



Fot. 1. Trolejbus Solaris Trollino 12 nr 3092 obsługuje linię autobusową 172 w Gdyni. Fot. K. Grzonka

Mikołaj Bartłomiejczyk

Praktyczna aplikacja *In Motion Charging* w Gdyni: trolejbusy w obsłudze linii autobusowych

Ładowanie nocne (*OverNight Charging*) oraz szybkie ładowanie (*Opportunity Charging*) to obecnie 2 najbardziej popularne systemy ładowania autobusów elektrycznych. Pomimo uruchomienia wielu próbnych instalacji żaden z tych 2 systemów nie zyskał jednoznacznej aprobaty użytkowników. Alternatywą jest ładowanie pojazdów w ruchu (tzw. *In Motion Charging*), które stanowi połączenie zalet komunikacji trolejbusowej oraz autobusu elektrycznego: głównym źródłem zasilania są baterie trakcyjne, ale – co jest kluczowe – ładowanie odbywa się w ruchu bez konieczności zatrzymywania pojazdu.

Słowa kluczowe: autobus elektryczny, trolejbus, baterie trakcyjne.

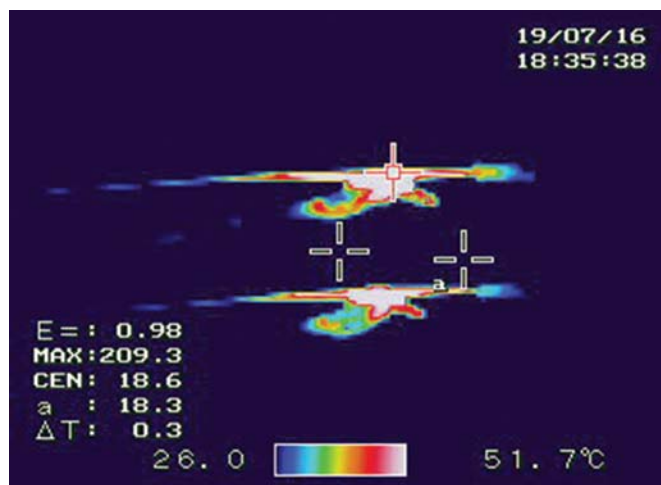
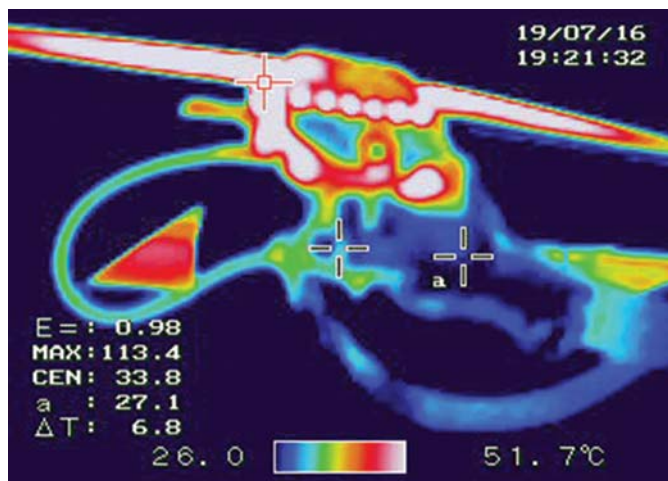
Wstęp

Pomimo ciągłego rozwoju technologii baterii elektrochemicznych i mnogości oferowanych autobusów elektrycznych nadal nie jest możliwa eksploatacja autobusów elektrycznych w komunikacji miejskiej bez konieczności doładowywania w ciągu dnia. Stwarza to konieczność budowy stacji ładowania punktowego stykowego lub indukcyjnego na pętach końcowych. Wymaga to znacznych nakładów finansowych związanych z budową stacji ładowania, wiąże się z koniecznością wydłużenia postojów na pętach końcowych, a także przysparza problemów w przypadku zmian trasy [1, 3, 4, 10]. Alternatywnym rozwiązaniem jest tzw. *In Motion Charging* (IMC), zwane również systemem *Slide-In*. Polega ono na wykorzystaniu infrastruktury umożliwiającej ładowanie pojazdów

w trakcie ruchu; najczęściej jest to napowietrzna sieć trakcyjna. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie trolejbusowej sieci trakcyjnej (rys. 1) [6], co czyni system IMC szczególnie atrakcyjnym dla miast eksploatujących komunikację trolejbusową. W przypadku miast eksploatujących system tramwajowy istnieje możliwość wykorzystania elementów infrastruktury tramwajowej przy budowie sieci trakcyjnej dla systemu IMC. Rozwój trolejbu-



Rys. 1. Idea systemu *In Motion Charging* (IMC) [© Vossloh Kiepe]



Fot. 2. Obrazy wykonane kamerą termowizyjną podczas stacjonarnej próby obciążeniowej odbieraków, wykonanej w PKT Gdynia. Przy prądzie obciążenia 210 A fragmenty odbieraka osiągają temperaturę ponad 200°C

sów z pomocniczym zasilaniem baterijnym stworzył podstawy dla praktycznej aplikacji systemu IMC [9]. Prototypowa linia oparta o IMC w ramach istniejącej sieci trolejbusowej funkcjonuje w Landskronie (Szwecja) [2]. W Szwecji zbudowano również prototypowy fragment autostrady wyposażonej w sieć trakcyjną, na której będą testowane elektryczne ciężarowe samochody elektryczne ładowane w systemie IMC.

W systemie IMC część trasy linii komunikacyjnej jest pokryta siecią trakcyjną służącą do ładowania baterii trakcyjnych. Pozostałą część, pozbawioną sieci trakcyjnej, pojazdy pokonują przy użyciu zasilania baterijnego. Z eksploatacyjnego punktu widzenia długość odcinka „sieciovego” musi być wystarczająca dla naładowania baterii trakcyjnych. Ponadto powinien mieć on jak największą długość, ponieważ pokrycie fragmentu odcinka siecią trakcyjną zmniejsza wymagany dystans jazdy bateryjnej i tym sposobem zmniejszeniu uleg mogą wymiary baterii trakcyjnych. Jednak budowa sieci trakcyjnej wiąże się ze znaczącymi nakładami finansowymi, dlatego z ekonomicznego punktu widzenia oczekiwane jest ograniczenie jej długości. Z tego powodu przy projektowaniu systemów autobusów elektrycznych IMC istotne staje się wyznaczenie wymagań dla minimalnej długości sieci trakcyjnej.

Ograniczenia szybkości ładowania w systemie IMC

Długość odcinka pokrytego siecią trakcyjną musi być wystarczająca, aby naładować baterie trakcyjne energią co najmniej równą energii niezbędnej do pokonania odcinka bezsieciovego. Stąd oczekiwane jest maksymalne skrócenie czasu ładowania baterii, a co za tym idzie – maksymalne zwiększenie szybkości ładowania, zależnej od mocy ładowania. Do niedawna główne ograniczenia wynikały z własności samych baterii. Tzw. „klasyczne” technologie bateryjne (jak np. NiCd lub NiMH) pozwalają na ładowanie prądem 1 C [5, 9]. W przypadku stosowanych w autobusach elektrycznych baterii o pojemności 20–40 kWh oznacza to maksymalną moc ładowania na poziomie 20–40 kW. Po zastosowaniu technologii litowo-jonowej pojemność baterii trakcyjnej wzrosła do 80–100 kWh, co umożliwia ładowanie mocą rzędu 80–100 kW przy prądzie 1 C. Współczesne technologie bateryjne (np. litowo-tytanowa) umożliwiają zwiększenie prądu ładowania o nawet 5 C, co oznacza moc ładowania 500 kW przy pojemności baterii 100 kWh. Co więcej, należy oczekiwać dalszego rozwoju technologii bateryjnych i dalszego wzrostu mocy ładowania,

więc właściwości ogniwi elektrochemicznych przestają odgrywać rolę limitującą w systemach IMC.

Czynnikiem limitującym szybkość ładowania w systemach IMC jest obecnie wytrzymałość prądowa odbieraków trolejbusowych. Odbieraki trolejbusowe cechują się maksymalnym dopuszczalnym prądem obciążenia rzędu 600 A [8]. Uwzględniając pobór prądu pobierany na cele ładowania baterii nie powinien być większy niż 200 A, aby nie spowodować przeciążenia odbieraków. Jeszcze większe ograniczenie prądu ładowania występuje podczas postoju, gdy utrudnione są warunki chłodzenia i łatwo może dojść do przegrzania miejsca styku w odbieraku. Prąd ładowania baterii w trakcie postoju powinien więc być nie większy niż 100–150 A. Z uwagi na obciążalność prądową odbieraków moc ładowania baterii trakcyjnych powinna być zatem nie większa niż 120 kW w ruchu oraz 90 kW podczas postoju.

Teoretyczny szacunek dystansu i czasu ładowania baterii trakcyjnych

W systemie IMC źródłem energii dla przejazdu odcinkiem pozbawionym sieci trakcyjnej jest energia zgromadzona w bateriach trakcyjnych w trakcie przejazdu odcinkiem z siecią trakcyjną. Można to zapisać zależnością:

$$E_{ch} \cdot \eta = E_{dch} \quad (1)$$

gdzie: E_{ch} – energia przekazana z sieci trakcyjnej do baterii podczas ładowania, E_{dch} – energia pobrana z baterii podczas pokonywania odcinka bez sieci trakcyjnej, η – sprawność cyklu ładowania. Przyjmując t_{ch} jako czas przejazdu odcinkiem z siecią trakcyjną, P_{ch} – moc ładowania z sieci trakcyjnej, e – średnie zużycie energii przez pojazd, l – całkowita długość linii, l' – długość przejazdu pod siecią trakcyjną, wzór (1) można przedstawić jako:

$$P_{ch} \cdot t_{ch} \cdot \eta = (l - l') \cdot e \quad (2)$$

Po uwzględnieniu średniej prędkości przejazdu odcinkiem z siecią trakcyjną (v) wzór można przekształcić do postaci:

$$P_{ch} \cdot \frac{l'}{v} \cdot \eta = (l - l') \cdot e \quad (3)$$

Przekształcając tę zależność, można wyznaczyć minimalny stopień pokrycia trasy siecią trakcyjną:

$$\frac{l'}{l} = \frac{e}{\frac{n \cdot P_{ch}}{v} + e} \quad (4)$$

Zużycie energii e uzależnione jest od warunków zewnętrznych i w okresie wiosennym wynosi 1,2 kWh/km, a w okresie zimowym przyjmuje wartość rzędu 2,5 kWh/km. Przyjmując moc ładowania P_{ch} na poziomie 120 kW, średnią prędkość jazdy v w zakresie 12–18 km/h, długość minimalnego stopnia pokrycia trasy siecią trakcyjną może się mieścić w zakresie od 11% (niskie zużycie energii, niska prędkość przejazdu odcinkiem sieciowym) do 29% (duże zużycie energii, wysoka prędkość przejazdu odcinkiem z siecią trakcyjną).

Pomiary w gdyńskiej sieci trolejbusowej

PKT Gdynia od 2009 r. eksploatuje trolejbusy wyposażone w pomocniczy napęd bateryjny [9]. Początkowo pojazdy wyposażano w baterie niklowo-kadmowe o pojemności 16 kWh, a od 2015 r. wprowadzane do eksploatacji są pojazdy z wysokopojemnymi bateriami litowo-jonowymi o pojemności 40 kWh i 69 kWh. Dzięki temu získano bogatą bazę doświadczeń eksploatacyjnych.

Ze względu na bardzo dobre właściwości baterii możliwość autonomicznej jazdy trolejbusów jest wykorzystywana nie tylko w sytuacjach awaryjnych, ale nawet przy występowaniu niedoborów taborowych na liniach autobusowych. Niejednokrotnie trolejbusy bateryjne w takich sytuacjach funkcjonują na liniach autobusowych, wykorzystując do ładowania sieć trakcyjną istniejącą na wspólnych fragmentach tras. Warta uwagi jest sytuacja z okresu od 29 czerwca do 1 lipca 2016 r. Wówczas, w związku z organizacją festiwalu Openair, wystąpiły znaczne niedobory pojazdów w komunikacji autobusowej i trolejbusy wyposażone w wielkopojemne baterie litowo-jonowe zostały przeznaczone do obsługi linii autobusowych w Gdyni i Sopocie, m.in. S, 159, 172. Pojazdy pokonywały przy pomocy napędu pomocniczego znacz-

Tab. 1. Dane techniczne baterii trakcyjnych w trolejbusach Solaris Trollino 12

Liczba modułów bateryjnych	3, połączone równolegle
Łączna pojemność baterii	69 kWh
Technologia	Li-Ion
Producent	Impact Clean Power/EnerDel
Pojemność jednego modułu	23 kWh/36 Ah
Napięcie maksymalne modułu	728 V
Maksymalna ciągła moc wyjściowa modułu	64 kW
Maksymalna ciągła moc ładowania modułu	38 kW

Tab. 2. Średnie parametry energetyczne trolejbusów bateryjnych podczas obsługi linii autobusowych w dniach od 29 czerwca do 1 lipca 2016 r.

	Jazda sieciowa	Jazda bateryjna
Całkowite zużycie energii	Bez ładowania baterii: 1,45 kWh/km Z uwzględnieniem energii ładowania baterii w trybie szybkiego ładowania: 4,06 kWh/km	1,27 kWh/km
Zużycie energii na cele trakcyjne z uwzględnieniem rekuperacji	0,84 kWh/km	1,01 kWh/km
Zużycie energii na cele trakcyjne bez uwzględnienia rekuperacji	1,45 kWh/km	1,6 kWh/km

ne odcinki, nawet o długości 29 km. Umożliwiło to stworzenie bazy danych pomiarowych o pracy trolejbusów bateryjnych przy znacznym wykorzystaniu napędu pomocniczego i wykorzystanie ich jako wytycznych do wymiarowania linii komunikacyjnych opartych o IMC.

Dla celów badawczych wybrano 3 najnowsze pojazdy wyposażone w baterie o pojemności 69 kWh znajdujące się w parku taborowym PKT Gdynia (fot. 1–4). Zapisy rejestratorów pokładowych umożliwiły sporządzenie analizy pracy układu bateryjnego. W tab. 1 przedstawiono dane techniczne układów bateryjnych.



Fot. 3. Tylna część trolejbusu Solaris Trollino 12; widoczne są 3 moduły baterii (czarne skrzynki) oraz układ ładowania (szara skrzynka w górnej części aparatury)



Fot. 4. Wnętrze tylnej części trolejbusu Solaris Trollino 12 z widoczną wieżową zabudową mieszczącą w sobie moduły bateryjne

Analiza zużycia energii

Podczas zasilania pojazdu z sieci trakcyjnej energia elektryczna konsumowana jest przez napęd trakcyjny, odbiory nietrakcyjne oraz zużywana na ładowanie baterii trakcyjnych. Zgromadzona energia w bateriach jest źródłem zasilania w trakcie jazdy autonomicznej.

Bazując na danych pomiarowych uzyskanych podczas obsługi trolejbusami bateryjnymi linii autobusowych w dniach od 29 czerwca do 1 lipca, określono zużycie energii w poszczególnych trybach pracy. Wartości wyznaczono dla trybu jazdy sieciowej i bateryjnej. Wyznaczono także wartości zużycia energii na cele trakcyjne oraz całkowitego zużycia energii. Wyróżniono ponadto zużycie energii przy zasilaniu sieciowym przy włączonym szybkim ładowaniu baterii (tab. 2).

Pomiarowy szacunek dystansu i czasu ładowania baterii trakcyjnych

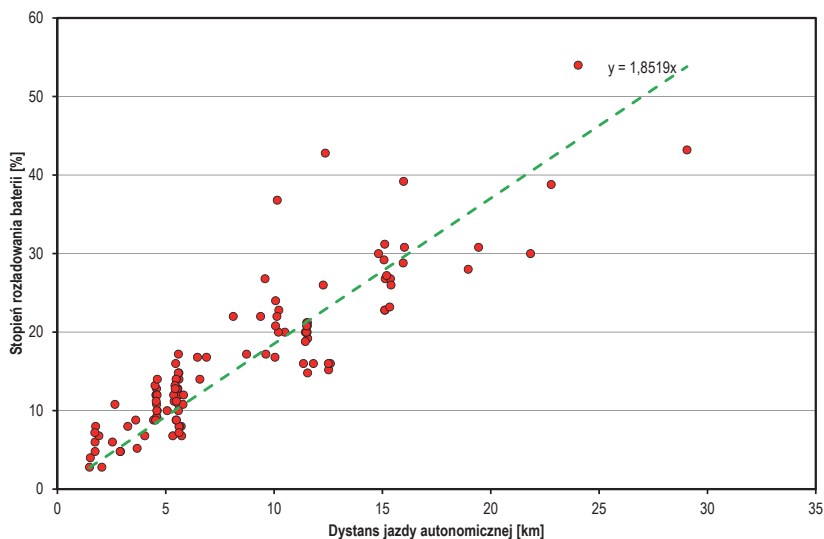
W trakcie obsługi linii autobusowych trolejbusy przy zasilaniu bateryjnym pokonywały odcinki o zróżnicowanej długości – od 0,5 km do 29 km. Doładowywanie baterii następowało w trakcie ruchu linowego z sieci trakcyjnej. Takie warunki pracy są równoważne występującym w systemie IMC, dlatego zebrane dane umożliwiły wyznaczenie granicznych parametrów przejazdu baterijnego i sieciowego dla pojazdów ładowanych w systemie IMC:

- rejestracje jazdy przy zasilaniu z baterii trakcyjnych umożliwiły określenie zasięgu pojazdu przy pracy autonomicznej;
- rejestracje jazdy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej z równoczesnym ładowaniem baterii trakcyjnych umożliwiły określenie parametrów procesu ładowania baterii trakcyjnych.

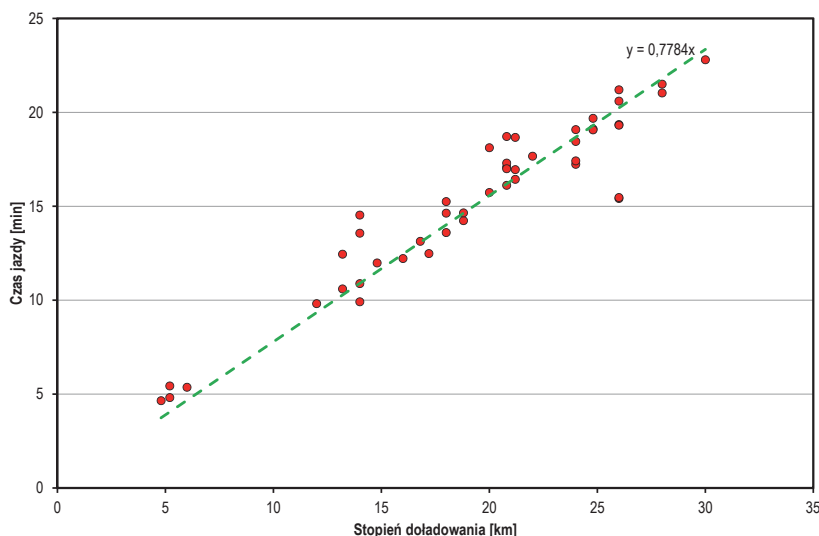
W oparciu o powyższe dane wykonano 3 zasadnicze analizy uzyskanych danych pomiarowych:

- 1) na podstawie analizy odcinków przejechanych przy zasilaniu bateryjnym wyznaczono zależność pomiędzy długością przejazdu autonomicznego i spowodowanym tym stopniem rozładowania baterii (rys. 2);
- 2) na podstawie części trasy pokonanej przy zasilaniu z sieci trakcyjnej, w trakcie której następowało ładowanie baterii, określono zależność pomiędzy stopniem rozładowania baterii i wymaganym czasem ładowania baterii z sieci trakcyjnej (rys. 3);
- 3) ponadto na podstawie tych danych wyznaczono zależność pomiędzy stopniem doładowania baterii trakcyjnych i wymaganym dystansem przejazdu, na którym nastąpiło doładowanie baterii (rys. 4).

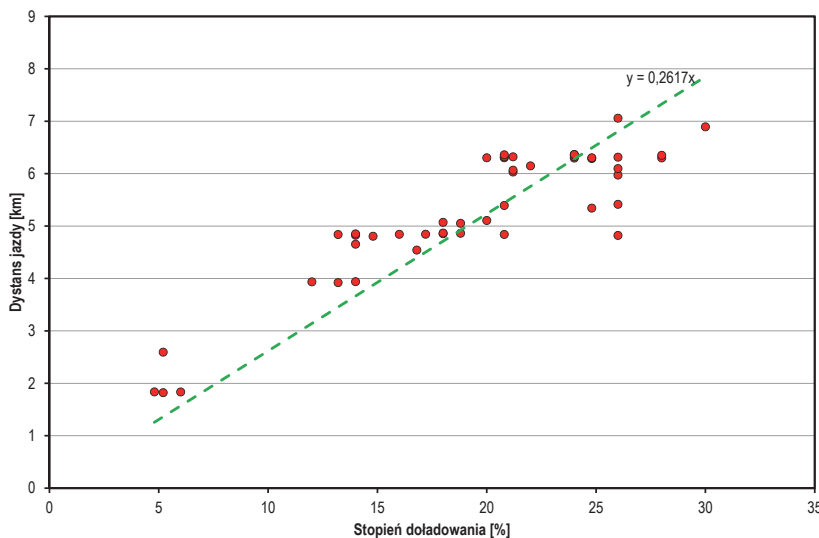
Analiza 1 pozwala na określenie wymaganej pojemności baterii dla przejechania danego odcinka, analiza 2 i 3 pozwalają określić parametry odcinka sieciowego, na którym następuje ładowanie baterii.



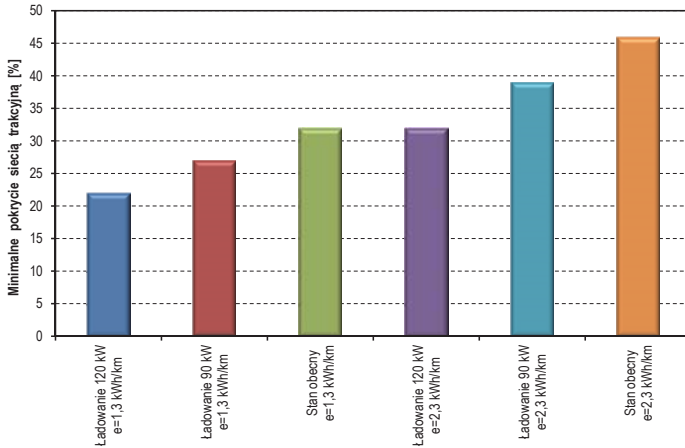
Rys. 2. Zależność pomiędzy długością przejazdu autonomicznego i spowodowanym tym stopniem rozładowania baterii



Rys. 3. Zależność pomiędzy stopniem rozładowania baterii i wymaganym czasem ładowania baterii z sieci trakcyjnej



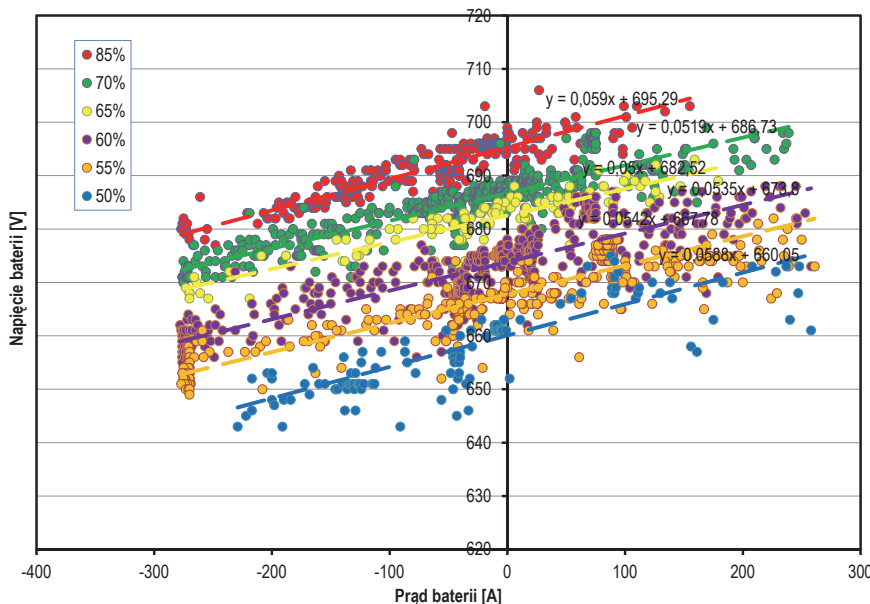
Rys. 4. Zależność pomiędzy stopniem doładowania baterii trakcyjnych i wymaganym dystansem przejazdu, na którym nastąpiło doładowanie baterii



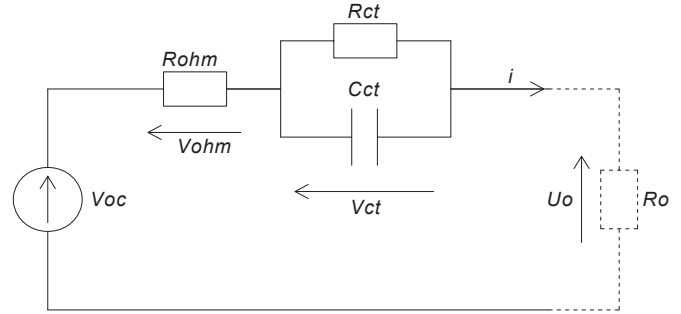
Rys. 5. Stopień minimalnego pokrycia sieci trakcyjną dla różnych warunków ruchu i ładowania

Przedstawione zależności mają charakter liniowy. Na poszczególnych wykresach przedstawiono równania prostych aproksymujących. Przyrównując równania prostych przedstawionych, można stwierdzić, iż w badanym przypadku w celu pokonania dystansu jazdy bezsieciorowej o długości 1 km konieczne jest ładowanie baterii przez 1 min i 45 s. Jeżeli ruch odbywa się ze stałą średnią prędkością i ładowanie baterii odbywa się w ruchu, to na każdy 1 km jazdy bezsieciorowej konieczny jest przejazd odcinka sieciowego o długości 0,48 km. Oznacza to, iż w warunkach analogicznych jak panujące podczas pomiarów w przypadku tras obsługiwanych pojazdami ładowanymi w systemie IMC co najmniej 32% długości linii powinno się wyposażyć w sieć trakcyjną, aby możliwe było doładowanie baterii.

Obecnie trolejbus jest wyposażony w możliwość szybkiego ładowania baterii prądem 1 C za pomocą pojazdowego układu ładowania zasilanego z sieci trakcyjnej o mocy 70 kW. We współczesnych rozwiązaniach autobusów elektrycznych coraz częściej stosowane są układy ładowania baterii prądem znacznie większym, nawet 5 C. Dzięki liniowej zależności uzyskane pomiary można wykorzystać do oszacowania czasów ładowania oraz mi-



Rys. 7. Stopień minimalnego pokrycia sieci trakcyjną dla różnych warunków ruchu i ładowania oraz różnego stopnia rozładowania



Rys. 6. Schemat zastępczy ogniwa litowo-jonowego [7]

nimalnego względnego przebiegu linii pod siecią trakcyjną dla innych warunków ruchu. W przypadku ładowania pojazdów w systemie IMC za pomocą odbieraków trolejbusowych ograniczeniem jest wytrzymałość prądowa odbieraków. Jak zaznaczono, maksymalny prąd ładowania w trakcie ruchu wynosi 200 A, a w trakcie postoju 150 A. Odpowiada to mocy ładowania odpowiednio 120 kW i 90 kW. Te wartości należy więc traktować jako graniczne przy systemie ładowania IMC. W przypadku ładowania mocą 120 kW wystarczające staje się pokrycie jedynie 22% długości linii siecią trakcyjną. Powyższe pomiary odniesione są do okresu wiosennego, w którym zużycie energii wynosi 1,3 kWh/km. W sezonie zimowym całkowite zużycie energii może wzrosnąć nawet do 2,3 kWh, co skutkuje szybszym rozładowaniem baterii trakcyjnych i koniecznością dłuższego ładowania. W takim przypadku – przy zastosowaniu ładowarki 120 kW – konieczne staje się pokrycie 33% linii siecią trakcyjną; w przypadku zastosowanego obecnego układu ładowania wartość ta wzrasta do 46%. W tab. 3 zaprezentowano porównanie czasów ładowania oraz ekwiwalentnych długości odcinków sieci trakcyjnej dla różnych warunków jazdy oraz różnych mocy ładowania, a na rys. 5 przedstawiono porównanie w postaci graficznej.

Szacunek sprawności procesu ładowania i rozładowania

Sprawność procesu ładowania i rozładowania ogniwa elektrochemicznego ograniczona jest występowaniem strat na rezystancjach wewnętrznych ogniwa. Na rys. 6 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy ogniwa litowo-jonowego [7]. Rezystancja R_{ohm} modeluje straty powstałe w wyniku przepływu prądu poprzez elektrody, elektrolit oraz powłoki SEI powstałej na powierzchni katody i anody. Elementy R_{ct} i C_{ct} modelują ograniczoną szybkość reakcji chemicznych w ogniwie. Przy pominięciu stanów przejściowych ogniwo litowo-jonowe można traktować jako szeregowe połączenie źródła napięciowego o wartości V_{oc} oraz rezystancji wewnętrznej równej $R_{ohm} + R_{ct}$.

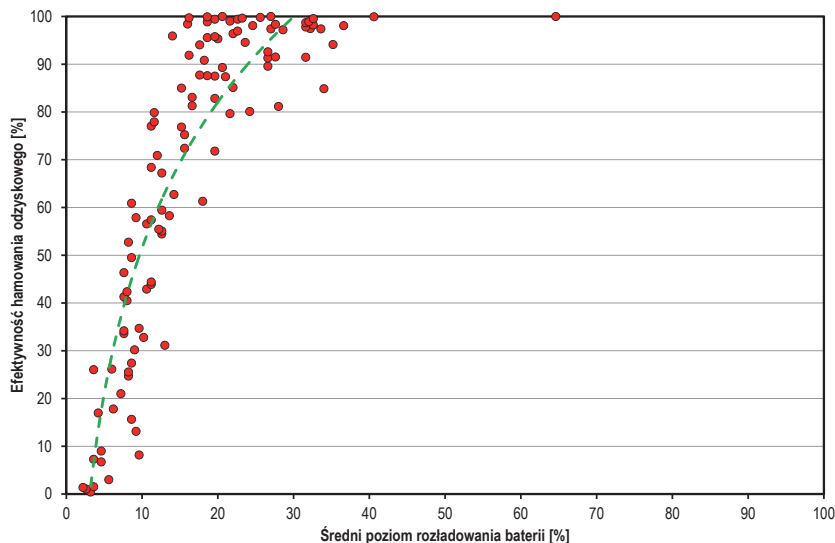
Na rys. 7 przedstawiono wyniki rejestracji zależności pomiędzy napięciem ogniwa i prądem obciążenia przy różnych stopniach naładowania. Widoczny jest wpływ stopnia rozładowania na napięcie V_{oc} . Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa ma charakter liniowy. Aproksymując wyniki pomiarów, można oszacować rezystancję wewnętrzną modułu baterijnego na poziomie 60 mΩ.

Przy obecnym prądzie szybkiego ładowania równym ok. 100 A generowane są straty na

poziomie 0,6 kW, co odpowiada wielkości 1% w skali względnej. Całkowite straty cyklu ładowanie – rozładowanie są na poziomie około dwukrotnie większym, czyli ok. 2%. Niewielką wartość strat w bateriach trakcyjnych potwierdzają pomiary, dobowa sprawność baterii w cyklu ładowanie – rozładowanie jest na poziomie 96%.

Wykorzystanie rekuperacji hamowania w trakcie jazdy przy zasilaniu bateryjnym

Trolejbusy Trollino 12 wyposażone są w możliwość rekuperacji energii w trybie jazdy bateryjnej. W trakcie hamowania elektrodynamicznego generowana energia może służyć do podładowywania baterii trakcyjnych. Jak pokazały doświadczenia eksploatacyjne, skuteczność hamowania odzyskowego w trybie jazdy bateryjnej może być bardzo duża i sięgać 100% (tzn. 100% energii hamowania może być zgromadzona w akumulatorach). Niemniej uzależniona jest ona bardzo od parametrów pracy baterii, a przede wszystkim od stopnia ich rozładowania w trakcie jazdy. W przypadku pełnego lub prawie pełnego naładowania baterii napięcie ogniów jest rzędu 690–700 V. Podczas hamowania następuje wzrost napięcia na ogniwach ze względu na rezystancję wewnętrzną. Może to spowodować przekroczenie maksymalnej dopuszczalnej wartości napięcia hamowania odzyskowego do baterii wynoszącej 700 V i wejście w tryb hamowania rezystorowego. W związku z tym baterie nie mają możliwości przyjęcia energii i energia hamowania jest wytracana w rezystorze hamowania. Jeśli jednak baterie posiadają odpowiednią rezerwę pojemności, praktycznie cała energia re-



Rys. 8. Zależność pomiędzy stopniem rozładowania i efektywnością rekuperacji

kuperacji może być wykorzystana do ich ładowania. Zależność pomiędzy stopniem rozładowania i efektywnością rekuperacji przedstawiono na rys. 8. Należy zaznaczyć, iż przy pokonywaniu odcinków jazdy bezsieciorowej o znacznej długości średni stopień rozładowania przekracza wartość 20–30%, dlatego w praktycznych warunkach pracy układu IMC wykorzystanie rekuperacji może być bliskie poziomowi 100%.

Wytyczne dla systemu ładowania IMC

Głównym zagadnieniem związanym z wymiarowaniem układów IMC jest określenie minimalnego stopnia przebiegu linii komunikacyjnej pod siecią trakcyjną. Na podstawie przeprowadzonej szacunkowej analizy teoretycznej oraz badań pomiarowych można stwierdzić, iż jego wartość mieści się w zakresie od 22% do 46% – w zależności od zużycia energii i prądu ładowania (rys. 5, tab. 3). Mając na uwadze rozwój technologii bateryjnych oraz konieczność wymiarowania układów zasilania z zachowaniem marginesu bezpieczeństwa, za miarodajne można uznać wyniki obliczeń dla prądu ładowania 200 A oraz zużycia energii odpowiadającego warunkom zimowym. Z tego powodu proponuje się przyjęcie następujących wytycznych dla warunków granicznych przy projektowaniu układów IMC:

- ♦ minimalny stopień pokrycia linii komunikacyjnej siecią trakcyjną powinien wynosić 33%. Ze względu na możliwość wystąpienia zaburzeń w ruchu lub wzrostu zużycia energii powyżej wartości normatywnej pętle końcowe powinny być wyposażone w układ umożliwiający ładowanie baterii trakcyjnych w sytuacjach awaryjnych (o ile nie ma na nich sieci trakcyjnej). Ponadto należy przeprowadzić dodatkową weryfikację linii pod kątem czasu przejazdu odcinkiem z siecią trakcyjną w stosunku do całkowitego czasu przejazdu. Powinien być nie mniejszy niż 33%. Pozwoli to na uniknięcie sytuacji, gdy prędkość przejazdu odcinkiem z siecią trakcyjną jest znacznie większa od prędkości jazdy na odcinku pozbawionym sieci trakcyjnej i skutkiem tego baterie trakcyjne nie będą się w stanie naładować do wymaganego poziomu. Sytuacja taka może mieć miejsce przykładowo wówczas, gdy odcinek „sieciorowy” jest umieszczony na wydzielonych pasach ruchu, a odcinek „bez-sieciorowy” w części miasta o silnym wpływie kongestii;
- ♦ jeśli powyższe warunki nie mogą być spełnione, jako minimalny stopień pokrycia siecią należy przyjąć 50%. Sytuacja

Tab. 3. Porównanie parametrów ładowania

	Stan obecny	Zwiększenie mocy ładowania	
		Do maksymalnej wartości prądu odbiora podczas ruchu, wynoszącej 200 A	Do maksymalnej wartości prądu odbiora podczas ruchu, wynoszącej 150 A
Moc układu ładowania baterii [kW]	70	120	90
Szybkość ładowania baterii [% naładowania/1 min]	1,29	2,2	1,65
Czas ładowania baterii po przejechaniu odcinka 1 km w sezonie wiosennym przy zakładanym zużyciu energii 1,3 kWh/km [s]	105	62	82
Czas ładowania baterii po przejechaniu odcinka 1 km w sezonie wiosennym przy zakładanym zużyciu energii 2,3 kWh/km [s]	186	110	145
Dystans jazdy sieciowej niezbędny do naładowania baterii po przejechaniu odcinka 1 km w sezonie wiosennym przy zakładanym zużyciu energii 1,3 kWh/km [km]	0,48	0,28	0,37
Dystans jazdy sieciowej niezbędny do naładowania baterii po przejechaniu odcinka 1 km w sezonie wiosennym przy zakładanym zużyciu energii 2,3 kWh/km [km]	0,85	0,5	0,65
Minimalny stopień pokrycia linii siecią trakcyjną przy zużyciu energii równym 1,3 kWh/km (wiosna) [%]	32	22	27
Minimalny stopień pokrycia linii siecią trakcyjną przy zużyciu energii równym 2,3 kWh/km (zima) [%]	46	33	39

Tab. 4. Porównanie progów pokrycia siecią trakcyjną linii komunikacyjnych w systemie IMC

Próg pokrycia siecią trakcyjną	Warunek
50%	brak
33%	– możliwość awaryjnego ładowania na pętach końcowych, – spełnienie warunku minimalnego względnego czasu przejazdu odcinkiem sieciowym
mniej niż 33%	– wydłużenie postoju na pętach końcowych dla ładowania baterii trakcyjnych

taka występuje wówczas, gdy nie ma możliwości ładowania na pętach końcowych lub nie jest możliwe zwiększenie czasu postoju dla ładowania pojazdu;

- ◆ jeżeli stopień pokrycia siecią trakcyjną jest na poziomie 30–32%, należy rozważyć modyfikację linii komunikacyjnej tak, aby zwiększyć długość przejazdu odcinkiem sieciowym;
- ◆ jeśli nie jest możliwe spełnienie kryterium minimalnej długości odcinka sieciowego, należy wydłużyć czas postoju na pętach końcowych w celu umożliwienia doładowania baterii. W przypadku zastosowania klasycznych odbieraków trolejbusowych należy założyć czas ładowania wynoszący 2 min i 30 s na każdy dodatkowy kilometr jazdy bezsieciowej. Wartość tę przyjęto z zachowaniem znacznego marginesu bezpieczeństwa; wartość ta może się różnić w przypadku odbieraków i wkładek o innej konstrukcji niż stosowane w Polsce.

Porównanie poszczególnych kryteriów przedstawiono w tab. 4.

Podczas jazdy odcinkiem sieciowym następuje znaczny wzrost wartości energii pobieranej z sieci trakcyjnej ze względu na konieczność ładowania baterii (tab. 4). Zużycie energii podczas jazdy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej może być nawet ponad trzykrotnie większe od średniego zużycia energii na całej długości linii. W przypadku pojazdów o długości 12 m przy niekorzystnych warunkach pogodowych pobór energii z sieci trakcyjnej może przekroczyć wartość 7 kWk/km. Z tego powodu należy zastosować wzmocniony układ zasilania sieci trakcyjnej.

Podsumowanie

Pomimo wzrostu liczby miast eksploatujących autobusy elektryczne w komunikacji miejskiej w większości są to systemy o charakterze testowym i wciąż nie ma zgodności użytkowników w zakresie optymalnego i uniwersalnego rozwiązania dla autobusów elektrycznych. Jednym z największych problemów jest kwestia ładowania. Z drugiej strony eksploatowana w wielu miastach komunikacja trolejbusowa jest uważana za przestarzałą. System In Motion Charging umożliwia połączenie silnych stron trolejbusu i autobusu elektrycznego.

System IMC wymaga elektryfikacji jedynie 33–50% całkowitej długości linii. Ponadto w przypadku wspólnych odcinków wielu linii komunikacyjnych istnieje możliwość wykorzystania sieci trakcyjnej przez wiele linii. Jest to rozwiązanie szczególnie predestynowane dla istniejących sieci trolejbusowych, dzięki czemu istnieje możliwość lepszego wykorzystania infrastruktury. Również w wielu przypadkach może być uzasadniona budowa całkowicie nowych systemów komunikacyjnych opartych o IMC, szczególnie w połączeniu z zastosowaniem wydzielonych pasów ruchu dla autobusów.

Obecnie głównym wyzwaniem jest rozwój konstrukcji odbieraków trolejbusowych w kierunku zwiększenia możliwości obciążenia prądowego. Ma to szczególne znaczenie dla ładowania pojazdu podczas postoju.

Bibliografia:

1. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Integracja systemu energetycznego miejskiego transportu szynowego i stacji ładowania autobusów elektrycznych – szansa czy zagrożenie?*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 7–8.
2. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Nowoczesna koncepcja rozwoju transportu trolejbusowego: projekt Slide-In*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2015, nr 7–8.
3. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Uwagi na marginesie artykułu Adama Moleckiego Rozwój autobusów elektrycznych w oparciu o istniejące sieci tramwajowe*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2015, nr 1–2.
4. Bartłomiejczyk M., *Smart grid technologies in electric power supply systems of public transport*, 12th International Conference: Modern Electrified Transport 2015, 2015.
5. Bartłomiejczyk M., Stýskała V., Hrbac R., Połom M., *Trolleybus with traction batteries for autonomous running*, 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA), Technical University of Kosice, Kosice 2013.
6. Bergk F., Pütz R., *Potential of In-Motion Charging Buses for the Electrification of Urban Bus Lines*, Konferencja „Electromobility in public transport”, Gdynia 2016.
7. Korman M., *Projekt zasobnika baterijnego autobusu elektrycznego dla linii Gdynia Kacze Buki-Chwaszczyno* [praca dyplomowa magisterska], Politechnika Gdańska, Gdańsk 2016.
8. Manheller M., *Cost factors in real fleet duty – Vossloh Kiepe*, Konferencja „Electromobility in public transport”, Gdynia 2016.
9. Połom M., Bartłomiejczyk M., *Alternatywne źródła zasilania w trolejbusach – przegląd rozwiązań stosowanych w miastach europejskich*, „Technika Transportu Szynowego” 2011, nr 3.
10. Połom M., Piasecki A., Bartłomiejczyk M., *Charakterystyka autonomiczności trolejbusów – nowe doświadczenia w elektromobilności miejskiej*, „Logistyka” 2015, nr 4.

Podziękowania

Publikacja powstała przy wsparciu projektu ELIPTIC „Optimising existing electric infrastructure and rolling stock in order to reduce costs and energy consumption” finansowanego w ramach programu Horizon 2020, numer umowy 636012.

Autor:

dr inż. **Mikołaj Bartłomiejczyk** – Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, e-mail: mikołaj.bartlomiejczyk@pg.gda.pl

Practical application

of In Motion Charging: using trolleybuses on bus routes in Gdynia

Overnight Charging and fast Opportunity Charging are currently the two most popular systems for charging electric buses. Despite existing multiple test installations, neither of these two systems has not gained a clear endorsement of users. An alternative is to charge vehicles in motion, so-called Charging In Motion, which combines the advantages of communication trolleybus and bus electric: the main power supply batteries are traction, but charging is done on the move without having to stop the vehicle.

Keywords: trolleybus, electric bus, traction batteries.