

KLAUDIA DOBIJA

inż., absolwentka Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, ul. Wolności 53a, 43-229 Ćwiklice, tel.: 662618307, e-mail: kladia.dobjia@onet.pl

Porównanie efektywności form elektromobilności na przykładzie linii trolejbusowej A w Tychach¹

Streszczenie: W artykule przedstawiono porównanie efektywności autobusów elektrycznych i trolejbusów. Analiza została przeprowadzona przy przyjętych założeniach dla linii trolejbusowej A w Tychach. Na ich podstawie został wyliczony roczny przebieg i czas pracy dla obu pojazdów. Porównanie zostało wykonane poprzez wyliczenie kosztów własnych przedsiębiorstwa w stawce jednoskładnikowej, do czego były niezbędne wcześniejsze obliczenia. Po pierwszych analizach z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego, który jest stosowany do wyliczenia jednostkowego kosztu w transporcie miejskim oraz po doliczeniu do kosztu wozokilometra w stawce dwuskładnikowej narzutów związanych z budową infrastruktury, otrzymano wynik wskazujący na mniejszą efektywność trolejbusów (wozokilometr droższy o 12 groszy niż w przypadku autobusów elektrycznych). Jednak koszt wozogodziny jest niższy dla tych środków transportu ze względu na dłuższy roczny czas pracy. Po wyliczeniu kosztu w stawce jednoskładnikowej sytuacja odwróciła się na niekorzyść elektrobusów, gdyż w obu aspektach są one mniej korzystne (wozokilometr droższy o 63 grosze), na co wpływ ma ponownie krótszy czas pracy, spowodowany koniecznością doładowywania akumulatorów. Jednorazowe pokonanie całej trasy zgodnie z założeniami jest tańsze w przypadku trolejbusu o ponad 7 zł, co wskazuje na jego większą efektywność.

Słowa kluczowe: publiczny transport zbiorowy, komunikacja trolejbusowa, elektromobilność.

Wprowadzenie

Obecnie można zauważyć rosnące zainteresowanie pojazdami napędzanymi energią elektryczną. Powodami tego zjawiska są wysoki poziom zanieczyszczeń emitowanych przez pojazdy do atmosfery, które powodują globalne ocieplenie oraz fakt, iż zasoby paliw płynnych są ograniczone³. W związku z tymi zjawiskami Komisja Europejska w jednym z rozdziałów Białej Księgi⁴, w której opisano wizję przyszłego systemu transportowego, podjęła temat ekologiczności tej gałęzi gospodarki. Koniecznym jest, aby ograniczyć, a w późniejszym czasie całkowicie wyeliminować transport konwencjonalny w miastach. Okres zmian został zaplanowany w dwóch etapach:

- do 2030 roku należy o połowę zmniejszyć liczbę pojazdów o napędzie spalinowym w miastach,
- do 2050 roku należy całkowicie je wyeliminować⁵.

Kwestia transportu miejskiego została podjęta również w Zielonej Księdze dla transportu publicznego. Oprócz konieczności zmiany preferencji sposobu podróżowania zwraca się także uwagę na zapewnienie odpowiedniej infrastruktury dla autobusów oraz potrzebę ograniczenia emisji dwutlenku węgla przez pojazdy poruszające się w miastach⁶.

W związku z tym coraz więcej miast inwestuje w autobusy elektryczne, które są następcami trolejbusów. Nie emitują spalin, ale równocześnie nie są zależne od sieci trakcyjnej, gdyż wykorzystują energię zgromadzoną w akumulatorach. Warto również zwrócić uwagę na drugi typ pojazdów, gdyż również spełnia on wymogi stawiane przez Komisję Europejską. Trolejbus można zdefiniować jako „autobus przystosowany do zasilania energią elektryczną z sieci trakcyjnej”⁷. Jest on formą pośrednią między tramwajem i autobusem, jednak pod względem konstrukcyjnym dużo bardziej zbliżony jest do drugiego rodzaju środków transportu. Największy udział w liczbie trolejbusów w Polsce w 2016 roku, stanowiący niemal 50%, miał Lublin (109), w Gdyni jeździły 93 pojazdy, a w Tychach 21⁸.

Praca taboru

W celu porównania autobusów elektrycznych z trolejbusami przeprowadzono analizę rocznego przebiegu oraz czasu pracy. Do badań wykorzystano trasę trolejbusową A w Tychach. Ma ona początek na Dworcu PKP, a ostatnim przystankiem jest Tychy Zajezdnia (rys. 1).

Długość trasy wynosi około 12,2 km. Do analizy przyjęto rozkład jazdy dla dni roboczych (dla 30 kwietnia 2018 roku). Trolejbus pokonuje tę trasę w 31 minut (0,52 godziny).

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2019.

² Opracowano na podstawie własnej pracy inżynierskiej pod tytułem „Porównanie efektywności form elektromobilności w drogowym publicznym transporcie zbiorowym”, obronionej na Uniwersytecie Ekonomicznym w Katowicach w 2018 roku (promotor prof. R. Tomanek).

³ H.P. Lenz, *Future mobility without internal combustion engines and fuels*, „Combustion engines”, 2013, nr 4, s. 3, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-78280717-77ad-4c7b-ad86-e7cd3e3e844c>, 23.01.2019.

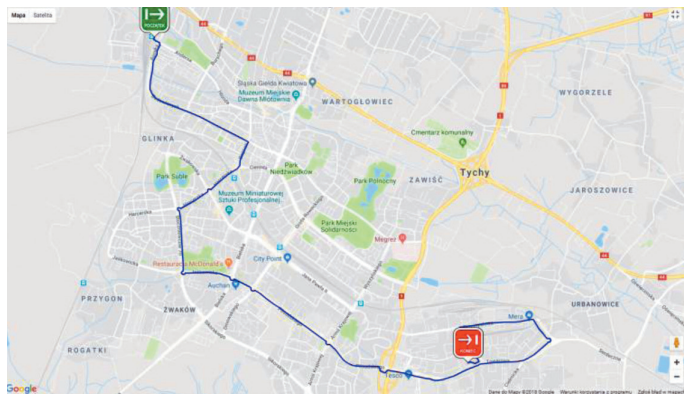
⁴ *Biała Księga Transportu* https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white-paper-illustrated-brochure_pl.pdf, 23.01.2019.

⁵ T. Bartosiński, R. Gogacz, J. Kuźmiński, *Doświadczenia z rocznej eksploatacji autobusów elektrycznych w Warszawie*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 2016, nr 7–8, s. 26, http://www.autobusy-test.com.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=747&Itemid=355, 23.01.2019.

⁶ W. Starowicz, *Założenia europejskiej Zielonej Księgi dla transportu publicznego*, „TTS Technika Transportu Szybowego”, 2007, nr 5–6, s. 61–63, http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BGPK-1775-6758?q=bwmeta1.element.baztech-volume-1232-3829-tts_technika_transportu_szybowego-2007-r_13_nr_5-6;5&qt=CHILDREN-STATELESS, 13.02.2019.

⁷ B. Molecki, *Nowa definicja trolejbusu w Prawie o Ruchu Drogowym*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, 2013, nr 5, s. 27, http://www.autobusy-test.com.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=624&Itemid=311, 23.01.2019 r.

⁸ <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/dane/podgrup/wykres>, 23.01.2019 r.



Rys. 1. Przebieg linii trolejbusowej A w Tychach

Źródło: mapy google

Z podanych wartości można obliczyć prędkość eksploatacyjną ze wzoru:

$$v_e = \frac{s}{t}$$

po podstawieniu danych do wzoru:

$$v_e = \frac{12,2}{0,52} = 23,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Według rozkładu linia jest obsługiwana w godzinach 3:40–00:28, czyli przez 20 godzin i 48 minut na dobę. Do obliczeń zostanie przyjęty dobowy czas pracy 20 godzin. Teoretycznie, trolejbus, jeżdżąc nieprzerwanie (przy powyższym założeniu), może pokonać tę trasę 38 razy. Jednak trzeba przyjąć czas, który należy poświęcić na przerwy. Pojazd będzie prowadzony przez 2 kierowców w ciągu doby, wymagana będzie jedna zmiana – każdy będzie pracował 10 godzin – tyle maksymalnie może prowadzić pojazd kierowca zgodnie z przepisami. Każdemu z nich przysługuje 45 minut przerwy⁹. W związku z tym łącznie na przerwy potrzebna jest 1 godzina 30 minut. Trolejbus wykonuje pracę przez 18 godzin 30 minut. W tym czasie może pokonać daną trasę 35 razy. Przyjęto założenie, iż w soboty, niedziele i święta tabor pracuje 15 godzin na dobę. Do analizy niezbędna jest również liczba dni roboczych: 252 oraz pozostałych dni: 113 (stan w 2018 roku). Zakładając, że trolejbus jeździ bez innych przerw niż 45 minut dla kierowcy, jego przebieg dobowy wyliczony z prędkości wynosi:

- dni robocze: $s = 23,5 * 18,5 = 434,75 \text{ km}$
- soboty, niedziele i święta: $s = 23,5 * 15 = 352,5 \text{ km}$.

W związku z tym przebieg roczny wynosi: 149 389,5 km, a roczny czas pracy trolejbusu wynosi 6 357 h.

W przypadku elektrobusego przyjęto te same założenia dotyczące pokonywanej trasy i czasu pracy, jednak należy dodatkowo uwzględnić czas niezbędny na doładowanie akumulatorów. Przyjęto następujące założenia do obliczenia czasu w ciągu doby, który należy odliczyć od czasu pracy:

- zasięg na jednym ładowaniu 150 km¹⁰,

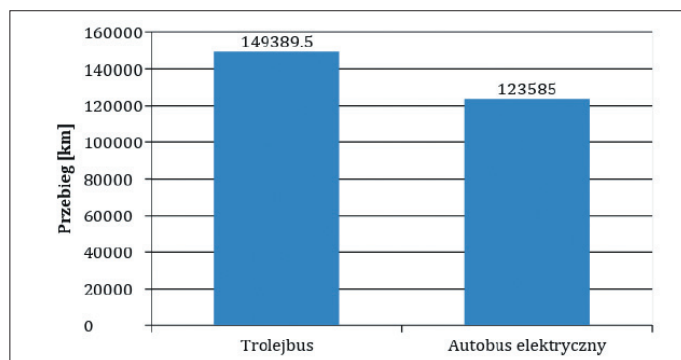
- stacje ładowania znajdują się na początku i na końcu linii,
- jedno ładowanie trwa 10 minut,
- zasięg przy jednym ładowaniu za pomocą pantografu wynosi 23 km¹¹,
- występuje konieczność każdorazowego doładowania, gdyż trasa jest zbyt długa, aby wystarczyło na dwukrotne jej pokonanie.

Po kursach na nocnym ładowaniu, czyli po pokonaniu trasy 12 razy (co zajmuje 6,24 godzin), za każdym razem autobus przed trasą będzie ładowany przez 10 minut. Będzie mógł jeździć od tego czasu jeszcze 12,26 godzin. W tym czasie pokona tę trasę 18 razy, więc łącznie na dobę 30 razy. Straty czasu ze względu na ładowanie wynoszą: 180 minut, czyli 3 godziny, w związku z tym czas pracy skraca się do 15,5 godzin w dni robocze i 12 godzin w sobotę, niedzielę i święta. Liczba poszczególnych dni w roku jest taka sama, jak dla trolejbusów. Przebieg dobowy wynosi:

- w dni robocze: $s = 23,5 * 15,5 = 364,25 \text{ km}$,
- w soboty, niedziele i święta: $s = 23,5 * 12 = 82 \text{ km}$.

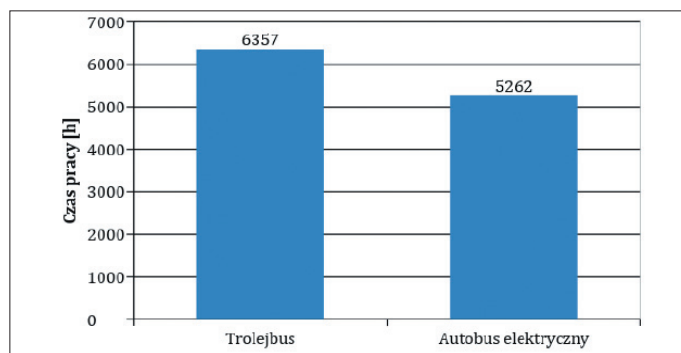
W związku z tym roczny przebieg dla autobusu elektrycznego jest równy 123 585 km, a roczny czas pracy wynosi 5 262 h.

Wyniki zostały porównane na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Porównanie rocznego przebiegu analizowanych środków transportu

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Porównanie rocznego czasu pracy analizowanych środków transportu

Źródło: opracowanie własne

⁹ J. Stencel-Walter, *Czas pracy kierowców w komunikacji miejskiej*, <http://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/czas-pracy-kierowcow-w-komunikacji-miejskiej-47182.html>, 23.01.2019 r.

¹⁰ Solaris Urbino 12 Electric, http://samochodelektryczne.org/solaris_urbino_12_electric.htm, 23.01.2019r.

¹¹ M. Bartłomiejczyk, M. Polom, *Integracja systemu energetycznego miejskiego transportu szynowego i stacji ładowania autobusów elektrycznych – szansa czy zagrożenie?*, „TTS Technika Transportu Szynowego”, 2015, nr 7–8, s. 13, https://www.researchgate.net/publication/286368725_Integracja_systemu_energetycznego_miejskiego_transportu_szynowego_i_stacji_ladowania_autobusow_elektrycznych_-_szansa_czy_zagrozenie 23.01.2019r.

Jak widać wartości dla elektrobusew są niższe, przez co cechuje się on niższą produktywnością. Wynika to z faktu, iż od pewnego momentu wykonywania pracy wymagane są przerwy na ładowanie.

Analiza kosztów własnych

Analiza została przeprowadzona dla następujących pojazdów: Solaris Trollino 12 oraz Solaris Urbino 12 Electric, z uwzględnieniem wyżej przeprowadzonych obliczeń. Wyczenia przeprowadzono przy użyciu arkusza kalkulacyjnego kosztu jednostkowego, gdzie koszty zostały podzielone na dwie grupy: bezpośrednie zależne od przebiegu oraz bezpośrednio zależne od czasu pracy. W przypadku pojazdów elektrycznych nie oblicza się kosztów związanych z paliwami oraz olejami, lecz energii elektrycznej.

Zestawienie danych kosztowych z wyczeniem kosztów jednostkowych zawarto w tabelach 1 i 2.

Do kosztu wozokilometra należy doliczyć nakłady na infrastrukturę. W przypadku trolejbusów wzięto pod uwagę następujące dane 1 km linii kablowej: 240 000 zł, długość trasy: 12,2 km, koszt budowy jednej podstacji centralnego układu zasilania dla obsługi całej linii: 3 000 000 zł, roczna amortyzacja: 4,5%, roczny przebieg: 149 389,5 km.

Tabela 1

Arkusz kalkulacyjny kosztu jednostkowego transportu miejskiego (tabor trolejbusowy)					
Lp.	Składniki kosztów	jednostki	Przyjęte wielkości	Koszt zł/1 wzkm	Koszt zł/1 godz
1	2	3	4	5	6
I	Koszty bezpośrednie zależne od przebiegu	-	-	-	-
1.	Energia trakcyjna:	Zł/wzkm	-	0,45	-
1.1.	-cena 1 kWh prądu (netto)	Zł	0,25	-	-
1.2.	-norma poboru prądu	kWh/km	1,8	-	-
2.	Ogumienie:	Zł/wzkm	-	0,04	-
2.1.	-cena jednej opony	Zł	980	-	-
2.2.	-liczba kół	Szt.	6	-	-
2.3.	-norma przebiegu ogumienia	Km	147 999	-	-
3.	Obsługi i naprawy	Zł/wzkm	-	0,27	-
II	Koszty bezpośrednie zależne od czasu pracy	-	-	-	-
4.	Amortyzacja	Zł/godz	-	-	43,26
4.1.	-cena nowego pojazdu	Zł	2 200 000	-	-
4.2.	-wysokość rocznego odpisu amortyzacyjnego	%	12,5	-	-
4.3.	-roczny czas pracy pojazdu	Godz.	6357	-	-
5.	Wynagrodzenia kierowcy oraz narzuty (ZUS, FP):	zł/godz.	-	-	30,09
5.1.	- miesięczne wynagrodzenie	Zł	3 297	-	-
5.2.	-wielkość narzutów na wynagrodzenia	%	20,74	-	-
5.3.	-średni miesięczny czas pracy kierowcy	Godz.	132,3	-	-
6.	Ubezpieczenia komunikacyjne	Zł/godz	-	-	1,73
6.1.	- ubezpieczenie	Zł	11 012,05	-	-
6.2.	-roczny czas pracy pojazdu	Godz.	6357	-	-
7.	Podatek od środków transportu	Zł/godz.	-	-	0,39
7.1.	-roczna stawka podatku	Zł	2449,37	-	-
7.2.	-roczny czas pracy pojazdu	Godz.	6357	-	-
8.	Razem koszty bezpośrednie	Zł	-	0,76	75,47

Źródło: opracowanie własne na podstawie: O. Wyszomirski (red.), *Transport miejski. Ekonomia i organizacja*, UG, Gdańsk, 2007, s. 152.

Koszt budowy linii trakcyjnej wyniesie 2 928 000 zł. Koszt związany z infrastrukturą wynosi:

$$\frac{5\,928\,000 * 4,5\%}{149\,389,5} = 1,79 \frac{\text{zł}}{\text{wzkm}}$$

Po dodaniu go do wcześniej obliczonej wartości otrzymano koszt wozokilometra o wartości: 2,55 zł. Aby w sposób kompletny przedstawić koszty bezpośrednio, przeliczono je na stawkę jednostkową uzyskując koszt za wozokilometr 5,76 zł/wzkm, i koszt za wozogodzinę 135/40 zł/wzb.

W przypadku autobusów elektrycznych przeprowadzono te same obliczenia. Wzięto pod uwagę następujące wartości:

- punkt ładowania w zajezdni: 1 331 200 zł,
- punkt ładowania na przystanku końcowym: 374 400 zł,
- roczna amortyzacja: 10%,
- przebieg roczny: 123 585 km.

Koszt związany z infrastrukturą wynosi:

$$\frac{2\,080\,000 * 10\%}{123\,585} = 1,68 \frac{\text{zł}}{\text{wzkm}}$$

Po dodaniu go do wcześniej obliczonej wartości otrzymano koszt wozokilometra o wartości: 2,43 zł.

Tabela 2

Arkusz kalkulacyjny kosztu jednostkowego transportu miejskiego (autobus elektryczny)					
Lp.	Składniki kosztów	Jednostki	Przyjęte wielkości	Koszt zł/1 wzkm	Koszt zł/1 godz
1	2	3	4	5	6
I	Koszty bezpośrednie zależne od przebiegu				
1.	Energia trakcyjna:	Zł/wzkm	-	0,38	-
1.1.	-cena 1 kWh prądu (netto)	Zł	0,25	-	-
1.2.	-norma poboru prądu	kWh/km	1,5	-	-
2.	Ogumienie:	Zł/wzkm	-	0,04	-
2.1.	-cena jednej opony	Zł	980	-	-
2.2.	-liczba kół	Szt.	6	-	-
2.3.	-norma przebiegu ogumienia	Km	147 999	-	-
3.	Obsługi i naprawy	Zł/wzkm	-	0,33	-
II	Koszty bezpośrednie zależne od czasu pracy	-	-	-	-
4.	Amortyzacja	Zł/godz	-	-	60,34
4.1.	-cena nowego pojazdu	Zł	2 540 000	-	-
4.2.	-wysokość rocznego odpisu amortyzacyjnego	%	12,5	-	-
4.3.	-roczny czas pracy pojazdu	Godz.	5262	-	-
5.	Wynagrodzenia kierowcy oraz narzuty (ZUS, FP):	zł/godz.	-	-	30,09
5.1.	- miesięczne wynagrodzenie	Zł	3 297	-	-
5.2.	-wielkość narzutów na wynagrodzenia	%	20,74	-	-
5.3.	Średni miesięczny czas pracy kierowcy	Godz.	132,3	-	-
6.	Ubezpieczenia komunikacyjne	Zł/godz	-	-	2,09
6.1.	- ubezpieczenie	Zł	11 012,05	-	-
6.2.	-roczny czas pracy pojazdu	Godz.	5262	-	-
7.	Podatek od środków transportu	Zł/godz.	-	-	0,47
7.1.	-roczna stawka podatku	Zł	2449,37	-	-
7.2.	-roczny czas pracy pojazdu	Godz.	5262	-	-
8.	Razem koszty bezpośrednie	Zł	-	0,75	92,99

Źródło: opracowanie własne na podstawie: O. Wyszomirski (red.), *Transport miejski. Ekonomia i organizacja*, UG, Gdańsk, 2007, s. 152.

Dla pełnego porównania obliczonych wartości należy przeliczyć je na stawkę jednoskładnikową. Uzyskuje się wówczas koszt za wozokilometr 6,39 zł/wzkm i koszt za wozogodzinę 150,10 zł/wzgh.

Koszt jednego wozokilometra w stawce dwuskładnikowej dla obu pojazdów został porównany na rysunku 4.

Nakłady na wozokilometr w przypadku autobusu elektrycznego są niższe, różnica jest niewielka, jednak wraz ze wzrostem przejechanych kilometrów nabiera ona większego znaczenia. Przyczyną niższych kosztów są niższe nakłady na urządzenia do obsługi taboru oraz niższa norma poboru prądu. Powoduje to, że pomimo faktu, iż elektrobusek ma mniejszy przebieg dobowy, to koszty jego eksploatacji są niższe.

Porównano również cenę wozogodziny w stawce dwuskładnikowej (rys. 5).

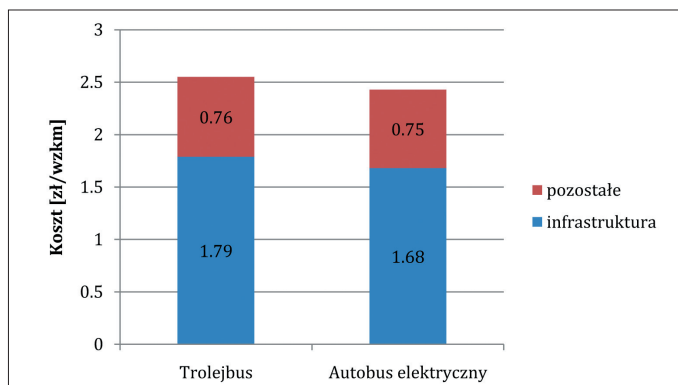
Różnica w cenie wozogodziny jest duża na korzyść trolejbusów. Ma na to wpływ roczny czas pracy, który dla autobusów elektrycznych jest krótszy ze względu na konieczność wykonywania przerw na ładowanie pojazdu. W ostatecznym porównaniu w stawce jednoskładnikowej za wozokilometr i wozogodzinę cena dla trolejbusu jest niższa (rys. 6 i 7).

Podsumowanie

Wyniki porównania wskazują na większą efektywność trolejbusów. Świadczą o tym głównie wyliczone koszty bezpośrednie przedsiębiorstwa transportowego w stawce jednoskładnikowej za wozokilometr oraz wozogodzinę. Infrastruktura ma znaczący wpływ na cenę wozokilometra, gdyż jest głównym składnikiem kosztów bezpośrednich zależnych od przebiegu (ponad udziału). Największy wpływ na koszty własne przedsiębiorstwa ma efektywny czas pracy taboru. Jego wydłużenie pozwoli na stopniowe obniżenie wydatków. Konieczność postoju na ładowanie znacząco zwiększa koszty eksploatacji pojazdu, przez czasowe wyłączenie go z pracy. W przypadku zastosowania innego systemu ładowania, który nie wymaga postojów (np. wykorzystanie sieci trakcyjnej trolejbusów), koszty eksploatacji elektrobusek mogłyby być bardziej korzystne. Jednak obecnie najpopularniejsza jest metoda założona w obliczeniach. Trolejbus okazuje się tańszy w eksploatacji.

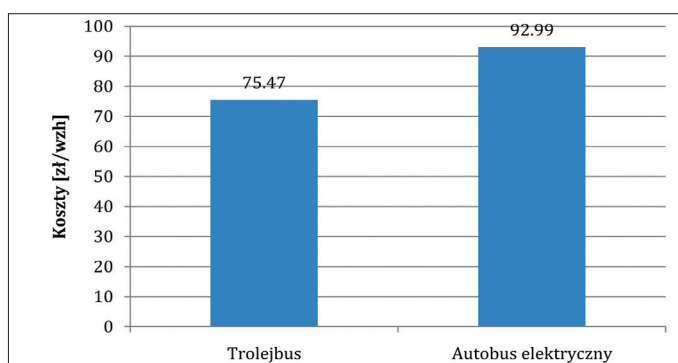
Literatura

1. Lenz H.P., *Future mobility without internal combustion engines and fuels*, "Combustion engines" 2013, nr 4.
2. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transport, Komisja Europejska, Biała Księga COM(2011) 144, wersja ostateczna.
3. Bartosiński T., Gogacz R., Kuźmiński J., *Doświadczenia z rocznej eksploatacji autobusów elektrycznych w Warszawie*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 7–8.
4. Starowicz W., *Założenia europejskiej Zielonej Księgi dla transportu publicznego*, „TTS Technika Transportu Szynowego”, 2007, nr 5–6.
5. Molecki B., *Nowa definicja trolejbusu w Prawie o Ruchu Drogowym*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2013, nr 5.
6. Stencel-Walter J., *Czas pracy kierowców w komunikacji miejskiej*, <http://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/czas-pracy-kierowcow-w-komunikacji-miejskiej--47182.html>.



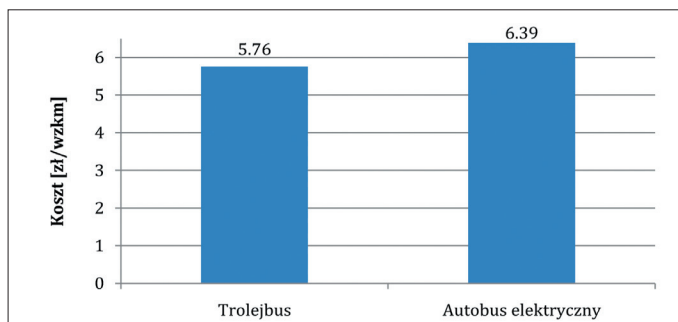
Rys. 4. Porównanie kosztów bezpośrednich zależnych od przebiegu trolejbusów i autobusów elektrycznych

Źródło: opracowanie własne



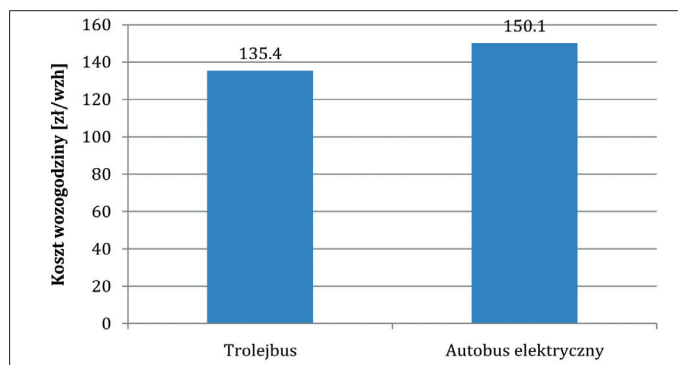
Rys. 5. Porównanie kosztów bezpośrednich zależnych od czasu pracy

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Porównanie kosztów za wozokilometr w stawce jednoskładnikowej

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Porównanie kosztów za wozogodzinę

Źródło: opracowanie własne

7. Solaris Urbino 12 electric, http://samochodyelektryczne.org/solaris_urbino_12_electric.htm.
8. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Integracja systemu energetycznego miejskiego transportu szynowego i stacji ładowania autobusów elektrycznych – szansa czy zagrożenie?*, „TTS Technika Transportu Szynowego”, 2015, nr 7–8.