

Perspektywy obsługi miast autobusami elektrycznymi na przykładzie Sopotu



Solaris Urbino 18,75 electric dla HHA Hamburg. (Fot. Hochbahn)

W obliczu zaostrzających się wymagań dotyczących ochrony środowiska władze miast poszukują rozwiązań mających na celu ograniczenie emisji zanieczyszczeń. W sektorze transportu innowacyjnym rozwiązaniem, umożliwiającym zmniejszenie emisji spalin, jest zastosowanie „czystszych” środków transportu miejskiego – autobusów. Pojazdy o napędzie elektrycznym stanowią jeden z filarów realizacji polityki zrównoważonej mobilności w miastach i aglomeracjach. Aspekty ekologiczne, ekonomiczne (niskie koszty eksploatacji) i większa elastyczność obsługi – w porównaniu z tramwajami i trolejbusami – są najczęściej wymienianymi determinantami wprowadzenia tego nowego rodzaju pojazdów elektrycznych do eksploatacji.

Sopot jako miasto uzdrowiskowe jest w szczególnym stopniu predestynowany do obsługi pojazdami elektrycznymi. Jednocześnie funkcjonująca na obszarze tego miasta komunikacja trolejbusowa stwarza określone warunki dla funkcjonowania i rozwoju autobusów. Celem niniejszego referatu jest analiza możliwości oraz uwarunkowań wprowadzenia autobusów do obsługi miast oraz analiza wariantów obsługi autobusami wybranego miasta – Sopotu. Do oceny wariantów wykorzystano analizę DGC, która przedstawia techniczny koszt uzyskania jednostki efektu ekologicznego (zł/km) oraz umożliwia uszeregowanie wariantów obsługi od najtańszego do najdroższego.

Słowa kluczowe: autobusy, emisja zanieczyszczeń, napęd elektryczny, analiza DGC.

Wprowadzenie

Wprowadzanie pojazdów elektrycznych traktowane jest jako podstawa zrównoważonej mobilności, ochrony środowiska i równocześnie dywersyfikacji energetycznej. Wzrost udziału pojazdów

elektrycznych w realizacji zadań przewozowych w miastach ma szczególne znaczenie w związku z niewydziałaniem szkodliwych substancji do środowiska w miejscu realizacji usług, w tym emisji CO₂ i hałasu. Cele energetyczne, realizowane za pośrednictwem pojazdów elektrycznych, to dążenie do uniezależnienia krajowego rynku energetycznego od zasobów i polityki dostawców zewnętrznych. Przewidywany rozwój produkcji autobusów elektrycznych będzie miał istotny wpływ na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego kraju. Konieczna będzie budowa infrastruktury sieci dystrybucji energii, a równocześnie pojawią się dla branży elektroenergetycznej i odbiorców energii elektrycznej nowe możliwości magazynowania energii elektrycznej.

Wzrost popytu na energię elektryczną powinien być wykorzystany przez odbiorców i dostawców krajowego systemu elektroenergetycznego do poprawy efektywności wykorzystania i produkcji energii, podniesienia niezawodności dostaw i obniżenia kosztów dostaw energii. Realizacja przedstawionych celów będzie zdeteminowana liczbą pojazdów elektrycznych, wprowadzeniem zasady V2G (Vehicle to Grid)¹ oraz wzrostem efektywności energetycznej, tak aby 20% energii elektrycznej pochodziło ze źródeł odnawialnych. Rozwój pojazdów elektrycznych musi być więc skorelowany z rozwojem generacji ze źródeł odnawialnych, które powinny być źródłem energii dla pojazdów elektrycznych i dywersyfikacji zapotrzebowania na energię w różnych porach doby. Ten drugi aspekt pozwala ograniczyć szczytowe zapotrzebowanie na moc systemu elektroenergetycznego, co istotnie poprawia jego efektywność i pozwala uniknąć dużych nakładów inwestycyjnych.

Autobusy elektryczne jako pojazdy transportu miejskiego

Autobusy (autobusy elektryczne) są napędzane silnikiem elektrycznym prądu stałego, zasilane z baterii o dużej mocy [14]. Do

zalet autobusów elektrycznych zalicza się: wysoką sprawność napędu elektrycznego, niższe koszty eksploatacji, brak emisji czynników szkodliwych w miejscu użytkowania pojazdu, cichą i spokojną jazdę, niską awaryjność, możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania (wpływa to na dłuższą żywotność elementów ciernych w układzie hamulcowym). Natomiast najważniejszymi wadami tego środka transportu są: wysoka cena zakupu taboru (około 2–3 razy wyższa niż cena zakupu autobusów spalinowych porównywalnej wielkości), konieczność wybudowania nowej infrastruktury w postaci punktów wymiany baterii lub ładowania baterii, ograniczona żywotność i ciężar baterii. Wymienione wady są powiększone przez wykorzystywanie energii elektrycznej nie tylko do napędzania silników elektrycznych, ale także do innych funkcji związanych z eksploatacją, co powoduje znaczne ograniczenie zasięgu autobusów elektrycznych (np. w okresie zimowym zasięg jazdy elekrobusego ulega skróceniu z powodu zwiększonego zużycia energii elektrycznej) [2].

Układ napędowy elekrobusego składa się z asynchronicznego silnika elektrycznego trakcyjnego. Głównym zadaniem takiego silnika jest przetwarzanie energii elektrycznej na energię mechaniczną. Charakteryzuje się on prostą budową, niskimi kosztami eksploatacyjnymi oraz wysoką niezawodnością. Podstawową zaletą zastosowania silników asynchronicznych w autobusach elektrycznych jest odzyskiwanie energii podczas hamowania, poprawiające sprawność energetyczną pojazdu.

Energia do napędzania silnika asynchronicznego jest zgromadzona w akumulatorach. Akumulatory (magazyny energii) są chłodzone cieczą i dostarczają energii do układu napędowego oraz do pozostałych układów (np. wspomaganie kierownicze, ogrzewania, klimatyzacji, sterowania elektrycznego drzwiami). Proces ładowania baterii (akumulatorów) determinuje sposób funkcjonowania autobusów elektrycznych w systemie transportu miejskiego. Można wyróżnić 3 systemy ładowania elekrobusego [3, 4]:

- 1) ładowanie nocne: bateria jest ładowana podczas postoju pojazdu na terenie zajezdni w nocy;
- 2) system *plug-in*: ładowanie na pętlach końcowych w trakcie postoju;
- 3) system *plug-in* (jak w punkcie 2): doładowywanie autobusów dodatkowo podczas postoju na wybranych przystankach;

Przesył energii do pojazdu może się odbywać za pomocą [5, 11, 12, 16, 17, 21]:

- 1) wtyczki (złącza wtykowego) – rozwiązanie to jest możliwe do zastosowania jedynie przy ładowaniu na terenie zajezdni;
- 2) pantografu umieszczonego na dachu pojazdu;
- 3) pętli indukcyjnych – rozwiązanie to wymaga budowy drogowych miejsc ładowania, przez co jest mało rozpowszechnione.

System *plug-in* polega na doładowywaniu baterii przy wykorzystaniu wtyczki oraz ładowarki o mocy do 200 kW na przystankach końcowych lub na wybranych przystankach na trasie przejazdu.

System pantografowego ładowania autobusów elektrycznych składa się ze stacji wyposażonej w ruromy szyny zasilające, wysuwające się nad pojazd tylko w momencie ładowania (moc ok. 250 kW), raz z autobusu wyposażonego w 2 pantografy [23].

Kolejnym sposobem uzupełniania energii elektrycznej w elekrobusego jest system ładowania przy pomocy pętli indukcyjnych (o mocy 200 kW), amontowanych pod powierzchnią jezdni przy przy-

stanku autobusowym. Autobusy wyposażone są w urządzenia o nazwie *pick up*, które znajdują się pod podłogą pojazdu. Opuszczenie urządzenia na pętlę indukcyjną umożliwia ładowanie baterii [9].

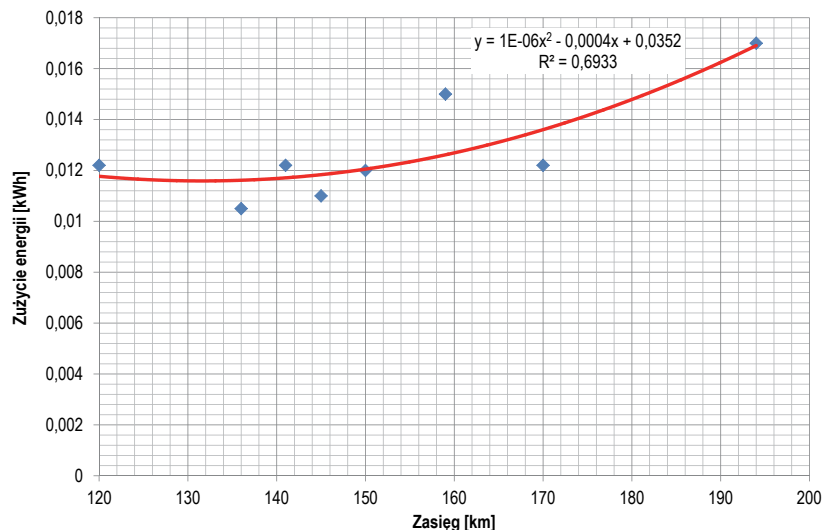
Częstsze i krótsze doładowywanie baterii umożliwia ograniczenie jej pojemności do 60–90 kWh, co wpływa na zmniejszenie masy i wielkości baterii. Ładowanie elekrobusego za pomocą opisanych systemów wymaga wyłączenia autobusu z ruchu na około 10 min, co trzeba uwzględnić przy planowaniu rozkładu jazdy, oraz odpowiedniego wydłużenia czasu postoju autobusów na przystankach końcowych lub pośrednich. Skutkiem tej cechy może być większa liczba pojazdów w ruchu, przy zachowaniu określonej częstotliwości w stosunku do klasycznych autobusów lub trolejbusów [2]. Dodatkowo ładowanie baterii przy użyciu pętli indukcyjnej lub automatycznego pantografu pociąga za sobą duże nakłady inwestycyjne. Systemy te wymagają specjalistycznej infrastruktury na przystankach pośrednich oraz odpowiednio wyposażonego taboru elektrycznego.

Elekrobusego nie zużywają energii elektrycznej tylko do napędzania silników elektrycznych, lecz wykorzystywana jest ona też przez instalacje pokładowe, pełniące funkcje związane z eksploatacją. Dodatkowa energia jest wykorzystywana do: zasilania oświetlenia wewnątrz pojazdu, tablic informacyjnych, kasowników, systemów audio-wideo, ogrzewania zimą oraz klimatyzacji latem. Wszystkie te funkcje wymagają dostępnej mocy energii elektrycznej, wynoszącej około 10 kWh.

Ograniczeniem w eksploatacji elekrobusego jest zasięg możliwy do osiągnięcia na jednym cyklu ładowania. Dane statystyczne zawarte na rys. 1 przedstawiają zależność jednostkowego zużycia energii w funkcji zasięgu elekrobusego.

Zasięg pojazdu jest zależny od pojemności baterii (rys. 1). Oznacza to, że wzrost zasięgu wymaga zwiększenia pojemności baterii, co natomiast niesie ze sobą wzrost masy pojazdu i zużycia energii. Możliwe jest też zastosowanie lżejszych komponentów do budowy elekrobusego, co umożliwiłoby zmniejszenie wagi konstrukcji oraz zastosowanie bardziej pojemnej baterii, jednak negatywnie wpłynęłoby na bezpieczeństwo pasażerów.

Dużą zaletą użytkowania elekrobusego są niższe koszty eksploatacyjne niż w przypadku pojazdów o tradycyjnym napędzie. Przykładowo koszt pokonania 100 km dla autobusu zasilanego bateriami to około 50 zł (koszt zużycia 1 kWh wynosi 0,61 zł na



Rys. 1. Zależność pomiędzy zasięgiem elekrobusego a zużyciem energii [9]

dzień 06.04.2016 r.), podczas gdy tradycyjne autobusy z silnikami wysokoprężnymi zużywają na tym samym dystansie około 40–50 l paliwa (cena oleju napędowego wynosi 3,89 zł/l na dzień 06.04.2016 r), co oznacza koszt na poziomie 140–180 zł [8].

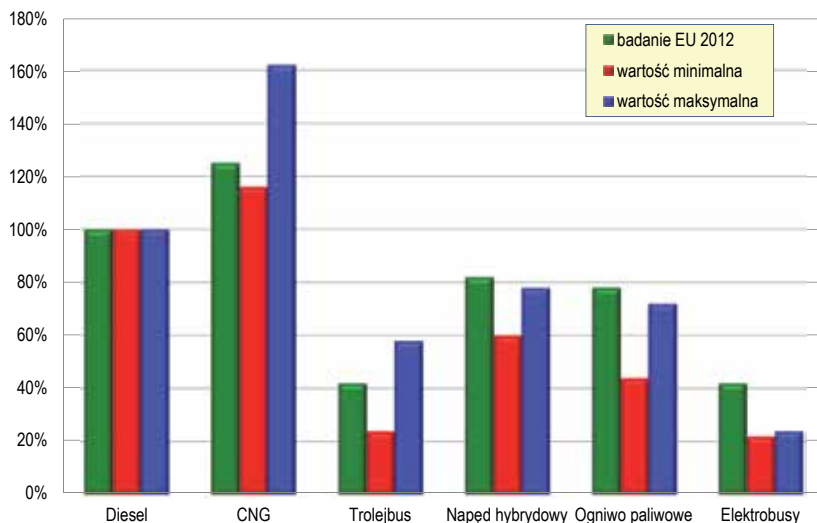
W przypadku szacowania kosztów eksploatacji konieczne jest uwzględnienie znacznych kosztów wymiany baterii (około ¼ ceny zakupu elektrobusów) oraz relatywnie wysokiej ceny zakupu elektrobusów. Żywotność baterii przez producentów elektrobusów jest deklarowana na 6–15 lat. Po tym okresie baterie można wykorzystywać do innych celów, na przykład do magazynowania energii. Koszt wymiany baterii szacuje się na około 600 tys. zł. Ze względu na wykorzystywane technologie, innowacyjne rozwiązania oraz ograniczoną wielkość produkcji, przekładającą się na wysoki koszt jednostkowy, cena autobusów elektrycznych jest dwukrotnie większa niż pojazdów o tradycyjnym napędzie. Koszt zakupu Solaris Urbino 12 Electric wynosi 1,7 mln zł – za tę kwotę można kupić 2 takiej samej wielkości autobusy z silnikiem diesla.

Eksploatacja elektrobusów wymaga odpowiedniego wyposażenia zaplecza technicznego, niezbędnego do obsługi tych pojazdów w zajezdni, oraz zaplanowania rozmieszczenia prze-

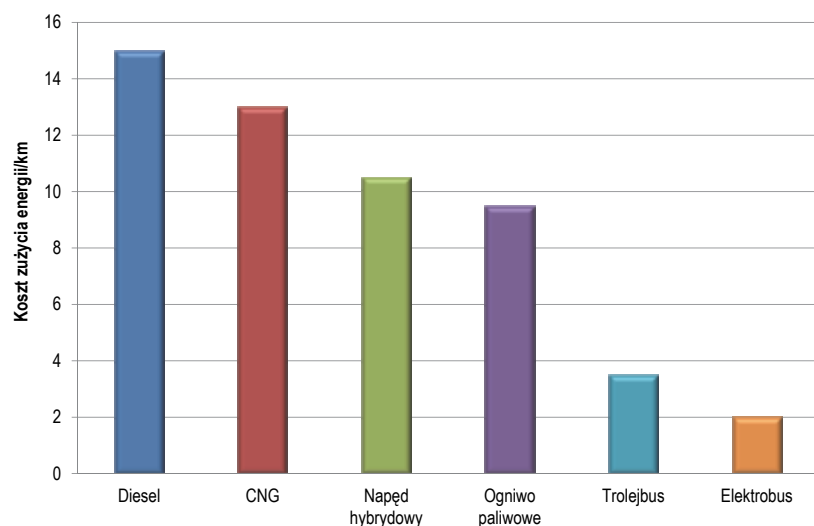
strzennego urządzeń zasilających pojazdy w energię elektryczną na trasach przejazdu (np. przystanki lub odcinki międzyprzystankowe) lub w punktach krańcowych (przystanki końcowe, pętle) [10]. Ważnym aspektem jest także odpowiednie przeszkolenie pracowników do obsługi elektrobusów (zaznajomienie z monitorami LCD, odczytywanie poziomu baterii) i punktów ładowania. Wiąże się to z organizowaniem specjalnych kursów – koszt wyszkolenia 200 pracowników to około 1 mln zł [7].

Na proces eksploatacji elektrobusów w znacznym stopniu wpływają także:

- ♦ ukształtowanie terenu – układ napędowy autobusów elektrycznych podczas jazdy pod wzniesienia pobiera więcej energii elektrycznej z baterii, co skutkuje skróceniem zasięgu autobusu między cyklami doładowania baterii;
- ♦ warunki klimatyczne – w okresie zimowym znaczna część energii elektrycznej jest potrzebna do ogrzania pojazdu, a w okresie letnim klimatyzacja wykorzystuje energię elektryczną do chłodzenia wnętrza pojazdu;
- ♦ warunki ruchu drogowego – zatory drogowe, jazda z niską prędkością, a przede wszystkim częste zatrzymywanie się autobusów elektrycznych na wlotach skrzyżowań, wiążą się ze zwiększonym zużyciem energii elektrycznej;
- ♦ kwestia niezawodności tego środka transportu – wykorzystywanie w całym systemie przewozowym tylko pojazdów napędzanych trakcją elektryczną z jednej strony będzie bardziej korzystne ze względów ekologicznych, z drugiej strony zwiększy podatność tego systemu na zakłócenia, związane przykładowo z awarią systemu zasilania.



Rys. 2. Porównanie zużycia energii w zależności od układu napędowego w stosunku do silnika diesla [19]



Rys. 3. Koszt zużycia energii ze względu na zastosowany układ napędowy [19]

2. Cechy ekologiczne autobusów elektrycznych

Porównanie napędów konwencjonalnych (olej napędowy, benzyna) z napędami alternatywnymi (hybryda, napęd elektryczny) wykazuje, że najmniej szkodliwy i najbardziej przyjazny dla środowiska jest napęd elektryczny. Nie wytwarza on związków węglowodorowych (HC) ani cząstek stałych (PM), natomiast emisja dwutlenku węgla (CO₂) przez napęd oparty na energii elektrycznej jest najmniejsza (wynosi około 0,6 [g/km]). Tezę tę potwierdzają badania prowadzone przez Kanadyjskie Stowarzyszenie Pojazdów Elektrycznych (EVAC); wynika z nich, że poziom emisji CO₂ w przypadku energii dostarczonej z elektrowni węglowych do pojazdów elektrycznych jest dwukrotnie niższy niż w przypadku pojazdów spalinowych.

Porównanie zużycia energii przez różne układy napędowe w stosunku procentowym do silnika diesla przedstawiono na rys. 2. Dane te pochodzą z badań wykonanych przez Unię Europejską oraz badania terenowe przeprowadzone w Czechach w 2014 r. Różnice w danych wynikają prawdopodobnie z warunków, w których badania były wykonywane. Wyniki prezentują wydajność jednostek napędowych energii w ich wzajemnym stosunku.

Autobusy z napędem CNG są najbardziej energooszczędnym układem napędowym z przedstawi-

nych na rys. 2; zużywają o ponad 20% więcej energii trakcyjnej niż autobusy z silnikiem diesla (dane z badań Unii Europejskiej w 2012 r.). Pojazdami o najmniejszej zużywanej energii są trolejbusy oraz elektrobusesy – ok. 40% w porównaniu z pojazdami z silnikami wysokoprężnymi.

Do zalet elektrobusesów zalicza się też niższe koszty eksploatacji w porównaniu z pojazdami z silnikiem diesla. Świadczą o tym dane przedstawione na rys. 3.

W Czechach przeprowadzono badania, w ramach których obliczono koszt zużycia energii 12-metrowego autobusu (w zależności od zastosowanego układu napędowego). Najbardziej kosztowne są autobusy z silnikiem diesla. Natomiast najbardziej korzystnym pod względem ekonomicznym układem napędowym są pojazdy napędzane energią elektryczną – trolejbusy i elektrobusesy. Różnica między tymi środkami transportu w kosztach eksploatacyjnych wynikała z mniejszej masy elektrobusesów niż trolejbusów. W warunkach polskich natomiast o opłacalności eksploatacji elektrobusesów, pomimo ich wyższych cen zakupu, decydują głównie niższe koszty eksploatacyjne w porównaniu do autobusów z silnikiem diesla i niewielkie koszty infrastruktury w porównaniu z trolejbusami. Dodatkowo, wg modelu opracowanego przez M. Wolańskiego, z analizy opłacalności eksploatacji autobusów, trolejbusów i elektrobusesów (przy uwzględnieniu kosztów zewnętrznych i w zależności od intensywności usług, czyli liczby kursów), wynika, że w warunkach krajowych wytwarzania energii elektrobusesy stają się mniej opłacalne od trolejbusów wtedy, gdy liczba ich kursów w sieci przekracza 420 dziennie. Elektrobusesy charakteryzują się natomiast wyższą opłacalnością od autobusów – niezależnie od intensywności obsługi [22].

Zaletą elektrobusesów jest także niski hałas w trakcie eksploatacji. Poziom hałasu autobusów elektrycznych jest znacznie mniejszy niż autobusów o silnikach spalinowych. Hałas elektrobusesu podczas postoju wynosi około 63 dB (słychać tylko pracujące urządzenia pomocnicze), a autobusu napędzanego dieslem – 80 dB. Podczas ruchu elektrobusesy emitują hałas w granicach 69 dB, a autobusy spalinowe – ok. 77 dB. Bardzo ciche przemieszczanie się autobusów elektrycznych zwiększa komfort podróżujących pasażerów, lecz może być też przyczyną wielu niebezpiecznych zdarzeń z udziałem pieszych, którzy nie słyszą zbliżającego się pojazdu.

Elektrobusesy pod względem cech ekologicznych posiadają bardzo dużo zalet. Ich silniki zużywają mniej energii (przy większej sprawności) niż autobusy o konwencjonalnym napędzie. Ponadto autobusy elektryczne mogą wykorzystywać zjawisko rekuperacji energii, czyli odzyskiwania energii podczas hamowania. Nie emitują żadnych spalin w miejscu świadczenia usług (tylko w punktach ładowania). Charakteryzują się też bardzo cichą pracą silnika.

Charakterystyka komunikacji miejskiej w Sopocie i główne założenia wprowadzenia autobusów elektrycznych do eksploatacji w tym mieście

ieć transportu zbiorowego w Sopocie tworzą linie kolejowe organizowane przez Marszałka Województwa Pomorskiego, linie trolejbusowe oraz linie autobusowe. Za organizowanie publicznego komunalnego transportu zbiorowego na określonych liniach komunikacyjnych, na mocy porozumień międzygminnych, odpowiadają miasta Gdańsk i Gdynia.

W Sopocie znajdują się 3 przystanki kolejowe, będące elementami 2 linii kolejowych: 202 i 250. Przewoźnikami realizującymi usługi transportu kolejowego na terenie miasta są: PKP Przewozy



Volvo 7900 electric w Göteborgu. Fot. <http://www.goteborgelectricity.se>

Regionalne, PKP Intercity S.A. oraz PKP Szybka Kolej Miejska w Trójmieście sp. z o.o. SKM umożliwia wykonywanie przewozów pasażerskich z Sopotu do Gdańska, Gdyni i innych pobliskich miejscowości elektrycznymi zespołami trakcyjnymi, kursującymi przez całą dobę z częstotliwością wynoszącą 10 min w czasie szczytu przewozowego.

Transport autobusowy w analizowanym mieście jest organizowany przez ZKM Gdynia i ZTM Gdańsk. W Sopocie funkcjonuje 12 linii autobusowych. ZTM w Gdańsku odpowiada za organizowanie transportu na liniach nr 117, 122, 143 i N1. ZKM Gdynia organizuje transport na 8 liniach autobusowych w Sopocie. Są to linie nr: 144, 177, 181, 185, 187, 244, 287 i S.

Trolejbusy w Sopocie kursują na 2 liniach: linii nr 21 w relacji Sopot Reja–Gdynia Dworzec Główny PKP oraz linii nr 31 w relacji Sopot Reja–Gdynia Kacze Buki/Gdynia Dąbrowa Miętowa. Organizatorem transportu trolejbusowego jest ZKM Gdynia.

Łączna liczba pasażerów korzystająca z transportu zbiorowego w Sopocie w 2015 r. wyniosła 6 971 882 osób, natomiast łączna liczba wozokilometrów transportu autobusowego w Sopocie w 2015 r. wyniosła 1 091 183 km.

W niniejszym opracowaniu poddano analizie 4 warianty wprowadzenia elektrobusesów w Sopocie. Warianty te różnią się taborem obsługującym miasto, a mianowicie:

- ♦ wariant 0 – bazowy, zakładający obsługę autobusami z silnikiem spalinowym i trolejbusami w warunkach charakterystycznych dla 2016 r.;
- ♦ wariant I, zakładający zastąpienie autobusów i trolejbusów autobusami elektrycznymi;
- ♦ wariant II, zakładający zastąpienie autobusów elektrobusesami oraz utrzymanie w eksploatacji trolejbusów;
- ♦ wariant III, zakładający obsługę Sopotu wyłącznie autobusami z silnikami Euro 6.

W analizie jako parametry wejściowe wykorzystano dane z 2015 r., które otrzymano z ZKM w Gdyni i miasta Sopot. Dla porównania skali ekologicznego oddziaływania przytoczono także wyniki badań ograniczające się do oferty realizowanej przez ZKM w Gdyni.

Przy planowaniu wariantów wprowadzenia elektrobusesów do obsługi Sopotu uwzględniono:

- ♦ liczbę pasażerów podróżujących poszczególnymi liniami i kursami;

- ♦ przebieg oraz długość trasy poszczególnych linii;
- ♦ częstotliwość kursowania pojazdów na danych liniach;
- ♦ czas postojów na przystankach krańcowych;
- ♦ możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury do zasilania elektrobusów;
- ♦ sposób pozyskiwania energii potrzebnej do zasilania elektrobusów i inne [6].

Głównymi celami wprowadzenia autobusów elektrycznych do obsługi miasta są – poza niższymi kosztami eksploatacji – względy ekologiczne. Elektrobusy charakteryzuje brak emisji zanieczyszczeń (zwłaszcza CO₂) w miejscu świadczenia usług transportowych. Z punktu widzenia efektów regionalnych i krajowych sytuacja przedstawia się niekorzystnie z powodu obecnej struktury produkcji energii elektrycznej. W Polsce obecnie większość energii elektrycznej jest pozyskiwana z węgla kamiennego i brunatnego (razem około 85%). Udział innych źródeł energii, a w szczególności odnawialnych źródeł energii, jest znikomy i wynosi ok. 5%. Zanieczyszczenia emitowane przez elektrownie za pośrednictwem eksploatowanych autobusów elektrycznych, a także trolejbusów czy tramwajów, łatwiej jednak neutralizować w stacjonarnych źródłach emisji niż w przypadku wielu rozproszonych źródeł mobilnych.

W analizie rozpatrzono dwa przypadki emisji zanieczyszczeń przez autobusy elektryczne: w ujęciu krajowym (przy wykorzystaniu obecnej struktury krajowej produkcji elektrycznej) oraz w ujęciu lokalnym, czyli praktycznie bezemisyjnym.

Warianty wprowadzenia elektrobusów do obsługi analizowanego miasta opierają się na wymianie taboru. Na podstawie rozkładów jazdy wyliczono, że w godzinach szczytowych na liniach sopockich wykorzystywane są maksymalnie 43 pojazdy, w tym 35 autobusów oraz 8 trolejbusów.

Determinantą wpływającą na sposób funkcjonowania autobusów elektrycznych w systemie transportu miejskiego jest proces ładowania baterii (akumulatorów). Obecne technologie umożliwiają ładowanie baterii za pomocą 3 systemów: złącza wtyczkowego, pantografu oraz pętli indukcyjnej. Zasięg elektrobusów ładowanych w zajezdni wynosi ok. 200 km. Zastosowanie ładowania w systemie *plug-in* (doładowania baterii na przystankach lub pętlach krańcowych) wprowadza ograniczenia wynikające z długości kursu – maksymalnie do 40 km.

Przy zastosowaniu ładowania baterii w zajezdni na 3 liniach sopockich dzienna praca eksploatacyjna na 1 pojazd będzie przekraczać 200 km. Na liniach autobusowych 122 i S oraz na linii trolejbusowej 31 zasięg pojazdu będzie niewystarczający.

Rozwiązaniem tego problemu może być zwiększenie liczby autobusów eksploatowanych na poszczególnych liniach (zwiększenie częstotliwości) lub zamontowanie ładowarek na przystankach krańcowych w celu doładowania baterii elektrobusów. W przypadku doładowywania elektrobusów podczas cyklu dziennego należy uwzględnić czas postoju potrzebny do doładowania baterii (minimum 10 min) oraz ograniczenia wynikające z długości kursu. W przypadku analizowanego miasta czasy postoju na liniach 31, S, 122 wynoszą odpowiednio: 15–50 min, 1–20 min, 2–30 min.

W niniejszym opracowaniu zdecydowano się na zastosowanie ładowarek zajezdniowych oraz krańcowych dla linii, których dzienna praca eksploatacyjna na 1 pojazd przekracza 200 km. Dodatkowo nie planuje się zwiększenia taboru eksploatowanego w Sopocie. Nie zostaną także uwzględnione zmiany w częstotliwości kursowania pojazdów komunikacji miejskiej ani marszrutyzacja linii.

Metodologia analizy DGC

W celu wyboru najkorzystniejszego wariantu wprowadzenia elektrobusów w Sopocie posłużono się analizą efektywności kosztowej (DGC). Analiza DGC polega na wyliczeniu dynamicznego kosztu jednostkowego, który jest równy wartości pozwalającej na uzyskanie zdyskontowanych przychodów równych zdyskontowanym kosztom i nakładom inwestycyjnym.

DGC pokazuje, jaki jest techniczny koszt uzyskania jednostki efektu ekologicznego. Koszt ten jest wyrażony w złotych (PLN) na jednostkę efektu (w analizowanym przypadku będzie to zł/km). Metoda oparta na dynamicznym koszcie jednostkowym (DGC – *dynamic generation cost*) stosowana jest jako standardowe narzędzie oceny ekonomicznej inwestycji. Analiza kosztu technicznego pozwala uszeregować warianty: od najtańszego do najdroższego [18].

W analizie DGC uwzględniono aspekt finansowy w postaci nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych oraz aspekt ekologiczny, uwidaczniający się w redukcji emisji gazów emitowanych do powietrza (dwutlenku węgla CO₂, tlenków azotu NO_x, węglowodorów HC i pyłów PM) w przyjętym okresie czasowym. Wskaźnik DGC wyznaczono według następującego wzoru 1:

$$DGC = p_{EE} = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{KI_t + KE_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{EE_t}{(1+i)^t}} \quad (1)$$

gdzie:

- KI_t – koszty inwestycyjne poniesione w danym roku;
- KE_t – koszty eksploatacyjne poniesione w danym roku;
- i – stopa dyskontowa (8%);
- t – rok od 0 do n ;
- EE_t – efekt ekologiczny;
- p_{EE} – cena za jednostkę fizyczną efektu ekologicznego.

Efekt ekologiczny wyznaczono jako stosunek emisji danego zanieczyszczenia w wariantcie zerowym (bazowym) do emisji danego zanieczyszczenia w wariantcie inwestycyjnym. Interpretacja wskaźnika EE_t :

- ♦ $EE_t > 0$ – osiągnięta redukcja danego zanieczyszczenia w danym wariantcie w stosunku do wariantu bazowego;
- ♦ $EE_t < 0$ – osiągnięta wyższa emisja danego zanieczyszczenia w danym wariantcie w stosunku do wariantu bazowego.

Przy szacowaniu zanieczyszczeń w wariantcie bazowym oparto się na danych dotyczących emisji dla pojazdów z silnikiem wysokopiętnym i o normach od Euro 1 do Euro 6.

Przy szacowaniu zanieczyszczeń w wariantcie inwestycyjnych bazowano na danych dotyczących zanieczyszczeń emitowanych przez elektrownie konwencjonalne (w celu zobrazowania emisji zanieczyszczeń w bezpośrednim otoczeniu elektrowni na skutek wprowadzenia autobusów elektrycznych bądź trolejbusów).

Metodologia dynamicznego kosztu jednostkowego (DGC) pozwoliła na porównanie opłacalności i celowości realizacji określonego wariantu w obsłudze poszczególnych rodzajów pojazdów [1].

Wyniki analizy DGC dla wariantów obsługi komunikacyjnej w Sopocie

Porównanie kosztów, nakładów i korzyści ekologicznych wariantów wprowadzenia elektrobusów do obsługi Sopotu w 25-letnim okresie analizy oraz podsumowanie wyników analizy DGC przedstawiono w tab. 1.

Wyniki analizy wskazują, że wprowadzenie elektrobusew na wszystkich liniach sopockich obsługiwanych przez ZTM w Gdańsku i ZKM w Gdyni (wariant I) w okresie 25-letnim zwiększy całkowite wydatki finansowe o ok. 6%, obsługa Sopotu elektrobusem i trolejbusami (wariant II) spowoduje ok. 4-procentowy wzrost wydatków w stosunku do stanu obecnego, a wprowadzenie na analizowanych liniach autobusów z silnikami o normie Euro 6 zwiększyłoby wydatki o ok. 11%.

Wariant bazowy charakteryzuje się najniższymi nakładami inwestycyjnymi taborowymi oraz najniższą całkowitą sumą kosztów i nakładów w 25-letnim okresie analizy. To oczywiste w sytuacji, gdy wydatki w tym wariantcie ograniczają się do pokrycia kosztów eksploatacyjnych i amortyzacji pojazdów już w określonym stopniu wyeksploatowanych. Najwyższymi wydatkami (nakładami inwestycyjnymi i kosztami) charakteryzuje się wariant III, zakładający obsługę Sopotu wyłącznie nowymi autobusami z silnikami Euro 6.

Interesujące są wyniki analizy DGC, wskazujące na procentową zmianę emisji szkodliwych substancji do środowiska. Z regionalnego i krajowego punktu widzenia wzrost udziału taboru

elektrycznego przynosi korzyści tylko w zakresie emisji CO₂. Przy obecnej strukturze produkcji energii elektrycznej wzrost zapotrzebowania na nią spowoduje wzrost emisji do atmosfery związków azotu i pyłu zawieszzonego. Emisja CO₂ zmniejszy się dla wariantów zakładających pełną elektryfikację transportu miejskiego w Sopocie o ok. 2/3, natomiast w przypadku wprowadzenia do obsługi autobusów spełniających normę Euro 6 o 25%.

Ekologiczny efekt lokalny jest już bardziej spektakularny. Założono dla Sopotu w pewnym uproszczeniu „zerową” emisję w miejscu wytwarzania usług, co wyraźnie wskazuje na korzyści lokalne wariantów I i II („elektryfikacyjnych”).

Obliczono także koszty pozyskania efektu ekologicznego, sumując je z wyliczonymi wyżej nakładami i kosztami dla poszczególnych wariantów. Wyniki analizy wskazują, że najbardziej efektywne ekonomicznie jest wdrożenie wariantu III, zakładającego obsługę całego Sopotu autobusami z silnikami Euro 6. Różnice te nie są jednak duże – w stosunku do wariantu I wariant III jest tańszy o 19%, natomiast w stosunku do II – o 16%.

Ocena wariantów na poziomie efektu lokalnego wskazuje, że wariant I jest tańszy niż III o 8%, natomiast II jest tańszy niż III o 11%. Warto zwrócić uwagę na możliwość korzystania z elektrobusew w wariantcie II ze wspólnej infrastruktury z trolejbusami

i zasobów ludzkich oraz wyspecjalizowanego zaplecza technicznego, co może znacznie obniżyć koszty stałe. Przeprowadzone wcześniej podobne obliczenia wyłącznie dla linii autobusowych obsługiwanych przez ZKM w Gdyni pokazały, że wprowadzenie w Sopocie elektrobusew w ujęciu krajowym i lokalnym wykazało podobne tendencje. Dla wariantów dotyczących obsługi tylko autobusami ZKM w Gdyni obliczono także techniczny koszt uzyskania efektu ekologicznego DGC. Wskaźnik DGC dla warunków lokalnych w przypadku wprowadzenia elektrobusew jest niższy niż dla autobusów z silnikami Euro 6 w przekroju: CO₂, NO_x i PM odpowiednio: 3-, 1,2- i 1,1-krotnie. Dla warunków regionalnych wskaźnik DGC dla CO₂ jest niższy dla elektrobusew w porównaniu z autobusami z silnikami Euro 6 2,7-krotnie i w przypadku hałasu prawie 6-krotnie [6].

Podsumowanie

Wprowadzenie autobusów elektrycznych wychodzi naprzeciw zasadom zrównoważonej mobilności w miastach i aglomeracjach. Sopot, jako miasto uzdrowiskowe, położone w rdzeniu metropolii Gdańsk-Gdynia-Sopot, jest predestynowany do wdrażania najnowszych, ekologicznych pojazdów. Jak stwierdzono na wstępie artykułu, wdrażaniu nowych technologii dotyczących pojazdów elektrycznych musi towarzyszyć zmiana struktury produkcji energii elektrycznej. Wzrost popytu będzie sprzyjał modernizacji krajowego przemysłu energetycznego w sposób prowadzący do wydatnego wzrostu źródeł odnawialnych, czystych ekolo-

Tab. 1. Porównanie kosztów, nakładów i korzyści ekologicznych wariantów obsługi Sopotu elektrobusem w 25-letnim okresie analizy oraz wyników analizy DGC

Czynnik porównania	Wariant bazowy	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Nakłady oraz koszty w okresie analizy (25 lat) [zł]				
Nakłady inwestycyjne infrastrukturalne	–	3 230 000	2 470 000	–
Nakłady inwestycyjne taborowe	98 500 000	150 600 000	144 200 000	147 960 000
Koszty eksploatacji pojazdów	190 276 488	150 269 296	146 226 357	171 393 979
Koszty utrzymania infrastruktury	–	2 917 232	5 962 897	–
Suma (koszty + nakłady)	288 776 488	307 016 529	298 859 254	319 353 979
Zmiany w analizie finansowej w okresie 25 lat (wariant bazowy = 100%)				
Nakłady i koszty	100,00%	106,32%	103,49%	110,59%
Efekt ekologiczny – roczna zmiana emisji szkodliwych substancji do środowiska – w skali krajowej (wariant bazowy = 100%)				
CO ₂	100,00%	28,53%	28,53%	75,87%
NO _x	100,00%	268,38%	268,38%	15,92%
PM	100,00%	286,90%	286,90%	9,69%
Efekt ekologiczny – roczna zmiana emisji szkodliwych substancji do środowiska – w skali lokalnej (wariant bazowy = 100%)				
CO ₂	100,00%	0,00%	0,00%	75,87%
NO _x	100,00%	0,00%	0,00%	15,92%
PM	100,00%	0,00%	0,00%	9,69%
Wskaźniki DGC – ujęcie krajowe [zł]				
DGC – CO ₂	–	4 498 941	4 353 067	10 446 166
DGC – Nox	–	42 326 750	40 954 351	2 191 429
DGC – PM	–	45 246 867	43 779 787	1 334 539
Wskaźniki DGC – ujęcie lokalne [zł]				
DGC – CO ₂	–	2,19	2,12	10 446 166
DGC – Nox	–	2,88	2,78	2 191 429
DGC – PM	–	28,02	27,11	1 334 539
Nakłady i koszty po uwzględnieniu wskaźników DGC – ujęcie krajowe [zł]				
Suma	–	399 089 088	387 946 461	333 326 114
Nakłady i koszty po uwzględnieniu wskaźników DGC – ujęcie lokalne [zł]				
Suma	–	307 016 562	298 859 286	333 326 114

gicznie. Władze małych i średnich miast uzdrowskowych mogą na swój sposób wymóc zmianę dotychczasowego podejścia władz centralnych do finansowania inwestycji na rzecz zakupów ekologicznie czystych pojazdów, jednocześnie wskazując na różnice w efektach lokalnych i krajowych, w określonym stopniu wymuszając zmianę struktury produkcji energii elektrycznej. Badania eksploatacyjne przeprowadzone już po opracowaniu niniejszego artykułu wykazały brak możliwości wprowadzenia elektrobusów na linii 187 (obsługiwanej przez ZKM w Gdyni) ze względu na wysokość pojazdów z pantografem w stosunku do wysokości wiaduktów i tuneli występujących na trasie tej linii. W tej sytuacji należy rozważyć możliwość wprowadzenia elektrobusów ładowanych w systemie pętli indukcyjnej i wykonać ponowne przeliczenia, przy czym – zdaniem Autorów – różnice nie będą istotne w skali kosztów obsługi miasta.

Przypisy

¹ *Vehicle to Grid* to system umożliwiający dwukierunkowy przepływ energii między pojazdem elektrycznym a siecią elektroenergetyczną. Sterowanie procesem ładowania i rozładowywania baterii pojazdu może odbywać się zdalnie w zależności od różnych czynników (np. stopnia rozładowania akumulatorów, obciążenia sieci zasilającej). System pozwala na rozliczenie energii, którą właściciel pojazdu „kupił”, ładując swój pojazd, lub „sprzedał”, oddając ją do sieci.

Bibliografia:

1. Analiza finansowo-ekonomiczna dla projektu „Wymiana taboru komunikacji publicznej w lubuskim trójmieście”, 2014.
2. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Trolejbus czy elektrobus na przykładzie Gdyni*, Gdynia 2015.
3. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D., *Integration of recharging infrastructures for electric vehicles in urban transportation system*, Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), IEEE International, 2012.
4. Diez A. E., Diez I. C., Lopera J. A., Bohorquez A., Velandia E., Albarracin A., Restrepo M., *Trolleybuses in Smart Grids as effective strategy to reduce greenhouse emissions*, Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International, 2012.
5. Gerndt H., Stellmacher R., *Battery powered electric buses*, „Transportation Planning and Technology” 1989, Vol. 14, Issue 3.
6. Grzelec K., *Uwarunkowania obsługi transportowej miast elektrobusami na przykładzie Sopotu* [referat wygłoszony na konferencji TranSopot 2016, mps].
7. http://m.infobus.pl/zielone-swiatlo-dla-zielonogorskich-elektrobusow-more_72077.html (dostęp z dnia 12.08.2016 r.).
8. <http://www.srodowisko.abc.com.pl/czytaj/-/artykul/elektryczny-autobus-drozsza-cena-tansza-eksploatacja> (dostęp z dnia 26.07.2016 r.).
9. <http://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/solaris-elektrobusy-moga-jezdzic-juz-24h-na-dobe-939.html> (dostęp z dnia 24.08.2016 r.).
10. Karoń G., *Czy autobus elektryczny może być czynnikiem rozwoju transportu publicznego?*, „Komunikacja Publiczna” 2015, nr 2.
11. Kaus W., *Connector solution for rapid automated charging*, Konferencja „Electricke autobusy pro mesto II Brno – 18.03.2015”, 2015.
12. Kuželka M., *Nabíjení elektrobusů v MHD*, Konferencja „Electricke autobusy pro mesto II Brno – 18.03.2015”, 2015.
13. Kuźmiński J., Gogacz R., Bartosiński T., *Doświadczenia z rocznej eksploatacji autobusów elektrycznych w Warszawie*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 7–8.
14. Merz K. D., Stevenson J. M., *Progress in the design and development of improved lead/acid batteries for electric Buses and vans*, „Journal of Power Sources” 1995, Vol. 53.
15. Molecki A., *Elektryczne środki komunikacji miejskiej*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2015, nr 9.
16. Pohl J., *Elektrobusy pro městská centra*, Conference proceedings „Electricke autobusy pro mesto III”, 2014.
17. Pohl J., *Systémové řešení elektromobility ve městech*, Konferencja „Electricke autobusy pro mesto II Brno – 18.03.2015”, 2015.
18. Rączka J., *Analiza efektywności kosztowej w oparciu o wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego*, Warszawa 2002: <http://docplayer.pl/1607131-Analiza-efektywnosci-kosztowe-j-w-oparciu-o-wskaznik-dynamicznego-kosztu-jednostkowego.html> (dostęp z dnia 24.08.2016 r.).
19. Rusak Z., *Tytuł International Bus of the Year dla new Solaris Urbino electric*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 7–8.
20. Slavik J., *Electric Buses in Urban Transport – The Situation and Development Trends*, „Journal of Traffic and Transportation Engineering” 2014, Vol. 2, No. 1.
21. Vejbor J., *Škoda Electric, trendy v oblasti e-mobility*, Konferencja „Electricke autobusy pro mesto II Brno – 18.03.2015”, 2015.
22. Wołek M., Wyszomirski O. (red.), *The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2013.
23. www.samochodelektryczne.org (dostęp z dnia 30.06.2012 r.).

Autorzy:

dr hab. **Krzysztof Grzelec** – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Łądowej
mgr inż. **Dominik Okrój** – absolwent Wydziału Inżynierii Łądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

Perspectives for the use of electric buses in the public transport in the chosen city – Sopot

Due to the increasing awareness of environmental protection, municipalities seek solutions aimed at reducing emissions. In the transport sector, an innovative solution for reducing emissions is the use of „cleaner” means of transport – electric buses. Electric vehicles are one of the pillars of the policy of sustainable mobility in cities and agglomerations. Ecological aspects, economic (lower operating costs) and a greater flexibility of use in comparison with trams and trolleybuses are the most frequently cited determinants of the introduction of this new type of electric vehicles into operation. Sopot as a spa town in a special degree predestined to support electric vehicles. At the same time functioning in the area of the city trolleybus communication creates certain conditions for the functioning and development of electric buses. The purpose of this paper is to analyze the possibilities and conditions of entry electric buses to support cities and the analysis of variants of service electric buses in the chosen city – Sopot. To evaluate the alternatives analysis was used DGC, which shows the technical cost of obtaining a unit environmental effect (zl/km) and allows alignment variants operating from the cheapest to the most expensive.

Keywords: electric buses, emission, electric propulsion, DGC analysis.