

**Krzysztof Krawiec**

Politechnika Śląska, Wydział Transportu

## **PROCES WPROWADZANIA AUTOBUSÓW ELEKTRYCZNYCH DO EKSPLOATACJI W PRZEDSIĘBIORSTWACH KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ – WYBRANE ZAGADNIENIA**

Rękopis dostarczono: marzec 2016

**Streszczenie:** W związku z koniecznością ochrony środowiska naturalnego, rosnącą świadomością ekologiczną pasażerów oraz presją polityki transportowej Unii Europejskiej oraz podejmowane są kroki mające na celu wymianę taboru autobusowego z konwencjonalnym napędem spalinowym na tabor wyposażony w alternatywne środki napędu, w tym w napęd elektryczny. Zagadnienie wprowadzania autobusów elektrycznych do eksploatacji w przedsiębiorstwach komunikacji miejskiej jest złożone i wymaga wielowymiarowej analizy pod kątem technicznych, operacyjnych, ekologicznych i ekonomicznych kryteriów. W artykule przedstawiono propozycje strategii organizacyjnych dla przedsiębiorstw komunikacji miejskiej w zakresie wdrażania autobusów z napędem elektrycznym oraz omówiono poszczególne aspekty techniczne i ekonomiczne specyficzne dla stosowania napędu elektrycznego w publicznym transporcie zbiorowym. Przedmiotem artykułu jest omówienie aspektów techniczno-ekonomicznych procesu wdrażania autobusów elektrycznych w przedsiębiorstwie komunikacji miejskiej.

**Słowa kluczowe:** publiczny transport zbiorowy, autobusy elektryczne, struktura kosztów

### **1. WPROWADZENIE**

Obecnie zdecydowaną część floty autobusów w przedsiębiorstwach komunikacji miejskiej stanowią konwencjonalne autobusy (oparte na wysokoprężnym silniku Diesla) [5],[7, 8]. Zagadnienie wymiany floty autobusów publicznego transportu zbiorowego z autobusów konwencjonalnych na autobusy z napędem alternatywnym (m. in. napęd elektryczny) jest procesem długotrwałym, jednak jej wdrożenie może doprowadzić do redukcji przez przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej emisji szkodliwych substancji [6]. Należy oczekiwać, że procentowy udział pojazdów wyposażonych w napędy alternatywne, w tym napęd elektryczny, z roku na rok będzie się powiększał - taka tendencja byłaby zgodna z polityką Unii Europejskiej zapisaną w Białej Księdze Transportu z 2011 r. [2, 9]. Dotychczasowe

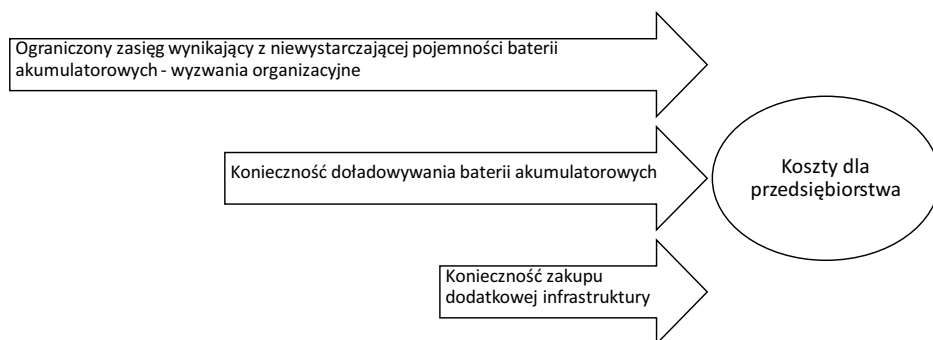
doświadczenia związane z zagadnieniem wprowadzania autobusów elektrycznych do publicznego transportu zbiorowego wskazują na duże powiązania technicznych, organizacyjnych i ekonomicznych aspektów ich wdrażania [13].

## 2. SPECYFIKA UŻYTKOWANIA POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

Pojazdy elektryczne charakteryzują się odmienną niż pojazdy konwencjonalne specyfiką wynikającą z zastosowanego w nich napędu elektrycznego. Napęd ten charakteryzuje się większym momentem obrotowym i wysoką w porównaniu z silnikiem spalinowym sprawnością, jak również niższymi kosztami operacyjnymi wynikającymi z faktu, że energia elektryczna jest tańsza od oleju napędowego oraz bezpośrednio nie zależy od wahań cen ropy na światowych rynkach [15],[17]. Wartością dodaną stosowania napędu elektrycznego w publicznym transporcie miejskim jest fakt braku emisji szkodliwych substancji w miejscu eksploatacji autobusu elektrycznego, tj. na obszarach śród- i podmiejskich oraz znacznie mniejsza w porównaniu z autobusami konwencjonalnymi emisja hałasu przez autobus [1].

Koszty nabycia autobusu elektrycznego stanowią dwu- lub trzykrotność wartości autobusu konwencjonalnego wyposażonego w silnik spalinowy Diesla spełniający normę emisji szkodliwych substancji EURO 6. Istotnym kosztem dla przedsiębiorstwa jest duża masa oraz wysoka cena baterii akumulatorowych oraz ograniczona ich żywotność. Dodatkowym kosztem dla przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej jest koszt wymiany baterii akumulatorowych po okresie przewidzianym przez producenta autobusu, który jest ponad dwukrotnie niższy niż żywotność całego autobusu [4, 6, 12, 16], a dodatkowo jest silnie zależny od trybu użytkowania.

Główną barierą ograniczającą rozwój zastosowania napędu elektrycznego w przemyśle motoryzacyjnym, w tym również w sektorze publicznego transportu zbiorowego, jest znacząco niższy zasięg pojazdów zasilanych elektrycznie. Za ten stan rzeczy odpowiedzialna jest w głównej mierze niedostateczna technologia baterii akumulatorowych, których osiągi nie pozwalają na wykonanie całodniowego zadania przewozowego przez autobusy kursujące w ramach publicznego transportu zbiorowego. Aby zaradzić temu problemowi, konieczne jest doładowywanie baterii akumulatorowych w autobusach elektrycznych, do czego z kolei niezbędny jest zakup dodatkowej infrastruktury liniowej i punktowej służącej do uzupełnienia poziomu naładowania baterii w autobusach [10, 11]. Sytuacja taka generuje dodatkowe koszty dla przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej (Rys. 1).



Rys. 1. Koszty generowane przez niedoskonałą technologię baterii

Niedoskonała technologia produkcji i eksploatacji baterii akumulatorowych powoduje zmianę struktury kosztów dla przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej. Problemy takie nie występują w przypadku zakupu autobusów konwencjonalnych, tj. wyposażonych w wysokopiętne silniki Diesla.

### 3. PROBLEMY WDRAŻANIA AUTOBUSÓW ELEKTRYCZNYCH DO OBSŁUGI PUBLICZNEGO TRANSPORTU ZBIOROWEGO

Kluczową z punktu widzenia możliwości eksploatacji autobusów elektrycznych w publicznym transporcie miejskim jest kwestia ich operatywności, czyli zdolności do jazdy bez przestojów koniecznych do uzupełnienia energii akumulatorów [7]. Przeciętnie pojazd komunikacji miejskiej pokonuje każdego dnia dystans operacyjny od 250 do 350 kilometrów, jednak obecnie produkowane pojazdy mają w praktyce zdecydowanie mniejszy zasięg (120-150 km), pomimo nominalnych (katalogowych) zasięgów, które szacowane są na ok. 300 km. Zasięg autobusu elektrycznego zależy między innymi od:

- charakterystyki danej linii komunikacyjnej (plan i profil linii),
- stopnia swobody ruchu,
- liczby zatrzymań,
- obciążenia pojazdu (liczba pasażerów),
- warunków atmosferycznych,
- zużycia energii przez dodatkowe urządzenia zamontowane w autobusie (np. systemy informacji pasażerskiej, klimatyzacja).

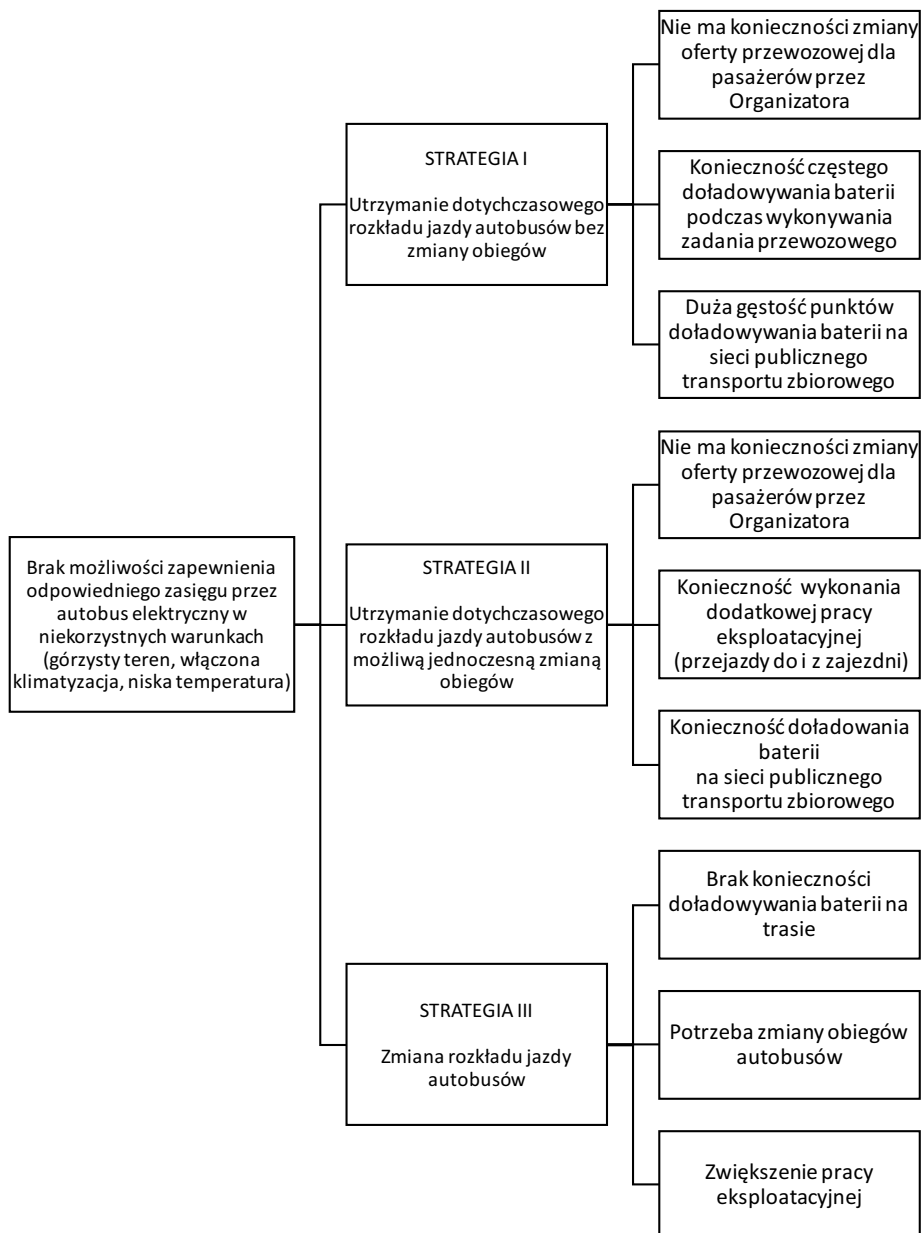
Należy zwrócić uwagę, że nie jest możliwe trasowanie autobusów elektrycznych bez zachowania rezerwy pojemności baterii akumulatorowych pozwalającej w każdych warunkach na dojechanie do zajezdni w celu ponownego doładowania baterii akumulatorowych autobusu.

Przedsiębiorstwo komunikacji miejskiej planujące wdrożyć do eksploatacji autobusy elektryczne może obrać jedną z trzech strategii organizacyjnych:

- utrzymać dotychczas obowiązujący rozkład jazdy autobusów będący ofertą przewozową przedsiębiorstwa bez zmiany obiegów poszczególnych brygad,
- utrzymać dotychczas obowiązujący rozkład jazdy autobusów będący ofertą przewozową przedsiębiorstwa zmieniając obiegi poszczególnych brygad,
- zmienić dotychczas obowiązujący rozkład jazdy będący ofertą przewozową przedsiębiorstwa.

Obranie każdej z wyżej wymienionych strategii pociąga za sobą konsekwencje organizacyjne, techniczne oraz ekonomiczne dla przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej. Graficzną ilustrację tego problemu przedstawiono na rys. 2. W zależności od wybranej przez przedsiębiorstwo komunikacji miejskiej strategii, konieczne są różne działania, które musi podjąć przedsiębiorstwo aby z powodzeniem wdrożyć na obszarze swojego działania autobusy elektryczne. Działania te podejmowane są w sferze organizacyjnej przedsiębiorstwa (zmiana obiegów autobusów, zmiana wielkości pracy eksploatacyjnej), handlowej (zmiany rozkładu jazdy), technicznej (stopień skomplikowania obsługi technicznej autobusów oraz infrastruktury doładowującej; kwestie związane z niezawodnością poszczególnych urządzeń) oraz ekonomicznej (koszty związane z budową i eksploatacją dodatkowych punktów ładowania zlokalizowanych poza zajezdnią).

Działania mające na celu wprowadzenie do eksploatacji autobusów elektrycznych wiążą się z wysiłkiem organizacyjnym przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej oraz zakupem nowej infrastruktury technicznej oraz późniejszą jej eksploatacją. Działania te mają istotny wpływ na wydatki przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej. Co więcej, struktura wydatków związana z wprowadzeniem do użytkowania floty autobusów elektrycznych w przedsiębiorstwie komunikacji miejskiej różni się w sposób znaczący od struktury wydatków jakie ponosi przedsiębiorstwo w związku z eksploatacją autobusów konwencjonalnych. Poniżej przedstawiono poszczególne grupy kosztów związanych z różnicami technicznymi pomiędzy autobusami konwencjonalnymi i elektrycznymi.



Rys. 2. Strategie organizacyjne wdrażania autobusów elektrycznych

#### 4. STRUKTURA DODATKOWYCH KOSZTÓW ZWIĄZANYCH Z WDRAŻANIEM AUTOBUSÓW ELEKTRYCZNYCH DO OBSŁUGI RUCHU PASAŻERSKIEGO W MIASTACH

Zakup autobusów elektrycznych wiąże się z koniecznością budowy dodatkowej infrastruktury służącej do ładowania baterii w zajezdni (wraz z remontem instalacji elektrycznej) oraz – w przypadku wyboru strategii I lub strategii II – stacji doładowujących autobusy elektryczne w węzłach sieci publicznego transportu miejskiego obsługiwane przez przedsiębiorstwo.

Przyjmijmy oznaczenia:  $k_1 := kb_z$  - koszt przebudowy zaplecza technicznego (zajezdni) wraz z budową urządzeń do ładowania autobusów zlokalizowanych w zajezdni,  $k_2 := kb_w$  - koszt budowy urządzeń do doładowywania autobusów zlokalizowanych w węzłach danej sieci publicznego transportu zbiorowego obsługiwanej przez przedsiębiorstwo komunikacji miejskiej,  $k_3 := kb_a$  - koszt zakupu autobusów elektrycznych wraz z baterią.

Niech dalej  $a_i \in \{a_1, \dots, a_n\}$  będzie krotnością  $k_i$  - tego składnika kosztów. Koszt budowy infrastruktury ( $kb$ ) dla  $n \in N$  składników kosztów można zatem opisać następującym wzorem:

$$kb = \sum_{i=1}^n a_i k_i \quad (1)$$

Składniki kosztów będące przedmiotem wzoru (1) będą się różnić w zależności od przyjętej strategii organizacyjnej wdrażania autobusów elektrycznych w przedsiębiorstwie jak również w zależności od konkretnych rozwiązań technicznych (np. rodzaje ładowarek), przyjętych na podstawie analizy eksperckiej uwzględniając warunki lokalne w jakich działa przedsiębiorstwo komunikacji miejskiej.

Oprócz kosztów zakupu autobusów elektrycznych oraz infrastruktury towarzyszącej, przedsiębiorstwo musi uwzględnić fakt ich utrzymania. Koszty te będą wzrastały wraz ze wzrostem liczby urządzeń, która zależy w dużej mierze od przyjętej strategii organizacyjnej wdrażania autobusów elektrycznych przyjętej przez przedsiębiorstwo.

Przyjmijmy oznaczenia:  $l_1 := lu_z$  - koszt utrzymania urządzeń do ładowania autobusów zlokalizowanych w zajezdni,  $l_2 := lu_w$  - koszt utrzymania urządzeń do doładowywania autobusów zlokalizowanych w węzłach danej sieci publicznego transportu zbiorowego obsługiwanej przez przedsiębiorstwo komunikacji miejskiej,  $l_3 := lu_{bat}$  - koszt serwisu floty autobusów elektrycznych,  $l_4 := lu_{bat}$  - koszt wymiany i zakupu dodatkowej baterii akumulatorowej.

Niech dalej  $b_i \in \{b_1, \dots, b_m\}$  będzie krotnością  $l_i$  - tego składnika kosztów. Koszt utrzymania floty autobusów elektrycznych oraz infrastruktury towarzyszącej ( $lu$ ) dla  $m \in N$  składników kosztów można zatem opisać następującym wzorem:

$$lu = \sum_{i=1}^m b_i l_i \quad (2)$$

Nakłady na utrzymanie floty oraz infrastruktury będą się różnić w zależności od wielkości sieci publicznego transportu zbiorowego i przyjętych rozwiązań technicznych. Dodatkową kwestią, którą należy brać pod uwagę jest kwestia gwarancji producenta na infrastrukturę towarzyszącą zakupowi autobusów elektrycznych (punkty ładowania baterii) daną przez jej producenta, która może obejmować serwis tych urządzeń. Taka sytuacja obniży koszty eksploatacji infrastruktury towarzyszącej dla przedsiębiorstwa, choć może się wiązać z wyższymi kosztami jej nabycia.

Mimo, że koszt zakupu autobusów elektrycznych oraz dodatkowej infrastruktury technicznej służącej do ładowania baterii akumulatorowych jest wyższy niż w przypadku autobusów konwencjonalnych, koszty ruchu związane z eksploatacją autobusów elektrycznych są od nich niższe co wynika z charakterystyki napędu elektrycznego.

Przyjmijmy oznaczenia:  $s_1 := sr_{en}$  - koszty energii zużytej pomiędzy poszczególnymi punktami doładowania energii,  $s_2 := sr_{dol}$  - koszty procesu doładowywania baterii podczas wykonywania zadań przewozowych.

Niech dalej  $c_i \in \{c_1, \dots, c_M\}$  będzie krotnością  $l_i$  - tego składnika kosztów. Koszty związane z ruchem autobusów elektrycznych po sieci publicznego transportu miejskiego ( $sr$ ) dla  $M \in N$  składników kosztów można zatem opisać następującym wzorem:

$$sr = \sum_{i=1}^M c_i s_i \quad (3)$$

W zależności od przyjętej przez przedsiębiorstwo strategii wdrażania do eksploatacji autobusów elektrycznych, koszty procesu doładowywania baterii podczas wykonywania zadań przewozowych będą ulegać znaczącym zmianom i osiągać swoje maksimum przy obraniu strategii I, tj. utrzymaniu dotychczasowego rozkładu jazdy bez zmiany obiegów. Z drugiej strony, duża gęstość punktów doładowywania baterii zlokalizowanych w węzłach sieci publicznego transportu zbiorowego będzie pozytywnie wpływać na zdolności operacyjne wdrażanej floty autobusów elektrycznych oraz daje przedsiębiorstwu więcej możliwości działania w sytuacjach nadzwyczajnych (awarie, nieprzewidziane sytuacje, itp.)

Analizując możliwość wprowadzenia autobusów elektrycznych do eksploatacji w publicznym transporcie zbiorowym, należy uwzględnić wszystkie aspekty techniczno-ekonomiczne omówione w niniejszym artykule. Graficzne ujęcie struktury kosztów dla poszczególnych aspektów techniczno-ekonomicznych wprowadzania autobusów elektrycznych w publicznym transporcie zbiorowym przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Aspekty techniczno-ekonomiczne wdrożenia autobusów elektrycznych w przedsiębiorstwie komunikacji miejskiej

Chcąc wdrożyć autobusy elektryczne do eksploatacji, należy uwzględnić wszystkie ww. aspekty, co w ujęciu formalnym można zapisać następująco (4):

$$K = \sum_{i=1}^n a_i k_i + \sum_{i=1}^m b_i l_i + \sum_{i=1}^M c_i s_i = kb + lu + sr \quad (4)$$

Udział składowych kosztów globalnych: koszty budowy infrastruktury ( $kb$ ), koszty utrzymania floty autobusów ( $lu$ ), koszty związane z ruchem autobusów elektrycznych po sieci publicznego transportu miejskiego ( $sr$ ) zależą od przyjętej przez przedsiębiorstwo strategii wdrożenia autobusów elektrycznych.

## 5. PODSUMOWANIE

Proces wdrażania autobusów elektrycznych w przedsiębiorstwie komunikacji miejskiej może przebiegać na kilka sposobów. W zależności od przyjętej strategii znacząco różnią się nakłady inwestycyjne, koszty eksploatacji taboru i infrastruktury, wysiłek organizacyjny

oraz stopień zmian w rozkładzie jazdy. Decyzja o wyborze strategii wdrażania autobusów elektrycznych musi być podparta analizami i powinna brać pod uwagę warunki lokalne w jakich działa dane przedsiębiorstwo. W artykule przedstawiono strukturę nowych kosztów, które musi ponieść przedsiębiorstwo komunikacji miejskiej, aby skutecznie wdrożyć autobusy elektryczne do obsługi ruchu pasażerskiego. Koszty te zależne są od przyjętej strategii wdrażania i muszą być przedmiotem profesjonalnej analizy kosztów, niezależnie w każdym przedsiębiorstwie komunikacji miejskiej.

### Bibliografia

1. Adheesh, S., Vasisht, M., Ramasesha, S.: Air-pollution and economics: diesel bus versus electric bus, *Current Science*, Volume 110 (2016), s. 858-862.
2. Biała Księga. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu KOM(2011)144. Komisja Europejska, Bruksela 2011.
3. CACTUS Models and Methods for the Evaluation and the Optimal Application of Battery Charging and Switching Technologies for Electric Buses. Project Deliverable 1.1-5.1, 2012-2015.
4. Janecki R., Karoń G., Concept of smart cities and economic model of electric buses implementation, w Mikulski J. (red.), *Telematics – Support for Transport*. Springer. Communications in Computer and Information Science 2013, nr 471.
5. Janecki R., Karoń G., Krawiec S., Łazarz B., Markusik S., Sierpiński G., Techniczne i eksploatacyjne aspekty zastosowania autobusów z silnikiem elektrycznym w publicznym transporcie zbiorowym. IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Transportowe – Teoria i Praktyka”. Politechnika Śląska, Katowice, 2012.
6. Janecki, R., Karoń, G., Sierpiński, G., Krawiec, S., Krawiec, K., Markusik, S.: Aspekty ekonomiczne procesu wdrażania autobusów elektrycznych w publicznym transporcie zbiorowym, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 108 (2015), s. 15-23.
7. Krawiec, K.: Alternatywne napędy autobusów w publicznym transporcie zbiorowym, *Logistyka* 4/2014, CD.
8. Krawiec, K.: Simulation of technical and economical processes as an initial phase of electric buses fleet implementation to operation in urban public transport company, *Springer Proceedings in Business and Economics, Transport Development Challenges in the Twenty-First Century* (2016), s. 193-200
9. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady i Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego. Europejska strategia na rzecz ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów KOM(2010)186. Bruksela 2010.
10. Kunith, A., Goehlich, D., Mendelevitch, R.: Planning and Optimazation of a Fast-charging Infrastructure for Electric Urban Bus Systems, *Proceedings of the Second International Conference on Traffic An Transport Engineering (ICTTE)*, 2014, s. 43-50.
11. Liu, Z., Wen, F., Ledwich, G.: Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2012.
12. Litman, T. *Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications*. Second Edition, Victoria Transport Policy Institute, 2011.
13. Markusik, S., Krawiec, S., Łazarz, B., Karoń, G., Janecki, R., Sierpiński, G., Krawiec, K.: The Technical and Operational Aspects of the Introduction of Electric-Powered Buses to the Public Transportation System, *Logistics and Transport* 3/2015, s. 41-50.
14. Murawski, J., Szczepański, E.: Perspektywy dla rozwoju elektromobilności w Polsce, *Logistyka* 4/2014, s. 2249-2258.
15. Rudnicki T.: Pojazdy z silnikami elektrycznymi. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Warszawa 80/2008, s. 245-250.
16. Yo, J., Rao, Z. Analysis and application of pure electric buses on the economic environment. *Applied Mechanics and Materials Vols 713-715* (2015), s. 1476-1480.

17. Zhoua, B., Wua, Y., Zhouc, B., Wanga, R., Kea, W., Zhangd, S., Haoa, J., Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions, *Energy*, Volume 96, 1 February 2016, s 603–613.

### **THE PROCESS OF ELECTRIC BUSES IMPLEMENTATION TO EXPLOITATION IN URBAN PUBLIC TRANSPORT COMPANIES – SELECTED ISSUES**

**Summary:** Because of the need to protect the environment, growing environmental awareness of passengers and the pressure from the European Union transport policy steps are taken aimed at replace conventional Diesel buses by buses with alternative drives, therein an electric drive. The issue of the introduction of electric buses to exploitation in urban public transport companies is complex and requires a multi-dimensional analysis for technical, operational, environmental and economic criteria. The paper presents proposals for organisational strategies for municipal transportation companies in the implementation of buses with electric drive and discusses the various technical and economic aspects which are specific to the use of electric drive in the public transport. The article is to discuss the technical and economic aspects of the implementation of electric buses in the public transport company.

**Keywords:** urban public transport, electric buses, cost structure