

Arkadiusz JÓŹWIAK\*, Łukasz GUCIEWSKI\*\*, Agnieszka MISZTAL\*\*\*

## METODA ROZMIESZCZENIA INFRASTRUKTURY ŁADOWANIA AUTOBUSÓW ELEKTRYCZNYCH W MIEJSKIM TRANSPORCIE ZBIOROWYM

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2018.078.04

Celem artykułu jest przedstawienie metody rozmieszczenia infrastruktury ładowania autobusów elektrycznych, które w przyszłości mogą być podstawą funkcjonowania miejskiego transportu zbiorowego. Przedstawiono główne aspekty alternatywnych źródeł zasilania w kontekście miejskiego transportu zbiorowego. Następnie opisano podstawowe sposoby ładowania autobusów elektrycznych. Zaproponowano autorską metodę rozmieszczenia stacji ładowania z uwzględnieniem wybranych założeń.

**Słowa kluczowe:** miejski transport zbiorowy, elektrobusesy, infrastruktura ładowania

### 1. WPROWADZENIE

Zagadnienia związane z ochroną środowiska rozwijają się sukcesywnie od połowy XX w., kiedy to na skutek wzrostu świadomości społeczeństwa oraz występowania odczuwalnych skutków nagromadzenia w atmosferze szkodliwych związków zaczęto przeprowadzać badania w tym zakresie. W Unii Europejskiej transport odpowiada za około jedną czwartą wszystkich emisji gazów cieplarnianych, gdyż ponad 90% paliwa zużywanego do transportu jest na bazie ropy naftowej (Göhlich, Fay, Jefferies, Lauth, Kunith, Zhang, 2018). Zauważono, że liczba za-

---

\* Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Logistyki, Instytut Logistyki.

\*\* Wojskowa Akademia Techniczna, II Batalion Szkolny.

\*\*\* Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania.

chorowań (w szczególności układu oddechowego) wzrasta wprost proporcjonalnie do rozwoju przemysłu i transportu, a więc wiąże się z procesem spalania paliw kopalnych, w tym przede wszystkim produktów ropy naftowej oraz węgla kamiennego. Usługi transportowe są niezmiennie istotnym elementem gospodarki i życia społecznego, umożliwiającym skuteczne ich funkcjonowanie (Świdorski, Józwiak, Jachimowski, 2018). Złe funkcjonowanie usług transportowych ogranicza działalność w różnych dziedzinach (Świdorski, 2011). W takiej sytuacji naukowcy podjęli próby eliminacji szkodliwych emisji, polegające w początkowej fazie na wprowadzaniu nowych koncepcji oczyszczania produktów spalania, które były emitowane do środowiska. Dopiero na przełomie lat 80. i 90. XX w. zaczęto kłaść coraz większy nacisk na alternatywne źródła energii, nazywane również „zieloną energią”. Wiele krajów postawiło w tym czasie na energetykę opartą o odnawialne źródła, takie jak elektrownie wiatrowe i wodne. Powrócił też trend pozyskiwania energii z elektrowni atomowych, które w ówczesnie wykorzystywanych wariantach są całkowicie bezpieczne dla środowiska. Również w sektorze transportowym pojawiły się liczne alternatywy dla pojazdów z silnikami spalinowymi. Największy nurt w tym obszarze określany jest mianem elektromobilności, lub e-mobilności, tj. ogólny termin rozwoju elektrycznych, hybrydowych i zasilanych wodorowymi ogniwami paliwowymi układów napędowych w kontrze do napędów całkowicie zasilanych paliwami kopalnymi (Burdzik, Fołęga, Konieczny, Jaworski, 2017).

Przejście z silników spalinowych na zasilanie elektryczne w pojazdach determinuje wiele pozytywnych aspektów. Pojawia się jednak kilka problemów, m.in. ograniczony zasięg pojazdów (również autobusów) elektrycznych i brak urządzeń ładowania. Jest to szczególnie ważne w miejskim transporcie zbiorowym, którego ciągłość i punktualność jest czynnikiem niezbędnym w kwestii wykorzystywania go przez znaczną część mieszkańców zamieszkujących aglomeracje miejskie.

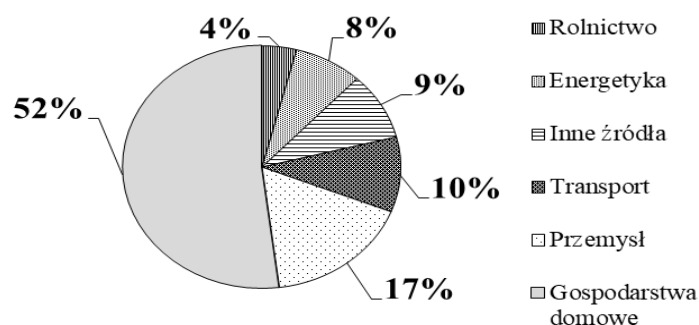
W związku z koniecznością częstego ładowania elektrobusów, w artykule postawiono następujący problem badawczy: w jakich odległościach od siebie powinny znajdować się ładowarki, aby móc efektywnie wykorzystać elektrobusy w transporcie miejskim?

Celem artykułu jest przedstawienie zatem metody rozmieszczenia infrastruktury ładowania autobusów elektrycznych, które mogą być w przyszłości podstawą miejskiego transportu zbiorowego w aglomeracjach miejskich.

W pracy nad artykułem wykorzystano następujące metody badawcze: analizę literatury przedmiotu (opartą m.in. na obowiązujących krajowych i międzynarodowych regulacjach prawnych), modelowanie opisowe (posłużyło do sformułowania i opisanie zebranych informacji) oraz syntezę (umożliwiającą opracowanie wniosków i podsumowanie rozważań).

## 2. MIEJSKI TRANSPORT ZBIOROWY W ASPEKTCIE ALTERNATYWNYCH ŹRÓDEŁ ZASILANIA

Wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa oraz działania na rzecz ochrony środowiska podejmowane przez różnego rodzaju organizacje pozarządowe spowodowały, że zaczęto rozpatrywać funkcjonowanie poszczególnych gałęzi gospodarki przez pryzmat emisji szkodliwych substancji. Dowiedziono, że w zakresie funkcjonowania polskiej gospodarki najczęściej toksycznych związków emitują gospodarstwa domowe (ok. 52% całkowitej emisji), natomiast na drugim miejscu znajduje się branża przemysłowa (z wynikiem oscylującym wokół 17%). Na trzecim miejscu znalazł się sektor transportowy, który reprezentują wszelkie pojazdy kołowe, w tym również autobusy miejskie. Zestawienie głównych źródeł emisji substancji powodujących powstawanie smogu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zestawienie głównych źródeł emisji substancji powodujących powstawanie smogu (www.polskialarmsmogowy.pl)

Emisja spalin, szczególnie z pojazdów z silnikami spalinowymi, zaczęła być postrzegana jako główny powód wielu chorób, a także jako czynnik przekładający się na powstawanie efektu cieplarnianego. W związku z powyższym zaczęto wprowadzać określone regulacje prawne o charakterze międzynarodowym, które narzucały producentom konieczność spełnienia określonych norm w zakresie produkcji następujących związków szkodliwych:

- tlenków azotu,
- cząstek stałych,
- węglowodorów,
- tlenków węgla.

Najnowsze normy europejskie (tzw. Euro 6) z tego są zakresu bardzo restrykcyjne i narzucają ograniczenia szczególnie na pojazdy z silnikami o zapłonie samoczynnym. Powoduje to zwiększenie zainteresowania innymi rodzajami napędu, począwszy od rozwiązań hybrydowych czy też gazowych, po oparte na zasilaniu

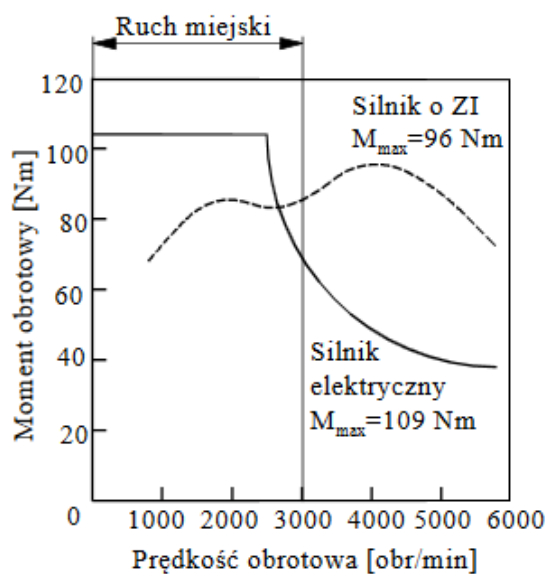
elektrycznym. Trend ten zauważalny jest nie tylko w zakresie transportu indywidualnego. Duże aglomeracje konwertują również swoje floty autobusowe tak, aby transport publiczny był ekologiczny nie tylko ze względu na możliwość przewiezienia większej liczby osób niż w przypadku samochodów osobowych. Istotą tego zjawiska jest stopniowe zbliżanie się do używania „czystej logistyki” w miastach. Warto w tym miejscu nadmienić, że niektóre światowe aglomeracje, takie jak np. Szanghaj, już teraz korzystają w 100% z autobusów elektrycznych.

W związku z wprowadzaniem kolejnych alternatywnych źródeł zasilania pojazdów (w tym również elektrycznych autobusów miejskich) pojawia się wiele spekulacji dotyczących m.in. rzeczywistej emisji spalin powstających podczas wytwarzania energii elektrycznej niezbędnej do ich ładowania, jak również wydajności polskiego systemu energetycznego. Pierwszy aspekt ma swoje częściowe uzasadnienie, bowiem w pełni czystą logistykę będzie można osiągnąć dopiero w momencie wprowadzenia odpowiedniej liczby elektrowni zasilanych również ze źródeł alternatywnych (takich jak wiatr, woda czy paliwo jądrowe). W przypadku Polski większość energii elektrycznej wytwarzana jest w wyniku procesu spalania węgla kamiennego, co w praktyce oznacza tylko transfer zanieczyszczeń z miast, w których poruszają się autobusy, do miejsc, w których znajdują się elektrownie. W przypadku drugiego aspektu również pojawia się pewien problem, który objawia się szczególnie w upalne, letnie dni. Polski system energetyczny nie jest wystarczająco wydajny i nagły wzrost poboru energii (np. w wyniku włączenia dużej liczby klimatyzatorów) może powodować przerwy w dostawach prądu. Podobna sytuacja może wystąpić w chwili użycia wielu ładowarek do autobusów elektrycznych, które zaliczają się do urządzeń o dużym poborze energii elektrycznej. Dlatego też należy wykonać gruntowną modernizację zarówno sieci energetycznych, jak również samych elektrowni w taki sposób, aby móc w przyszłości zabezpieczyć potrzeby związane z szeroko rozumianą elektromobilnością. Jako że będzie to długotrwały proces, należy szczególną uwagę poświęcić jak najbardziej efektywnemu rozmieszczeniu urządzeń ładowania, które są niezbędne do funkcjonowania pojazdów elektrycznych już w chwili obecnej.

### 3. KONCEPCJA AUTOBUSÓW ELEKTRYCZNYCH

Opisane w poprzednim rozdziale artykułu aspekty związane z ekologią wskazują jednoznacznie na konieczność stosowania alternatywnych źródeł zasilania we wszystkich niemalże sektorach gospodarki. Również w miejskim transporcie zbiorowym nie da się uniknąć zjawiska elektryfikacji, skąd wynika bezpośrednio koncepcja wymiany autobusów o napędzie konwencjonalnym na elektryczne. Autobusy elektryczne, czyli pojazdy napędzane silnikami elektrycznymi zasilanymi z baterii, stanowią główną alternatywę dla obecnej floty transportu w polskich miastach, zło-

zonych w większości z pojazdów zasilanych olejem napędowym. Charakteryzują je osiągi porównywalne z opisywanymi uprzednio alternatywnymi autobusami, a zasięg efektywny wynosi co najmniej 100–120 km. Silniki stanowiące podstawę napędu tych pojazdów dzielą się dwa rodzaje, tj. prądu stałego i zmiennego. W pierwszych konstrukcjach w tym obszarze wykorzystywano pierwszy rodzaj konstrukcji (łatwość uzyskania zmiennych prędkości obrotowych), jednak rozwój elektroniki umożliwił zastosowanie również silników prądu zmiennego. Elektrobusy charakteryzuje wiele zalet – oprócz opisanych na wstępie aspektów ekologicznych mają one dużą przewagę nad jednostkami spalinowymi również pod względem trakcyjnym. Dokładnie przewaga ta odnosi się do przebiegu momentu obrotowego, który charakteryzują wysokie wartości, spadające dopiero w zakresie ok. 2500 obr./min. Wtedy moment zaczyna się obniżać, niemniej jednak nie ma to większego wpływu na jazdę w ruchu miejskim (wyższe prędkości obrotowe uzyskuje się tylko na dłuższych trasach). Zobrazowano to na rysunku 2, przedstawiającym zależności momentu i prędkości obrotowej dla silników autobusowych.



Rys. 2. Porównanie krzywej przebiegu momentu obrotowego silnika o zapłonie iskrowym o mocy 48 kW do elektrycznego (moc 23 kW) (Koncepcja..., 2014)

Z powyższego rysunku wynika jeszcze jeden, bardzo ważny wniosek. Mianowicie silniki elektryczne wykorzystywane w autobusach osiągają optymalną wartość momentu obrotowego już od startu silnika. Dla porównania silniki spalinowe uzyskują go dopiero w przedziale 1500–2000 obr./min. (ZS) lub 3500–4500 obr./min. (ZI).

Należy podkreślić, że wprowadzenie elektrobusów jest rozwiązaniem nieuniknionym, jednakże w tej chwili wiąże się z nim zasadniczy problem, dotyczący braku infrastruktury ładowania.

#### 4. SPOSOBY ŁADOWANIA ELEKTROBUSÓW

Podstawowym warunkiem funkcjonowania autobusów elektrycznych jest konieczność wybudowania stacji ładowania baterii. Podczas gdy w obszarze pojazdów elektrycznych stacje ładowania są mniej więcej znormalizowane w zależności od dostarczonego poziomu mocy zgodnie z SAE lub agencji IEC, to w przypadku autobusów elektrycznych, takich standardów nie ma, lub są w fazie rozwoju (Jara, Blahnik, 2016). Dodatkowo w obszarze tym pojawia się kilka innych podstawowych problemów, a każdy z nich łączy wspólny mianownik, którym są koszty. Pierwszy z nich dotyczy liczby stacji ładowania, która ze względu na niewielki zasięg autobusów elektrycznych musi być odpowiednio duża (zakładając pełną elektryfikację transportu miejskiego w przyszłości), co znacząco wpływa na koszt całkowity zapewnienia infrastruktury ładowania (Kunith, Goehlich, Mendeleevitch, 2014). Drugim problemem jest nierozwiązana do tej pory kwestia struktury energetycznej państwa, która opiera się w pełni na elektrowniach węglowych. Trzecia – dotyczy konieczności wybudowania różnego rodzaju stacji ładowania. Wiąże się to bezpośrednio z niewielkim zasięgiem pojazdów elektrycznych, które muszą być doładowywane również poza miejscami długotrwałego postoju, takimi jak zajezdnie autobusowe. Wyróżnia się trzy rodzaje urządzeń ładowania, do których zaliczają się:

- zewnętrzne ładowarki, montowane w zajezdniach (wyposażone w złącza typu *plug-in*),
- urządzenia indukcyjne, umożliwiające bezdotykowe pobieranie energii z urządzenia przez baterie autobusu,
- ładowarki pantografowe, doprowadzające prąd do autobusów przez urządzenia zbliżone do tych, które są wykorzystywane przez tramwaje i trolejbusy.

Co więcej, urządzenia szybkiego ładowania dostępne na rynku oparte są na różnych technologiach sprzęgania, co również wpływa negatywnie na cały proces elektryfikacji autobusów miejskich (Rogge, Wollny, Sauer, 2015). Należy nadmienić, że istnieje jeszcze inna opcja, której celem (podobnie jak w poprzednich przypadkach) jest podtrzymanie autobusu w stanie używalności. Jest to szybka wymiana baterii, którą jednak stosuje się rzadko, przede wszystkim ze względu na czas potrzebny do zrealizowania tej czynności oraz trudny dostęp do baterii w przypadku niektórych elektrobusów.

Zestawienie metod ładowania baterii autobusów elektrycznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Metody ładowania baterii autobusów elektrycznych

| Metoda                   | Opis                                                                                                                                              | Wady                                                                                                                                                           |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ładowanie z pantografu   | Ładowanie za pomocą stacji pantografowej, ułożonej zazwyczaj na końcu linii autobusowej.                                                          | Konieczność wyposażenia elektrobusów w pantografy, mała interoperacyjność sprzętu (różne pantografy i stacje ładowania).                                       |
| Ładowanie indukcyjne     | Szybkie ładowanie podczas krótkich postojów, nie wymaga bezpośredniego łączenia podzespołów (metoda bezdotykowa).                                 | Duży pobór mocy (ze względu na konieczność szybkiego ładowania), brak tego typu ładowarek w Polsce.                                                            |
| Ładowanie <i>plug-in</i> | Polega na podłączeniu za pomocą przewodu z wtyczką gniazda baterii z ładowarką. Realizowane jest w zajezdniach autobusowych.                      | Możliwość ładowania tylko w zajezdniach autobusowych, długi czas ładowania.                                                                                    |
| Zamiana baterii          | Metoda polegająca na szybkiej wymianie baterii rozładowanych (które w czasie po wyjęciu z autobusu mogą być z powrotem doładowane) na naładowane. | Ograniczone możliwości szybkiej wymiany baterii (trudny dostęp, długi czas demontażu), konieczność zakupu więcej niż jednego kompletu baterii na jeden pojazd. |

Źródło: opracowanie własne.

Zewnętrzne ładowarki typu *plug-in*, to zewnętrzne urządzenia, zazwyczaj montowane w zajezdniach autobusowych. Są one uniwersalne i nadają się do podłączenia gniazd ładowania autobusów różnych producentów. Dodatkowo są w stanie obsługiwać od kilku do kilkunastu pojazdów jednocześnie. Charakteryzują się różną mocą wyjściową, niemniej jednak najczęściej spotykanym standardem są ładowarki o mocy ok. 200 kW, które w ciągu godziny są w stanie w pełni naładować baterie autobusu (Politechnika Poznańska, 2014, s. 68). Do zalet tego rozwiązania należą przede wszystkim niskie koszty zakupu i eksploatacji, a także uniwersalność i wydajność (możliwość ładowania więcej niż jednego pojazdu jednocześnie). Z drugiej jednak strony posiada ono następujące wady:

- niekompatybilność z ładowarkami przeznaczonymi dla samochodów osobowych,
- konieczność ręcznej obsługi złącza ładowania.

Przykład ładowarki typu *plug-in* w zajezdni autobusowej MPK w Krakowie przedstawiono na rysunku 3.

Indukcyjne urządzenia ładowania są rozwiązaniem ładującym baterie autobusów elektrycznych bez konieczności fizycznego podłączenia pojazdu do ładowarki (tzw. ładowanie bezdotykowe). Są one zazwyczaj montowane w jezdni, w ramach infrastruktury przystankowej, co umożliwia doładowanie baterii nawet podczas postoju determinowanego koniecznością wejścia pasażerów do autobusu. Największą zaletą niniejszego rozwiązania jest korzystne umieszczenie infrastruktury ładowania, która jest praktycznie niewidoczna i nie wymaga dodatkowych urządzeń

ingerujących w plan zagospodarowania przestrzeni wokół przystanków. Co więcej, nie jest wymagane manualne podłączanie ładowarki – praca kierowcy w tym zakresie ogranicza się jedynie do zatrzymania autobusu w odpowiednim miejscu zatoki przystanku (nad ładowarką). Należy jednak pamiętać, że sprawność takiego urządzenia jest niska, co determinują przede wszystkim straty wynikające z bezstykowego przepływu energii. Jest to główna wada, biorąc pod uwagę ograniczone możliwości polskiego systemu energetycznego. Drugą wadą są koszty, jakie niesie za sobą montaż ww. infrastruktury – przewyższa ona kilkukrotnie cenę ładowarek typu *plug-in* oraz pantografów. Schemat ładowarki indukcyjnej oraz odbiorników prądu na pojeździe firmy Scania przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Ładowarka typu *plug-in* w zajezdni autobusowej MPK w Krakowie (www.radiokrakow.pl)



Rys. 4. Schemat ładowarki indukcyjnej oraz odbiorników prądu na pojeździe firmy Scania (www.scania.com)



Ostatnim opisywanym rodzajem urządzeń ładowania elektrobusey są pantografy, które również umożliwiają całkowicie zautomatyzowany proces ładowania autobusu podczas postoju. W praktyce kierowca pojazdu ustawia się bezpośrednio pod urządzeniem, a z górnej części autobusu wysuwane jest przyłącze, które odpowiada za połączenie elektryczne z ładowarką. Dzięki tej opcji możliwe jest ładowanie pojazdów bez konieczności zjeżdżania do zajezdni. Tego typu urządzenia są montowane na końcu tras autobusów – w Warszawie ładowarka pantografowa znajduje się m.in. na końcu linii 222 (Józwiak, Guciewski, 2018). Należy podkreślić, że autobusy elektryczne korzystające z tego typu urządzeń muszą być wyposażone w odpowiednie przyłącza. Niestety, największą wadą tego rozwiązania jest brak dokumentów normatywnych regulujących wymagania dla producentów elektrobusey – interoperacyjność ładowarek ogranicza się do jednej marki pojazdów. Przykładowo, po sfinalizowaniu przetargu i dostarczeniu autobusów przez lubelską firmę Ursus dla warszawskiego ZTM okazało się, że ładowarki pantografowe przeznaczone dla dotychczas użytkowanych pojazdów elektrycznych nie są z nimi kompatybilne. Wymusiło to na Zarządzie Transportu Miejskiego tymczasowe przekierowanie nowych elektrobusey na inne trasy, a w drugiej kolejności do zakupu nowych pantografów pasujących do produktów Ursusa. Autobus elektryczny marki Solaris podczas ładowania z wykorzystaniem pantografu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Autobus elektryczny marki Solaris podczas ładowania z wykorzystaniem pantografu ([www.ztm.waw.pl](http://www.ztm.waw.pl))

Problematyka infrastruktury ładowania w warunkach polskich miast sprowadza się przede wszystkim do bardzo małej dostępności ładowarek. Zazwyczaj używa się stacji typu *plug-in*, w ostatnim czasie zarejestrowano również pojawienie się nielicznych pantografów. Obecnie w żadnym polskim mieście nie ma ładowarek

indukcyjnych dostępnych na przystankach. Należy więc podkreślić, że ładowanie typu pantografowego i indukcyjnego to dopiero przyszłość, jednakże już teraz warto rozważyć kolejny problem, który wiąże się bezpośrednio z wprowadzeniem ich do użytku, a mianowicie kwestią umieszczania takich ładowarek na trasach autobusów. Należy również pamiętać, że jest to dodatkowa infrastruktura zaliczająca się do inteligentnych systemów transportowych. Natomiast nie zdefiniowano oddziaływania poszczególnych urządzeń ITS na odbiorców, tj. uczestników ruchu drogowego, a także właściwego sposobu rozmieszczania tych urządzeń w ramach budowanej infrastruktury drogowej. Powoduje to pewną dowolność w zakresie doboru rozwiązań funkcjonalnych, organizacyjnych, czy sprzętowych (Kamiński et al., 2016).

## 5. METODA ROZMIESZCZENIA ŁADOWAREK

Koncepcja rozmieszczania ładowarek indukcyjnych oraz pantografowych powinna uwzględniać zasadnicze składowe determinujące utrzymanie poziomu naładowania baterii na wszystkich odcinkach w taki sposób, aby możliwe było utrzymanie pojazdów w ciągłym ruchu (bez konieczności nieplanowanych postojów, również w warunkach zimowych, kiedy zapotrzebowanie na energię rośnie, a faktyczna wydajność baterii spada). Do tych składowych zaliczono:

- średni zasięg autobusu elektrycznego (wynoszący ok. 100 km),
- długość linii autobusowej (średnia na przykładzie Warszawy, to ok. 12 km),
- liczbę autobusów elektrycznych, która jest wykorzystywana na danej linii,
- współczynnik warunków eksploatacji.

Wymienione składowe pozwalają wstępnie oszacować odległość pomiędzy ładowarkami, które muszą zostać zainstalowane na trasie danej linii autobusowej. Aby ich rozmieszczenie było efektywne, można skorzystać z następującego autorskiego wzoru:

$$D_{\text{ŁAD}} = \frac{\dot{S}_z \times L_A \times W_{WE}}{D_L} \quad (1)$$

gdzie:

$D_{\text{ŁAD}}$  – odległość między ładowarkami [km]

$\dot{S}_z$  – średni zasięg autobusu elektrycznego [przyjęto 100 km],

$L_A$  – liczba autobusów elektrycznych kursujących w ramach jednej linii,

$W_{WE}$  – współczynnik warunków eksploatacji,

$D_L$  – długość linii autobusowej [km].

Współczynnik warunków eksploatacji  $W_{WE}$  jest zmienną, dla której przyjmuje się iloczyn współczynnika pory roku ( $P_r$ ) oraz kongestii ( $K$ ). Współczynnik kongestii zależy od wielu czynników. Na przykładzie Warszawy głównym warunkiem,

który został przyjęty, było ulokowanie danej trasy w dzielnicach położonych w centrum miasta. Jest to uwarunkowane faktem, że właśnie w tych rejonach porusza się najwięcej pojazdów, szczególnie w godzinach szczytu. W związku z powyższym współczynnik warunków eksploatacji można obliczyć z wykorzystaniem poniższego wzoru:

$$W_{WE} = P_r \times K \quad (2)$$

gdzie:

- $P_r$  – współczynnik pory roku, wynosi odpowiednio:
- $P_{rl}$  – 0,5 – dla pory letniej,
- $P_{rz}$  – 0,6 – dla pory zimowej,
- $P_{rwj}$  – 0,8 – dla pory wiosenno-jesiennej;
- $K$  – współczynnik kongestii, który wynosi:
- $K_c$  – 0,6 – dla tras przebiegających przez obszar położony w centrum miasta (o największym natężeniu ruchu),
- $K_p$  – 0,9 – dla pozostałych linii.

Opisany współczynnik pory roku ma przypisane trzy różne wartości. Zostały one przyjęte w taki sposób, aby w jak największym stopniu odzwierciedlić warunki eksploatacji najbardziej wrażliwego na zmiany temperatury oraz intensywności użytkownika podzespołu, jakim są baterie. Zgodnie z powyższym, najniższy współczynnik  $P_r$  przypisano porze letniej, gdyż właśnie w tym okresie obciążenie baterii autobusów jest największe (konieczność ciągłego użytkowania systemu klimatyzacji). Niewiele większa (o 0,1) jest wartość współczynnika dla pory zimowej (ten czas obfituje w mroźne dni, w których kierowca autobusu musi używać ogrzewania niemalże w trybie ciągłym). W takim wypadku baterie powinny być (i większości dostępnych na rynku pojazdów są) ogrzewane w celu uniknięcia zmniejszenia ich wydajności. Największy współczynnik przydzielono porze wiosennej i jesiennej, kiedy to temperatury powietrza są umiarkowane, dzięki czemu nie wpływają bezpośrednio na kondycję baterii oraz nie wymagają ciągłego użytkowania mediów takich jak klimatyzacja.

Biorąc pod uwagę opisane powyżej elementy, na podstawie przyjętego wzoru można obliczyć odległość między ładowarkami ( $D_{LAD}$ ) dla dwóch przypadków, tj. dla tras o dużej kongestii oraz tych, które są położone poza obszarami centralnymi miasta. Ze względu na rozpatrywanie najmniej korzystnego z punktu widzenia eksploatacji przypadku przyjęto współczynnik pory roku dla okresu letniego (0,5).

Do obliczeń przyjęto:

- $L_A = 4$ ,
- $D_L = 25$  km.

Wykorzystując powyższe założenia i wzór 1, otrzymano:

$$D_{LAD} = \frac{\dot{S}_Z \times L_A \times W_{WE}}{D_L}$$

$$D_{\text{ŁAD1}} = \frac{100 \text{ km} \times 4 \times 0,5 \times 0,6}{25 \text{ km}}$$

$$D_{\text{ŁAD1}} = 4,8 \text{ km}$$

$$D_{\text{ŁAD2}} = \frac{100 \text{ km} \times 4 \times 0,5 \times 0,9}{25 \text{ km}}$$

$$D_{\text{ŁAD2}} = 7,2 \text{ km}$$

Z powyższych obliczeń wynika, że ładowarki dla 4 elektrobusów jeżdżących na linii o średniej długości (25 km) powinny znajdować się co ok. 4,8 km na odcinkach zatłoczonych oraz co ok. 7,2 km na pozostałych trasach. Takie rozstawienie pozwoli na możliwość doładowania autobusów na odcinkach między końcem trasy a zajezdnią, dzięki czemu odciążone zostałyby ładowarki pantografowe oraz złącze *plug-in* wykorzystywane w wymienionych miejscach. Jest jednak jeden warunek – ze względu na konieczność szybkiego doładowania, które nie zaburzy ruchu autobusów i nie spowoduje opóźnień, rekomenduje się wykorzystanie w tym przypadku ładowarek indukcyjnych, wbudowanych w nawierzchnię jezdni przy przystankach autobusowych.

Możliwe jest również wykorzystanie innych dostępnych metod z obszaru sztucznej inteligencji m.in. sieci neuronowych, które zapewniają rozwiązywanie problemów związanych z nieliniowością (Świdorski, 2009) do zaprojektowania rozmieszczenia stacji ładowania.

## 6. PODSUMOWANIE

Celem artykułu było przedstawienie metody rozmieszczenia infrastruktury ładowania autobusów elektrycznych w miejskim transporcie zbiorowym. Postawiony problem badawczy został rozwiązany, a powyższy cel osiągnięty, ponieważ przedstawiono wstępną analizę rozmieszczania pantografowych i indukcyjnych stacji ładowania. Z powyższych analiz wynikają następujące wnioski:

- w polskich miastach występuje zbyt mało stacji ładowania elektrobusów, co znacznie wydłuża proces ich wdrażania;
- obecnie w Polsce nie ma ani jednej stacji ładowania indukcyjnego, która jest podstawą podtrzymania autobusu w ruchu (szybkie, bezdotykowe ładowanie);
- zgodnie z obecnymi osiągnięciami autobusów elektrycznych, aby efektywnie wykorzystywać te pojazdy, należy umieszczać pantografowe lub indukcyjne stacje ładowania co min. 7 km;

- należy wziąć pod uwagę konieczność modernizacji polskiego systemu energetycznego przed całkowitą elektryfikacją transportu publicznego, celem zapobieżenia transferowi zanieczyszczeń oraz ewentualnym spadkom dostaw energii.
- Co więcej, wpływ elektryfikacji autobusów na dużą skalę na sieć elektryczną musi zostać dokładnie oceniony w przyszłych badaniach, gdzie koszty powinny być głównym tematem zainteresowania (Xylia, Leduc, Patrizio, 2017).

## LITERATURA

- Burdzik, R., Fołęga, P., Konieczny, Ł., Jaworski, R. (2017). *E-mobilność – wyzwanie teraźniejszości*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport.
- Göhlich, D., Fay, T-A, Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., Zhang X. (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4, e15.
- Jara, M., Blahnik, V. (2016). *Cost-effective medium-power charging station for public transport vehicles*. *Applied Electronics (21ST International Conference on Applied Electronics (AE))*, 103-106.
- Józwiak, A., Guciewski, Ł. (2018). *Wybrane aspekty ekologii w miejskim transporcie drogowym*. Warszawa: Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej.
- Kamiński, T., Niezgoda, M., Siergiejczyk, M., Oskarbski, J., Świdorski, A., Filipek, P. (2016). *Wpływ stosowania usług inteligentnych systemów transportowych na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego*. Warszawa: Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej.
- Koncepcja wprowadzenia do eksploatacji autobusów elektrycznych w lubelskiej komunikacji miejskiej* (2014). Poznań: Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu.
- Kunith, A., Goehlich, D., Mendelevitch, R. (2014). *Planning and optimization of a fast-charging infrastructure for electric urban bus systems*. *Proceedings of the Second International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE)*, 43-50.
- Rogge, M., Wollny, S., Sauer, D.U. (2015). Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport-A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies*, 8, 5, 4587-4606.
- Świdorski, A. (2011). *Modelowanie oceny jakości usług transportowych*. Warszawa: Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport.
- Świdorski, A., Józwiak, A., Jachimowski, R. (2018). Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 20 (2):2920299.
- Świdorski, A. (2009). Studies and quality assurance neural modeling of the technical transport means. *Archives of Transport*, 21 (3-4).
- Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P. et al. (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 78, 183-200.
- [www.polskialarmmogowy.pl](http://www.polskialarmmogowy.pl) (11.03.2018).
- [www.radiokrakow.pl](http://www.radiokrakow.pl) (12.07.2018).
- [www.scania.com](http://www.scania.com) (12.07.2018).
- [www.ztw.waw.pl](http://www.ztw.waw.pl) (07.03.2018).

**METHOD OF DISTRIBUTION OF THE INFRASTRUCTURE FOR CHARGING  
ELECTRIC BUSES IN URBAN COLLECTIVE TRANSPORT**

## Summary

The purpose of the article is to present the method of deployment of charging infrastructure for electric buses, which may be the basis for the functioning of urban public transport in the future. The main aspects of alternative power sources in the context of urban public transport are presented. Additionally, the basic methods of charging electric buses are described. The article contains author's method for deployment for charging stations, taking into account selected assumptions.

**Keywords:** urban collective transport, electro buses, charging infrastructure