwala pojemność zbiornika paliwa. Wadą tego rozwiązania jest znaczne zużycie paliwa. Doświadczenia z miast, eksploatujących w ruchu ciągłym trolejbusy wyposażone w tego typu alternatywne źródło zasilania, wykazują znacząco wyższe zużycie paliwa niż w przypadku klasycznych autobusów spalinowych. Ponadto agregat spalinowy jest emisyjny i wówczas trudno podtrzymać argument o proekologiczności komunikacji trolejbusowej.

Agregat spalinowy to pierwsza i zarazem najpopularniejsza grupa spośród rozwiązań dywersyfikujących źródło zasilania. Popularność tego rozwiązania spowodowana jest przede wszystkim łatwością implementacji w trolejbusie (producent modułu dostarcza kompletny, zmontowany zestaw do zabudowania w pojeździe) oraz dostępnością technologii. Do drugiej grupy alternatywnych źródeł zasilania należy zaliczyć baterie trakcyjne. To rozwiązanie jest dotychczas mniej popularne i rzadziej stosowane w regularnej eksploatacji. Powodu takiej sytuacji należy upatrywać przede wszystkim w niedorozwoju technologii oraz w wysokich kosztach zakupu (argument podnoszony do niedawna). W ostatnich dwóch latach zainteresowanie bateriami trakcyjnymi jednak zdecydowanie wzrosło przede wszystkim za sprawą rozwoju nowoczesnych technologii, wprowadzeniu wielu rozwiązań do seryjnej produkcji oraz zmniejszeniu cen.

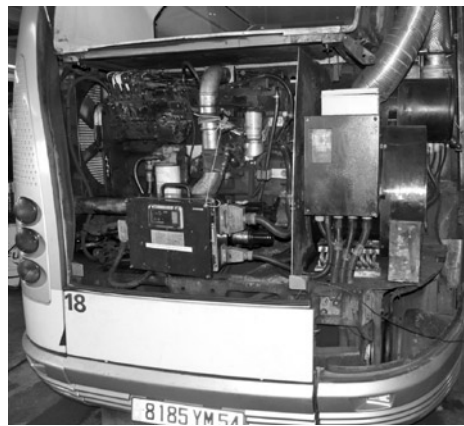
Baterie trakcyjne dostępne są w różnych technologiach i zazwyczaj dedykowane każdemu przedsiębiorstwu indywidualnie. W regularnej eksploatacji pozostają w Europie akumulatory ołowiowe, niklowo-wodorkowe, niklowo-kadmowe (fot. 5), a w ostatnich miesiącach rozważa się wprowadzenie do eksploatacji bardzo lekkich litowo-jonowych. Określając zalety baterii, należy jednoznacznie wyznaczyć ich nieemisyjność w odróżnieniu od agregatów spalinowych. Trolejbus korzystający z zasilania bateryjnego pozostaje nadal pojazdem w stu procentach elektrycznym, co jest szczególnie ważne dla przedsiębiorstw eksploatujących łącznie pojazdy korzystające z energii elektrycznej. W przypadku agregatów spalinowych jest uciążliwe w zajęciach niedostosowanych do obsługi pojazdów spalinowych. W przypadku akumulatorów ten aspekt nie występuje, ale i bardziej odczuwalną ich wadą jest ograniczony zasięg.



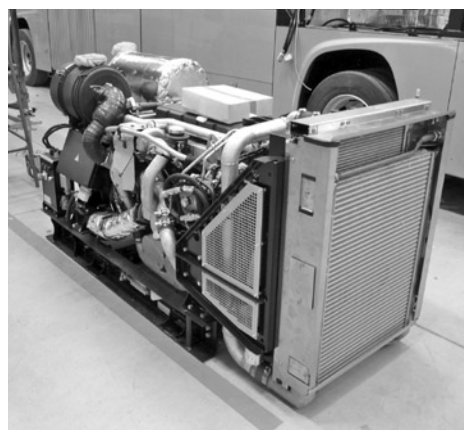
Fot. 1. Škoda 21TrACI w Pilźnie w trakcie przejazdu przy zasilaniu z agregatu spalinowego, fot. Mikołaj Bartłomiejczyk



Fot. 2. Agregat spalinowy diesla zamontowany w trolejbusie Škoda 24Tr w przedsiębiorstwie trolejbusowym Zlín-Otrokovice, fot. Mikołaj Bartłomiejczyk



Fot. 3. Agregat spalinowy diesla zamontowany w pojeździe TVR (trolejbus naprowadzany szyną w jezdni), Nancy, fot. Marcin Połom



Fot. 4. Agregat spalinowy przygotowany do zamontowania w przegubowym trolejbusie Breda MenariniBus dla Rzymu przez firmę Škoda Electric, fot. Marcin Połom



Fot. 5. Dwa moduły baterii niklowo-kadmowych zabudowanych w trolejbusie Solaris Trollino 12M w Gdyni, fot. Mikołaj Bartłomiejczyk

Przy zasilaniu z baterii trakcyjnych długość odcinka, jaki może przejechać trolejbus, jest uzależniony od ich pojemności. Pojemność akumulatorów przekłada się na ich masę, a ta przy wielkości porównywalnej z masą agregatu spalinowego o mocy 100kW pozwala na przejazd od 3 do 7 km w zależności od zastosowanej technologii. W przypadku eksploatacji baterii w ruchu awaryjnym (na okoliczność czasowego zamknięcia krótkiego odcinka trasy) lub liniowo przy obsłudze krótkiego odcinka np. wybiegowego, obecnie dostępną pojemność baterii należy uznać za wystarczającą. Zważywszy, że bateria to źródło zasilania „odnawialne” – może zostać doładowana z sieci trakcyjnej przy normalnej pracy trolejbusu, to jej wada w zakresie zasięgu eksploatacji jest pomniejszona względem agregatu spalinowego. Poza aspektem pojemności akumulatorów i ich masy ważna jest także żywotność takiego źródła zasilania. W zależności od wykorzystanej technologii oraz pracy baterii (stopnia ich rozładowania) można oszacować ich żywotność. Z punktu widzenia przewoźnika istotne jest, aby fabrycznie implementowane rozwiązanie posłużyło jak najdłużej.

Ostatnią grupę rozwiązań stanowią superkondensatorowe zasobniki energii, najmniej popularne, ale zarazem najkrócej stosowane. Ze względu na innowacyjność technologii oraz jej stosunkowo najmniejszą dostępność w porównaniu do omówionych powyżej, doświadczeń ze stosowania tego typu rozwiązania jest najmniej. Obecnie stosowane superkondensatory w stosunku do baterii trakcyjnych posiadają znacznie mniejszą pojemność energetyczną, jednak poza aspektem funkcjonowania jako alternatywne źródło zasilania realnie wpływają na oszczędność zużycia energii elektrycznej przez trolejbus. Dzięki możliwości szybkiego rozładowania i doładowania są wykorzystywane w bieżącym cyklu eksploatacyjnym i umożliwiają prawienie własności trakcyjnych np. w przypadku adków napięcia w sieci trakcyjnej. Szybkość ich doładowania ma znaczenie w przypadku rekuperacyjnego (odcynowego) hamowania pojazdu i braku odbiornika energii tym samym odcinku zasilania. Wówczas, zamiast wycoać energię z hamowania na rezystorze, trolejbus kuluje energię w superkondensatorach. Tego typu rozwiązanie na pewno należy do tych, które w przyszłości

będą rozwijane, seryjnie stosowane i wzmocnią konkurencyjność pojazdów korzystających z energii elektrycznej. Obecnie obserwuje się próbę połączenia superkondensatorów z bateriami trakcyjnymi (np. Ostrawa, Tallin) lub agregatem spalinowym (Eberswalde, Parma, Mediolan) w jednym układzie napędowym. Nerozstrzygnięta pozostaje kwestia, czy zasobniki superkondensatorowe będą bardziej efektywne przy zamontowaniu po stronie układu zasilania (podstacja zasilająca), czy na odbiorniku energii (trolejbus).

Doświadczenia eksploatacyjne z miast europejskich

Spośród 155 sieci trolejbusowych zlokalizowanych w Europie (z wyłączeniem Federacji Rosyjskiej), 53 posiadają doświadczenia w zakresie wykorzystania alternatywnych źródeł zasilania, w ruchu awaryjnym lub regularnym (fot. 6,7,8,9,10). Najwięcej systemów komunikacji trolejbusowej, eksploatujących trolejbusy wyposażone w dodatkowe źródło zasilania funkcjonuje w Szwajcarii – 13 miast, we Włoszech – 9 miast oraz w Czechach – 6 miast (tab. 1 i 2). Dominującym rozwiązaniem stosowanym obecnie w komunikacji trolejbusowej jest agregat spalinowy, wykorzystywany przez 46 miast. Mniejsze doświadczenia, przede wszystkim ze względu na ograniczoną dostępność rozwiązania w przeszłości, dotyczą baterii trakcyjnych (7 miast) i superkondensatorowych zasobników energii (5 miast).



Fot. 6. Specjalne „daszki” do automatycznego kotwienia odbieraków prądu do przewodów sieci trakcyjnej, Castellon, fot. Marcin Potom

Wiodący producenci taboru trolejbusowego w Europie oferują pojazdy wyposażone w agregaty spalinowe lub superkondensatory. Baterie trakcyjne ze względu na dedykowane, indywidualne rozwiązania są oferowane przez nieznaczne firmy produkujące tabor trolejbusowy. Obecnie układy baterii trakcyjnych implementowane są w układach napędowych trolejbusów marki Solaris (Polska) lub Škoda (Czechy). Wśród trolejbusów eksploatowanych w Europie wyróżnić można pojazdy posiadające układy zbudowane na wzór baterii ołowiowych, niklowo-wodorkowych lub niklowo-kadmowych. W planach pozostaje wykorzystanie baterii litowo-jonowych charakteryzujących się niewielką masą i dużą pojemnością energetyczną, dotychczas eksploatowanych wyłącznie w samochodach osobowych.

Przykładowe zastosowanie zasilania pomocniczego w trolejbusach w ruchu regularnym		
Kraj	Miasto	Przykładowe zastosowanie zasilania pomocniczego w ruchu regularnym
Czechy	Hradec Králové	Wykorzystanie trolejbusu z napędem diesla przy obsłudze linii trolejbusowej nr 1 z Dworca Głównego do Kluk, gdzie ostatni odcinek trasy trolejbus pokonuje przy zasilaniu z agregatu spalinowego.
	Mariánské Lázně	Trolejbus z bateriami trakcyjnymi nie jest wykorzystywany w ruchu regularnym, trolejbusy przy zasilaniu z agregatu spalinowego eksploatowane są na liniach 6 i 7, na których pokonują niedługie odcinki pozbawione sieci trakcyjnej.
	Opava	Zasilanie z agregatu spalinowego wykorzystywane w kursach linii 221, na odcinku Bílovecká–Kýlešovice Škola oraz od przystanku Divadlo, przez Vrchní do przystanku Ratibořská.
	Pizeň	Trolejbusy przy zasilaniu z agregatu spalinowego eksploatowane są na wybiegowych odcinkach linii 12 i 13 pozbawionych sieci trakcyjnej.
Hiszpania	Castellon	W 2008 r. uruchomiono nową krótką sieć trolejbusową, która od 2010 r. jest rozbudowywana. Obsługę stanowią trolejbusy wyposażone w agregaty spalinowe, które na jednym z końców obecnie przedłużanej trasy zawierają przy wykorzystaniu napędu pomocniczego.
Słowacja	Bratysława	Na linii nr 33 trolejbusy przegubowe kursują na zasilaniu trakcyjnym, lecz w każdym kursie dojazdowym i zjazdowym do zajezdni używają zasilania z agregatu spalinowego, ze względu na brak połączenia sieci trakcyjnej linii 33 z pozostałym układem trakcji.
Szwecja	Landskrona	W niewielkiej sieci trolejbusowej eksploatowane są 4 trolejbusy, które łączą centrum z nową stacją kolejową. W każdym kursie dojazdowym i zjazdowym do zajezdni używają napędu alternatywnego. W przypadku trzech pierwszych trolejbusów są to baterie trakcyjne, w czwartym trolejbusie agregat spalinowy.
Węgry	Debreczyn	Na linii oznaczonej jako 3E trolejbusy wykorzystują zasilanie z agregatu spalinowego w każdym kursie.
Włochy	Rzym	Na linii nr 90 obsługiwanej trolejbusami Ganz Solaris Trollino 18, w każdym kursie, przy przejeździe przez zabytkową część miasta, trolejbusy zasilane są z układu baterii trakcyjnych.

Źródło: opracowanie własne.



Fot. 7. Trolejbus Irisbus Cristalis zawracający przy zasilaniu z agregatu spalinowego, Castellon, fot. Mikołaj Bartłomiejczyk



Fot. 9. Škoda 24Tr eksploatowana w ruchu liniowym w czeskich Mariańskich Łaźniach, fot. Mikołaj Bartłomiejczyk



8. Solaris Trollino 12D eksploatowany w ruchu liniowym w węgierskim Debreczynie, Mikołaj Bartłomiejczyk



Fot. 10. Trolejbus HESS eksploatowany w ruchu liniowym w szwajcarskim Fribourgu, fot. Mikołaj Bartłomiejczyk

Systemy komunikacji trolejbusowej w Europie wykorzystujące alternatywne źródła zasilania w trolejbusach (stan marzec 2011)							
Numer sieci	Kraj	Miasto	Baterie trakcyjne	Superkondensatory	Agregat spalinowy	Uwagi	
1.	Austria	Linz			X		
2.		Salzburg			X		
3.	Bulgaria	Sofia			X		
4.	Czechy	Hradec Králové			X		
5.		Mariánské Lázně	X		X	Zestaw baterii trakcyjnych niklovo-kadmowych zamontowanych w prototypowym trolejbusie Škoda 24Tr nr tab. 51. Pozostałe trolejbusy posiadają agregat spalinowy.	
6.		Opava			X		
7.		Ostrava		X	X	Próbnе wykorzystanie superkondensatorów, następnie zamontowanych na trolejbusie Solaris Trollino 18AC w Tallinie.	
8.		Piżeń			X		
9.	Zlin				X		
10.	Estonia	Tallin		X		Próbnе wykorzystanie superkondensatorów na trolejbusie Solaris Trollino 18AC. Dodane przez producenta napędu – firmę Cegelec na okres próbnы. Niewykorzystywane w ruchu liniowym.	
11.	Grecja	Ateny			X		
12.	Holandia	Arnhem			X		
13.	Francja	Limoges			X		
14.		Lyon			X		
15.		Nancy			X		
16.		St. Etienne			X		
17.	Hiszpania	Castellon			X		
18.	Litwa	Kowno		X		Próbnы montaż superkondensatorów na trolejbusie PNTKM/Jelcz M121MTE oraz regularne wykorzystanie superkondensatorów w dwóch zmodernizowanych trolejbusach Škoda 14Tr.	
19.	Łotwa	Ryga			X	Škoda 24Tr – 90 sztuk wyposażonych w agregaty spalinowe (ze 150 posiadanych).	
20.	Niemcy	Eberswalde		X	X	Superkondensatory i agregat spalinowy w ramach jednego układu napędowego trolejbusów Solaris Trollino 18AC.	
21.		Esslingen			X		
22.		Solingen			X		
23.	Norwegia	Bergen			X		
24.	Polska	Gdynia	X			Dwa rodzaje układów jazdy pomocniczej opartych na zestawach baterii niklovo-kadmowych różnych pojemności w trolejbusach Solaris Trollino 12M i Mercedes-Benz O405N2AC.	
25.	Portugalia	Coimbra			X		
26.	Rumunia	Timișoara			X		
27.	Słowacja	Bratysława			X		
28.	Szwajcaria	Bern			X		
29.		Biel			X		
30.		Fribourg			X		
31.		Genève			X		
32.		La Chaux-de-Fonds	X				Zestawy baterii ołowiovych wykorzystywanych w ruchu awaryjnym.
33.		Lausanne			X		
34.		Luzern			X		
35.		Montreux-Vevey			X		
36.		Neuchatel			X		
37.		Schaffhausen			X		
38.		St. Gallen			X		
39.		Winthertur			X		
40.	Zürich			X			
41.	Szwecja	Landskrona	X		X	Zestawy baterii niklovo-wodorkowych wykorzystywane w dojazdach do/z zajezdni zamontowane w 3 trolejbusach Ganz Solaris Trollino 12D, w 4. trolejbusie Solaris Trollino 12 – agregat spalinowy .	
42.	Węgry	Budapeszt	X			Zestawy baterii niklovo-wodorkowych wykorzystywanych w ruchu awaryjnym.	
43.		Debreczyn			X		
44.		Szeged	X			Plan wykorzystania baterii trakcyjnych litowo-polimerowych o pojemności umożliwiającej przejazd bez ładowania do kilkunastu kilometrów.	
45.	Włochy	Bolonia			X		
46.		Genua			X		
47.		Lecce			X		
48.		Mediolan		X	X	Superkondensatory i agregat spalinowy w ramach jednego układu napędowego trolejbusów.	
49.		Modena			X		
50.		Neapol			X		
51.		Parma			X		
52.		Rzym	X				Zestawy baterii niklovo-wodorkowych wykorzystywanych w 30 trolejbusach Ganz Solaris Trollino 18, w ruchu liniowym, w każdym kursie linii 90.
53.	San Remo				X		