

doi:10.15199/48.2018.10.22

Charakterystyka pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych

Streszczenie. Polityka państw członkowskich Unii Europejskiej oraz ogólny trend światowy wskazują na coraz większe zainteresowanie transportem publicznym opartym na zeroemisyjnym taborze autobusów elektrycznych. Jednym z nieodłącznych elementów wiążących się z wprowadzeniem taboru elektrycznego w komunikacji miejskiej jest budowa oraz przygotowanie odpowiedniej infrastruktury ładowania pojazdów tego typu. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie dwóch obecnie wykorzystywanych układów oraz zaprezentowanie i ocena charakterystyki ich pracy.

Abstract. Policy of the European Union members as well as general global trends indicate an increasing interest in public transport which is based on zero-emission fleet of electric buses. One of the most inseparable elements associated with introduction of electric bus fleet in urban public transport is construction and preparation of appropriate infrastructure for charging this type of vehicles. The aim of this paper is to present two of currently used systems and characteristics of their work. (**Work characteristics of charging stations for electric buses**).

Słowa kluczowe: elektromobilność, autobusy elektryczne, stacja ładowania, transport publiczny.

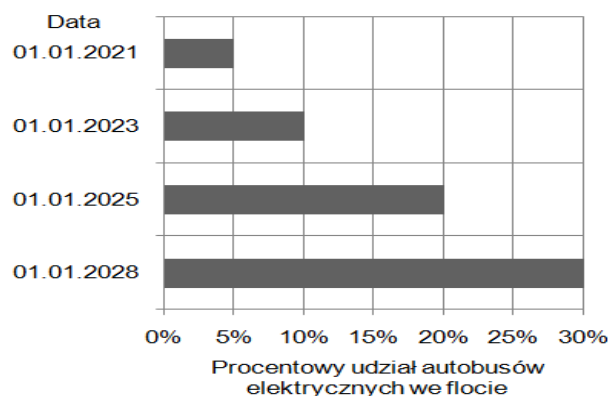
Keywords: electromobility, electric buses, charging station, public transport.

Wstęp

W ostatnich latach na rynku transportu publicznego obserwuje się coraz większy wzrost zainteresowania transportem publicznym opartym na autobusach o możliwie jak najniższej ingerencji środowiskowej. W porównaniu do pojazdów z napędem konwencjonalnym w miejscu eksploatacji autobus elektryczny charakteryzuje przede wszystkim znacznie niższa emisja hałasu komunikacyjnego jak również brak emisji zanieczyszczeń środowiskowych takich jak tlenki siarki, tlenki azotu, węglowodory czy też bardzo szkodliwe dla zdrowia cząstki stałe [1]. To rozwiązanie pozwala ograniczyć powstawanie efektu cieplarnianego, gdyż należy zauważyć, że wykorzystanie autobusów napędzanych silnikiem spalinowym wiąże się ze znaczną emisją dwutlenku węgla [2]. Rozwiązanie oparte na napędzie elektrycznym ponadto powoduje uniezależnienie transportu publicznego od dostępności paliw konwencjonalnych takich jak olej napędowy czy też gaz ziemny. Warto również podkreślić, że autobusy elektryczne cechują się znacznie niższymi kosztami eksploatacyjnymi co bezpośrednio wynika z cen energii elektrycznej, akumulowanej w bateriach pojazdu.

Powyższe argumenty przemawiające za wykorzystaniem autobusów napędzanych silnikiem elektrycznym sprawiają, że zarówno Unia Europejska jak i Polska wprowadzają regulacje prawne stanowiące bezpośrednie wsparcie dla wdrożenia tego typu pojazdów przez operatorów miejskiego transportu publicznego. Jest to szczególnie ważne ze względu na ciągły rozwój technologii magazynowania energii w pojazdach co wiąże się ze stosunkowo wysokim kosztem ich zakupu. Do dokumentów wydanych przez Unię Europejską należy Dyrektywa 2014/94/UE dotycząca rozwoju infrastruktury dla rynku paliw alternatywnych jak również Komunikat Komisji Europejskiej z dnia 20.07.2016 roku dotyczący ogólnie wspólnotowej strategii na rzecz mobilności niskoemisyjnej. Obydwa dokumenty potwierdzają dążenie do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla oraz szkodliwych zanieczyszczeń środowiskowych, uniezależnienia od oleju napędowego oraz wprowadzenia autobusów elektrycznych w transporcie publicznym na terenie krajów członkowskich wspólnoty [3]. Jednym z najważniejszych dokumentów jest wydana w Polsce na początku bieżącego roku Ustawa o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych. Powyższy akt prawny wprowadza wymagane w określonym czasie minimalne udziały procentowe autobusów elektrycznych w ogólnej flocie pojazdów wykorzystywanych na terenie

jednostek samorządu terytorialnego, którego liczba mieszkańców jest większa niż 50000, a która zleca lub świadczy usługę transportu publicznego [4]. Powyższe udziały zostały przedstawione na rysunku 1.

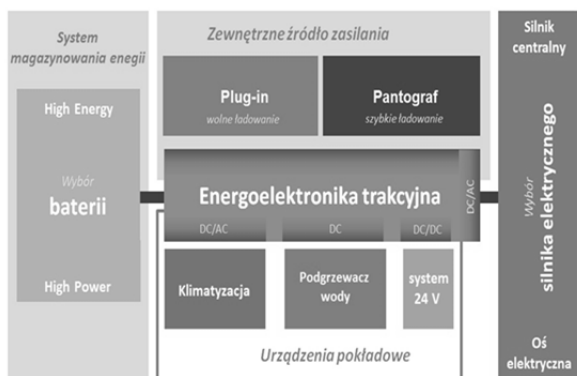


Rys.1. Wymagany w określonym czasie procentowy udział autobusów elektrycznych we flocie pojazdów [4]

Na rysunku 1 pokazano spodziewany wzrost zapotrzebowania na zeroemisyjne autobusy elektryczne na przestrzeni najbliższych dziesięciu lat. Jest on konieczny do zrealizowania ze względu na założenia polskiego ustawodawstwa. Na przykładzie Poznania, którego stan taboru autobusowego wynosi ogółem 320 sztuk [5] można policzyć, że do 2028 roku miasto będzie zobowiązane dokupić ponad 130 autobusów elektrycznych pozostając przy obecnym stanie taboru napędzanego silnikami spalinowymi. Warto zwrócić uwagę, że wprowadzenie pojazdów tego typu bezpośrednio wiąże się z koniecznością wybudowania infrastruktury ładowania doprowadzających energię do baterii stanowiących źródło zasilania napędu. Już teraz wiele miast, do których zaliczyć można przede wszystkim Warszawę, Kraków czy też Jaworzno obsługuje linie autobusowe oparte wyłącznie na taborze elektrycznym oraz zbiera doświadczenia z eksploatacji oraz ładowania pojazdów tego typu.

Budowa autobusu elektrycznego

Zasadniczy schemat przedstawiający fundamentalne elementy funkcjonalne autobusu elektrycznego przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Elementy funkcjonalne autobusu napędzanego silnikiem elektrycznym [3]

Do najważniejszych elementów funkcjonalnych autobusu elektrycznego należy przede wszystkim zaliczyć układ akumulujący energię, układ napędowy, układy poprawiające komfort podróży pasażerom i kierowcy pojazdu oraz będące przedmiotem niniejszego artykułu układy odpowiedzialne za doprowadzenie energii do pojazdu. Baterie typu *high power* charakteryzuje mniejsza pojemność i niższa gęstość energetyczna są więc wykorzystywane na trasach, w których istnieje możliwość częstego podładowania pantografowymi ładowarkami dużej mocy. Bateria *high energy* posiadają wyższą gęstość energetyczną oraz znacznie wyższą pojemność i przeznaczone są do nocnego ładowania [6]. Głównymi parametrami charakteryzującymi baterię w czasie ich eksploatacji jest wyrażony w procentach ich aktualny stan naładowania SOC (ang. *state of charge*) opisany poniższym równaniem [7]:

$$(1) \quad SOC = 100 \left(1 - \frac{\int I_{bat} dt}{Q} \right)$$

gdzie: I_{bat} – prąd pobierany z baterii, Q – pojemność baterii.

Przeciwieństwem SOC jest stan głębokości rozładowania DOD (ang. *depth of discharge*) wyznaczany na podstawie równania:

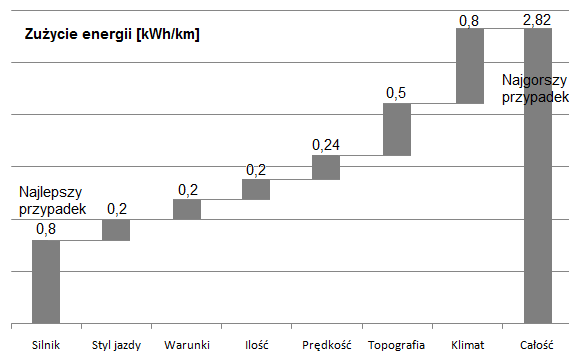
$$(2) \quad DOD = 1 - SOC$$

Bardzo ważnymi układami zapewniającymi komfort podróży są instalacje HVAC (ang. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*). Warto zwrócić uwagę, że stopień ich wykorzystania będzie zależny od strefy klimatycznej, w której pojazd zostanie oddany do codziennego użytku. Autobus całkowicie zeroemisyjny będzie charakteryzował się wysokim zużyciem energii związanej z użytkowaniem układu HVAC szczególnie ze względu zastosowanie elektrycznych układów ogrzewania. Dlatego też obecnie poszukiwane są rozwiązania umożliwiające zmniejszenie zużycia energii lub zastąpienie układów tego typu instalacjami mniej energochłonnymi. Kolejnym fundamentalnym elementem funkcjonalnym stanowiącym napęd autobusu elektrycznego jest silnik trakcyjny. Powszechnie wykorzystywane są silniki centralne synchroniczne z magnesami stałymi. Rzadziej spotykanym rozwiązaniem są silniki asynchroniczne oraz silniki zintegrowane z osią. Warto podkreślić, że sprawność silnika elektrycznego jest znacznie wyższa od konwencjonalnego silnika spalinowego i mieści się na poziomie 90%. Kolejną bardzo dużą zaletą autobusów elektrycznych jest również

możliwość rekuperacji energii. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono, że w trakcie eksploatacji pojazdu około 31% [8]. zużytej energii może być odzyskane

Zapotrzebowanie na energię

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ poszczególnych parametrów na całkowite zużycie energii na każdy przejechany kilometr dwunastometrowego autobusu elektrycznego opracowanych dzięki wykonanym testom i analizom jednego z producentów pojazdów.



Rys.3. Zapotrzebowanie autobusu elektrycznego na energię w zależności od różnych współczynników [9]

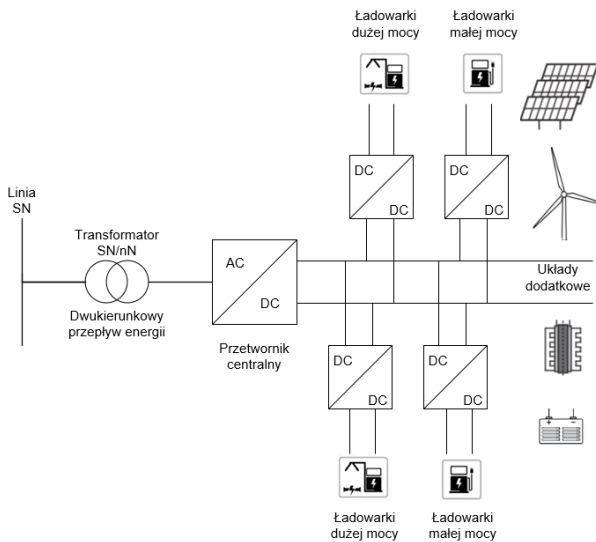
Na podstawie rysunku 3 można zauważyć, jak wiele czynników może mieć wpływ na zapotrzebowanie na energię przez autobus elektryczny. Tak jak wcześniej wspomniano, największym z nich jest klimat powodujący zwiększenie zużycia energii przez układy HVAC oraz topografia terenu, gdzie częste podjazdy mogą powodować większe zapotrzebowanie na energię. Należy zwrócić również uwagę jak dużym wyzwaniem jest dobór odpowiedniej pojemności baterii pojazdu oraz rozplanowania tras miejskich. Ten sam autobus w różnych warunkach jazdy może zużywać energię w zakresie od 0,8 do 2,82 kWh/km. Na podstawie powyższych danych, przyjmując sprawności ładowania na poziomie 90% oraz trasę o długości 150 kilometrów [10] można wyliczyć, że dzienne zapotrzebowanie na energię ze stacji ładowania jednego autobusu elektrycznego w zależności od warunków mieści się będzie w zakresie od około 133 do 470 kWh. Można więc zauważyć, że przy wspomnianych założeniach, wcześniej przytoczony przykład 130 autobusów elektrycznych będzie wiązał się z dziennym zużyciem energii od 16 do 61 MWh. W skali kraju spodziewane zużycie związane z wprowadzeniem coraz bardziej powszechnego elektrycznego transportu publicznego będzie mieścić się na poziomie setek GWh, dlatego też bardzo ważnym aspektem jest mądre rozplanowanie sposobów oraz ilości stacji ładowania. Należy dodać, że ładowanie autobusów na końcowych przystankach będzie wymagało znacznych nakładów na budowę linii energetycznych oraz stacji SN/nn.

Stacja ładowania pojazdów elektrycznych

Jednym z najważniejszych układów współpracujących z autobusami elektrycznymi jest układ odpowiedzialny za doprowadzenie energii. Schemat stacji ładowania pojazdów elektrycznych został przedstawiony na rysunku 4.

Zasadniczo stacje podłączane są do sieci po stronie niskiego napięcia, a ich zakres ładowania mieści się na poziomie od 550 do 750 kV DC [12]. Na schemacie rozróżniono dwa sposoby ładowania: pantografowe dużej mocy oraz małej mocy z wykorzystaniem ładowarek plug-in. W niniejszym artykule nie rozważano możliwości

zastosowania bezprzewodowego ładowania indukcyjnego autobusów elektrycznych ze względu na brak ekonomicznej zasadności zastosowanego tego rozwiązania oraz jego marginalnego udziału wśród ładowarek w porównaniu z dwoma wspomnianym wcześniej pozostałymi sposobami. Ponadto została zaznaczona możliwość wsparcia stacji przez układy dodatkowe. Jednym z nich są odnawialne źródła energii, których wykorzystanie zwiększa efektywność środowiskową autobusu elektrycznego.



Rys.4. Schemat stacji ładowania autobusów elektrycznych [11]

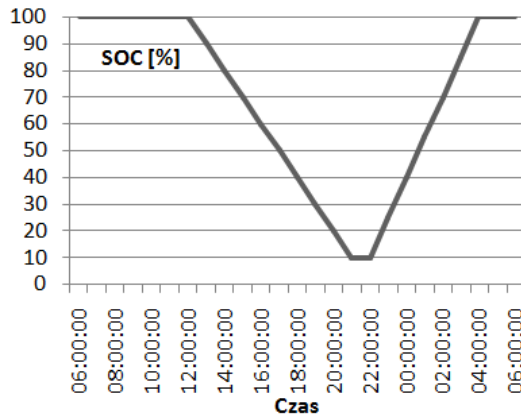
W krajach w których generacja energii elektrycznej oparta jest w znacznym stopniu na konwencjonalnych elektrowniach wykorzystanie autobusu elektrycznego wiąże się z pośrednią emisją zanieczyszczeń środowiskowych w miejscu generacji energii elektrycznej. Instalacja źródeł takich jak panele fotowoltaiczne czy też elektrownie wiatrowe poprawia wspomnianą efektywność oraz umożliwia oddanie energii do sieci w sytuacji, w której autobusy nie są ładowane. Ponadto układami dodatkowymi mogą być instalacje bateryjne czy też ogniwa paliwowe. Warto zauważyć, że autobusowe akumulatory energii, które na skutek spadku ich pojemności po określonym cyklu ładowań i rozładowań nie nadają się do dalszego wykorzystania w pojazdach mogą również służyć jako magazyn energii w stacjach takich jak na rysunku 4.

Charakterystyka pracy stacji ładowania autobusu elektrycznych z wykorzystaniem wtyczek plug-in

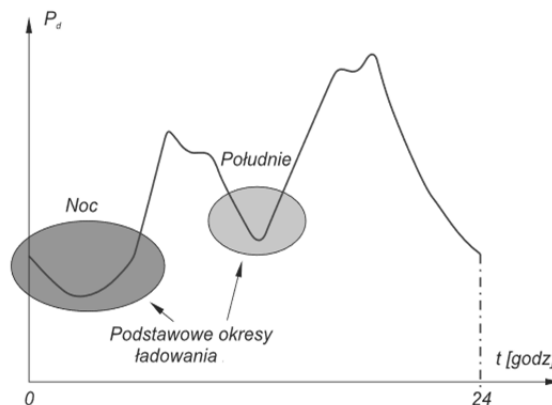
Jedną z dwóch powszechnie stosowanych metod ładowania autobusu elektrycznego jest zastosowanie ładowarek z wtyczką plug-in. Ładowanie tego typu zazwyczaj odbywa się w nocy w zajezdni operatora komunikacji miejskiej. Warto podkreślić, że dostępne jest ładowanie zarówno prądem stałym jak i przemiennym co determinuje rodzaj zastosowanego wtyku. Drugie z wymienionych rozwiązań jest rzadko spotykane ze względu na konieczność zastosowania instalacji prostownika w pojeździe elektrycznym, co wpływa na zwiększenie jego masy oraz zmniejszenie przestrzeni pasażerskiej. Maksymalna stosowana obecnie moc ładowarek tego typu wynosi 150 kW [12]. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe SOC pojazdu ładowanego z wykorzystaniem ładowarki plug-in.

Na podstawie powyższej charakterystyki można zauważyć, że pojazd eksploatowany jest bez dodatkowego ładowania na trasie. Wykorzystane w nim baterie muszą charakteryzować się wysoką pojemnością tak aby zapewnić

energię wymaganą na pokonanie dystansu wyłącznie na jednym ładowaniu. W czasie przerwy nocnej autobus elektryczny zostaje ponownie naładowany do 100% SOC. Warto podkreślić, że zastosowanie tego typu ładowania może być szczególnie korzystne z punktu widzenia krzywej obciążenia polskiego Krajowego Systemu Elektroenergetycznego [13] co zostało przedstawione na rysunku 6.



Rys.5. SOC pojazdu ładowanego ładowarką plug-in



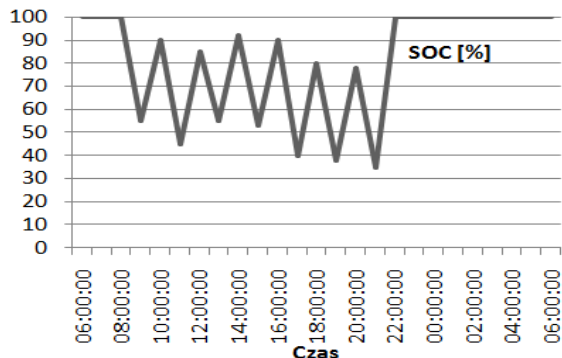
Rys.6. Krzywa obciążenia systemu elektroenergetycznego [14]

Jeżeli autobusy elektryczne będą ładowane w trakcie nocnej oraz przedpołudniowej doliny zapotrzebowania na energię elektryczną będzie to miało znaczący wpływ na wyrównanie się krzywej zapotrzebowania na energię. Jest to bardzo użyteczne z punktu widzenia pracy systemu. Szczególnie w czasie trwania przerwy nocnej, w trakcie której elektrownie konwencjonalne pracują na poziomie minimum technicznego, a nadmierna generacja z OZE może spowodować ich odłączenie, dodatkowe obciążenie w systemie jest bardzo korzystne.

Charakterystyka pracy stacji ładowania autobusu elektrycznych z wykorzystaniem pantografu

Drugą powszechnie stosowaną metodą ładowania autobusów elektrycznych jest zastosowanie ładowarek pantografowych. Są one wykorzystywane przede wszystkim na pętach końcowych na trasie autobusu. Po wystąpieniu komunikacji pomiędzy stacją ładującą, a autobusem elektrycznym następuje wysunięcie pantografu i rozpoczęcie ładowania. W zależności od konfiguracji układu pantograf może być wysuwany ze stacji ładującej lub z pojazdu. Wykorzystanie rozwiązania tego typu umożliwi

bardzo szybkie naładowanie baterii pojazdu, których zarówno ilość jak i pojemność może być niska. Wiąże się to bezpośrednio z obniżeniem masy pojazdu oraz zwiększeniem powierzchni pasażerskiej. Maksymalna moc dostępnych na rynku ładowarek pantografowych mieści się na poziomie do 750 kW [12]. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe SOC pojazdu ładowanego z wykorzystaniem ładowarki pantografowej.



Rys.7. SOC pojazdu ładowanego ładowarką pantografową

Analizując charakterystykę przedstawioną na rysunku 7 można zauważyć, że ładowarka pantografowa umożliwia częste oraz szybkie ładowanie baterii autobusu elektrycznego. Należy jednak podkreślić, że rozwiązanie tego typu wymaga dostępności infrastruktury elektroenergetycznej zasilającej stacje ładowania oraz generalnej akceptacji przedsiębiorstwa świadczącego usługi transportu publicznego na ustawienie pantografu elektrycznego na jednym z przystanków autobusowych.

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie obecnie powszechnie stosowanych technologii ładowania oraz ich parametrów charakterystycznych.

Parametry	Metoda ładowania	
	Ładowanie pantografowe	Ładowanie plug-in
Typ baterii	High Power	High Energy
Pojemność baterii	■ □ □ Niższa	■ ■ □ Wyższa
Czas ładowania	■ ■ ■ Niższy	■ □ □ Wyższy
Częstotliwość ładowania	■ □ □ Wyższa	■ ■ ■ Niższa
Moc ładowania	■ ■ ■ Wyższa	■ □ □ Niższa
Lokalizacja punktów ładowania	Przystanki autobusowe	Zajezdnia
Sposób podłączenia	Pantograf	Plug-in

Rys.8. Stacje ładowania pojazdów elektrycznych

Podsumowanie

Wprowadzone przez Unię Europejską oraz Polskę regulacje prawne sprawiają, że transport publiczny oparty na zeroemisyjnych autobusach elektrycznych staje się coraz bardziej powszechny. Wykorzystanie autobusów elektrycznych wiąże się ze zmniejszeniem emisji zarówno hałasu jak i zanieczyszczeń środowiskowych szkodliwych

dla zdrowia i życia ludzkiego, a także powodujących powstawanie efektu cieplarnianego. Wpływ na efektywność środowiskową autobusu elektrycznego ma jego zużycie energii zależne od wielu czynników, do których w szczególności należy stopień wykorzystania układów HVAC. Jednym z nieodłącznych elementów towarzyszących wprowadzeniu taboru opartego na pojazdach elektrycznych jest budowa oraz dostępność odpowiedniej infrastruktury ładowania. Obecnie dwoma najbardziej powszechnymi i zasadnymi pod względem ekonomicznym rozwiązaniami są ładowanie z wykorzystaniem wtyczki plug-in oraz pantografowe. Ich charakterystyka pracy zasadniczo wpływa na możliwości wykorzystania pojazdu, jego potencjalny zasięg na jednym ładowaniu, pojemność oraz typ zainstalowanych baterii jak również infrastrukturę elektryczną w zajezdniach oraz na przystankach. Ładowarki pantografowe charakteryzujące się dużą mocą ładowania wykorzystywane są na trasie pojazdu natomiast ładowarki plug-in stosowane są w zajezdniach w trakcie dłuższych postojów taboru. Wybór zastosowanego rozwiązania zależy od dostępności infrastruktury oraz decyzji operatora transportu publicznego.

Autor: mgr inż. Franciszek Sidorski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: franciszek.d.sidorski@doctorate.put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Ogur E., Kariuki S.M., Effect of Car Emissions on Human Health and the Environment, *International Journal of Applied Engineering Research*, 21 (2014), vol.9, 11121-11128
- [2] Islam Md., Shareef H., Mohamed A., A Review of Techniques for Optimal Placement and Sizing of Electric Vehicle Charging Stations, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.8, 122-126
- [3] Sidorski F., Piłkuła M., Sierszyński M., Piotrowski A., Autobusy napędzane silnikiem elektrycznym w zeroemisyjnym transporcie publicznym, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering* 95 (2018), 287-297
- [4] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych, Warszawa (2018)
- [5] www.mpk.poznan.pl
- [6] Rusak Z., Tytuł International Bus of the Year dla new Solaris Urbino electric, *Autobusy*, 7-8 (2016), 12-20
- [7] Azidin F., Hannan M., Mohamed A., Renewable Energy Technologies and Hybrid Electric Vehicle Challenges, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.8, 150-156
- [8] Kasprzyk L., Analysis of energy recovery possibilities from motor vehicles, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.4, 235-238
- [9] Andersson M., Energy storage solutions for electric bus fast charging stations, Uppsala University (2017), 20
- [10] www.transport-publiczny.pl
- [11] Iunnissi S.A., Architecture and Control of an Electric Vehicle Charging Station Using a Bipolar DC Bus, Toronto (2016), 15
- [12] Dobrzycki A., Filipiak M., Jajczyk J., Zasilanie układów ładowania akumulatorów autobusów elektrycznych, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering* 92 (2017), 25-35
- [13] Flaszka J., Matuszczyk P., Elektromobilność w Polsce a systemy OZE, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr.1, 33-36
- [14] Adamowicz M., Guziński J., Infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych, *Maszyny i Napędy*, 1 (2014), 74-83