

# Rozwój elektromobilności w miejskim transporcie zbiorowym w Krakowie<sup>1</sup>

**MARIUSZ SZAŁKOWSKI**

mgr inż., Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie,  
ul. Jana Brożka 3, 30-347 Kraków,  
e-mail: mszalkow@mpk.krakow.pl

**RYSZARD WRÓBEL**

mgr inż., Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie,  
ul. Jana Brożka 3, 30-347 Kraków,  
e-mail: rwrobel@mpk.krakow.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono rozwój elektromobilności w krakowskim transporcie zbiorowym w zakresie wprowadzenia do eksploatacji bezemisyjnych autobusów elektrycznych. Zaprezentowano działania mające na celu redukcję zanieczyszczeń w Krakowie pochodzących od transportu zbiorowego, począwszy od zmieniających się przepisów ograniczających emisję zanieczyszczeń w stosowanych dotychczas silnikach spalinowych diesla, poprzez zastosowanie napędów hybrydowych aż do wprowadzenia do eksploatacji autobusów elektrycznych. Opisano najczęściej stosowane rozwiązania techniczne i pierwsze krakowskie doświadczenia z autobusami elektrycznymi oraz początki ich regularnej eksploatacji. Scharakteryzowano podjęte działania mające na celu optymalizację wykorzystania autobusów elektrycznych w pracy na liniach. Na bazie obecnego stanu wdrożenia, zaprezentowano plany i zamierzenia w tym zakresie w najbliższych latach oraz zagrożenia wynikające z braku ustabilizowanych standardów w zakresie rozwiązań technicznych.

**Słowa kluczowe:** transport miejski, transport zbiorowy, elektromobilność, autobus elektryczny.

## Wprowadzenie

Pierwsza norma emisji spalin Euro 1 dla silników stosowanych w autobusach komunikacji miejskiej zaczęła obowiązywać w 1992 roku, a trzy lata później wprowadzono kolejną normę Euro 2. W latach dziewięćdziesiątych wszystkie pojazdy silnikowe spełniające normy emisji spalin Euro nazywane były pojazdami niskoemisyjnymi, a standardem, do którego dążyli producenci silników, była norma Euro 3, która zaczęła obowiązywać od roku 2000.

W kolejnych latach zaczęły obowiązywać normy Euro 4 (2005), Euro 5 (2008) i Euro 6 (2013), dla osiągnięcia których najtańszą drogą było zastosowanie zewnętrznej obróbki spalin.

Zastosowanie silników Euro 6 nie rozwiązuje problemów braku dostępu do czystego powietrza w aglomeracjach miejskich. Efektem każdego procesu spalania jest dwutlenek węgla, którego ilość jest proporcjonalna do ilości spalonego paliwa, a ta zwiększa się wraz z unowocześnianiem konstrukcji pojazdu i zwiększaniu ilości urządzeń pokładowych do zasilania. W przypadku obecnej konstrukcji autobusu miejskiego wzrost zużycia, w stosunku do konstrukcji z lat dziewięćdziesiątych, wzrasta o 30%.

Problemu nadmiernej ilości spalin nie rozwiązują paliwa alternatywne, które ich nie wyeliminują, a jedynie mogą zmienić skład oraz nieznacznie zmniejszyć ilość. W Krakowie eksploatowanych jest pięć autobusów zasilanych gazem CNG, których dwunastoletnia eksploatacja nie reko-

menduje tej formy zasilania jako drogi do osiągnięcia czystego powietrza w mieście.

W ostatnim dziesięcioleciu, oprócz zmian konstrukcyjnych silników, zmianie uległa również jakość paliw, jaką osiągnięto drogą administracyjną poprzez nowe wymagania jakościowe paliw dopuszczonych do obrotu handlowego. Najbardziej widocznym działaniem było zmniejszenie zawartości siarki z 50 mg do 10 mg w każdym kg oleju napędowego, w wyniku którego zmniejszyła się pięciokrotnie emisja SO<sub>2</sub> do atmosfery z 0,1 gSO<sub>2</sub> do 0,02 gSO<sub>2</sub> ze spalania każdego kg paliwa.

Obecna najwyższa norma emisji spalin, stała się możliwa do osiągnięcia tylko przy zastosowaniu dodatkowej obróbki spalin poza komorą spalania, ale przed emisją do atmosfery. W efekcie do atmosfery wydzielamy więcej gazów cieplarnianych, ale nieszkodliwych dla środowiska. Efekt ekologiczny został osiągnięty dzięki zastosowaniu recyrkulacji spalin EGR, redukcji katalitycznej SCR oraz filtra cząstek stałych. Reduktorem tlenków azotu na nieszkodliwy azot i wodę jest dodatek AdBlue, który jest 32,5% wodnym roztworem mocznika o wysokiej czystości. W autobusie jest on przechowywany w oddzielnym zbiorniku, skąd za pomocą specjalnej instalacji podawany jest do wtryskiwacza dozującego AdBlue do katalizatora SCR. Używanie rozbudowanego układu oczyszczania spalin jest bardzo uciążliwe dla użytkownika pojazdu.

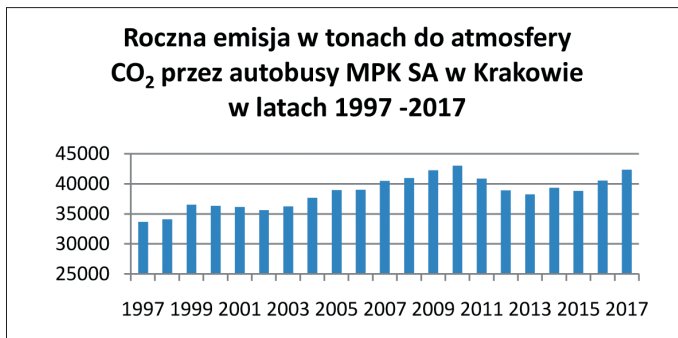
Ciągle zmniejszanie norm emisji spalin spowodowało problemy producentów silników. W okresie ostatnich dziesięciu lat obowiązywania norm emisji spalin Euro z rynku motoryzacyjnego zniknęli wszyscy krajowi producenci silników spalinowych montowanych w autobusach komunikacji miejskiej. Na rynku pozostali tylko producenci silników, będących częścią dużych koncernów, którzy byli w stanie dostosować swoje wyroby do nowych wymagań.

Jak wynika z Raportu Rady Miasta Krakowa<sup>2</sup>, zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego stanowi obecnie największy problem środowiskowy Gminy Miejskiej Kraków. Przez około 150 dni w roku przekraczane są poziomy normatywne wartości stężeń pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub>, pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> benzo(a)pirenu oraz dwutlenku azotu. Według raportu emisja komunikacyjna ma około 44% udział w zanieczyszczeniu powietrza tlenkami azotu oraz około 20% w zanieczyszczeniu pyłami.

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: M. Szalkowski 50%, R. Wróbel 50%.

<sup>2</sup> PGN dla Gminy Miejskiej Kraków, załącznik do Uchwały Nr XXVI/426/15 Rady Miasta Krakowa z dnia 7 października 2015 roku.

Według raportu, efektem wszystkich działań proekologicznych w Krakowie jest zmniejszenie w latach 1995–2013 emisji PM10 o 59,4%, PM2,5 o 22,5%, SO<sub>2</sub> o 79%, NO<sub>x</sub> o 10%, CO<sub>2</sub> o 42%. W tym samym okresie wzrosła liczba mieszkańców o 1,9%, a liczba pojazdów aż o 147%. Pomimo tak dużych dotychczasowych efektów dalsze zmniejszenie emisji nie jest możliwe bez eliminacji spalania paliw węglowodorowych w silnikach. Nawet najbardziej czyste spalanie paliw powoduje wciskanie do miejskiej atmosfery tysięcy ton dwutlenku węgla, którego nadmiar nie jest obojętny dla naszej egzystencji.



Rys. 1. Roczna emisja do atmosfery CO<sub>2</sub> przez autobusy MPK SA w Krakowie

Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

Poszukiwania alternatywnego dla silnika spalinowego źródła napędu dla pojazdów samochodowych, w tym dla autobusów komunikacji miejskiej, są wynikiem konieczności podjęcia skutecznych działań zmniejszających emisję zanieczyszczeń, przede wszystkim w dużych miastach. Stosowana przez dziesiątki lat struktura napędów w komunikacji miejskiej – spalinowe autobusy i elektryczne tramwaje – ukształtowała pewien stereotyp podejścia do rozwiązań technicznych w komunikacji miejskiej. Próby zastąpienia paliwa w autobusach, czyli oleju napędowego gazem propan butan i ziemnym nadal bazowały na założeniu, że najlepszym i praktycznie wyłącznym źródłem napędu w autobusach ma być silnik spalinowy, mimo że charakterystyka trakcyjna silnika spalinowego jest o wiele mniej korzystna w ruchu miejskim niż silnika elektrycznego [1, 2].

### Rozwój napędu elektrycznego w autobusach komunikacji miejskiej

Alternatywą dla napędu konwencjonalnego stało się wprowadzenie zasilania elektrycznego znanego z pojazdów szynowych i transportu wewnątrzzakładowego. Napęd elektryczny eliminuje całkowicie lokalną emisję spalin, przenosząc ją do źródła jej produkcji, gdzie możliwości jej oczyszczenia i rozproszenia są znacznie większe.

Prawdą jest, że obecna produkcja energii elektrycznej jest oparta na węglu, którego spalanie jest źródłem emisji zanieczyszczeń do powietrza w miejscu jej wytwarzania. Według najnowszych danych Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami z grudnia 2017 roku dla energii elektrycznej wskaźniki emisyjności wynoszą:

- CO<sub>2</sub> – 781 kg/MWh (g/kWh),
- SO<sub>2</sub> – 0,818 kg/MWh (g/kWh),

- NO<sub>x</sub> – 0,824 kg/MWh (g/kWh),
- CO – 0,252 kg/MWh (g/kWh),
- Pyły<sup>3</sup> – 0,052 kg/MWh (g/kWh).

Wartości te będą się zmniejszać w miarę zwiększania udziału OZE w produkcji energii elektrycznej oraz stosowania paliw alternatywnych. Uwzględniając jednak lokalne skutki stosowania paliw węglowodorowych, napęd zeroemisyjny jest jedynym skutecznym sposobem rozwiązania problemów nadmiernej emisji w Krakowie.

Napęd elektryczny w pojazdach samochodowych nie jest żadną nowością. Próby zastosowania napędu elektrycznego w pojazdach były podejmowane w początkowej fazie rozwoju samochodu, ale zostały wyparte przez napędy spalinowe oparte na paliwach ropopochodnych. Przyczyną porażki samochodu elektrycznego były ciężkie akumulatory, długi czas ładowania i mały zasięg pojazdu.

Pomimo dynamicznego rozwoju napędów spalinowych napęd elektryczny nie został zapomniany. Nadal trwały prace projektowe i studialne, a efektem ich były konstrukcje napędu spalinowo-elektrycznego, elektrycznego z magazynami energii, z ogniwami paliwowymi. Pierwsze widoczne uznanie zyskały dopiero autobusy hybrydowe, spalinowo-elektryczne, w układzie równoległym lub szeregowym, z magazynem energii w bateriach litowo-jonowych lub kondensatorach.

Podstawową trudnością w zastosowaniu napędu elektrycznego w autobusach był problem ze zmagazynowaniem dostatecznego zapasu energii elektrycznej pozwalającej na efektywną pracę autobusu w komunikacji miejskiej. Rozwiązaniem tego problemu był trolejbus, ale poprzez konieczność stałego zasilania go z sieci trakcyjnej tracono jedną z największych zalet autobusu, czyli autonomię poruszania się w sieci ulic. Aby pokonać tę niedogodność stosuje się dwa podstawowe rozwiązania:

- autobus posiada zasobniki energii na pokładzie, które muszą być, po określonym przebiegu, doładowane ze źródeł zewnętrznych,
- autobus posiada generator prądu na pokładzie, który poprzez odpowiednio dobrany układ elektryczny zasilania silniki trakcyjne.

Pierwsze z rozwiązań jest prostsze technicznie, jednak powoduje straty efektywności wykorzystania autobusu ze względu na czas potrzebny do doładowania baterii. Najprostszym, powszechnie stosowanym sposobem ładowania zasobników energii w autobusie jest złącze plug-in. Ze stacjonarnej ładowarki wyprowadzany jest przewód z odpowiednią wtyczką, którą należy włączyć do specjalnego gniazda w autobusie (fot. 1).

Wadą tego rozwiązania jest konieczność ręcznego załączenia i rozłączenia wtyczki, co powoduje, że miejsce ładowania musi być odpowiednio zabezpieczone przed dostępem przypadkowych osób, oraz stosunkowo długi czas

<sup>3</sup> Mieszaniny zawieszone w powietrzu cząsteczek o średnicy nie większej niż 10 lub 2,5 μm.



Fot. 1. Złącze plug-in w autobusie elektrycznym  
Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

potrzebny do pełnego naładowania zasobników energii (w tym przypadku akumulatorów), gdyż z reguły moc urządzeń do ładowania nie przekracza 100 kW. W tym przypadku wymagana jest stosunkowo duża masa baterii tak, by ich pojemność zapewniła odpowiedni przebieg autobusów. Innym sposobem ładowania autobusów jest zautomatyzowanie procesu łączenia się autobusu z ładowarką, na przykład poprzez użycie do tego celu pantografu (fot. 2). Stosowane są dwa podstawowe rozwiązania: pantograf jest zamontowany na dachu autobusu, a stacja bazowa do ładowania wyposażona jest w odpowiednie szyny, z którymi po podniesieniu łączy się głowica pantografu. Drugie z rozwiązań jest odwróceniem poprzedniego układu, czyli pantograf znajduje się na stacji bazowej i jest opuszczany na zamontowane na dachu autobusu szyny. W obu wersjach rozwiązanie to jest bezpieczne dla osób postronnych, gdyż miejsce styku pantografu z szynami znajduje się poza ich zasięgiem. Ponadto umożliwia ładowanie znacznie większą mocą, aktualnie do 400 a nawet, 600 kW, przez co znacznie skraca się czas ładowania, co umożliwia większą efektywność wykorzystania autobusu do przewozu pasażerów.

Ponadto takie rozwiązanie polega na częstym uzupełnianiu energii akumulatorów w krótkim czasie w okresie postoju autobusu na końcówce w takiej ilości, aby wystarczyło jej na wykonanie przejazdu do następnej możliwości



Fot. 2. Złącze pantografowe typu Schunk w autobusie elektrycznym  
Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

jej uzupełnienia, dzięki czemu pojemność baterii, a co za tym idzie ich masa może być znacząco mniejsza niż w rozwiązaniu tylko plug-in. Trzecim ze stosowanych w praktyce sposobów ładowania autobusu elektrycznego ze źródła zewnętrznego jest wykorzystanie indukcji elektromagnetycznej. Nie wymaga ono bezpośredniego styku elektrycznego między ładowarką i autobusem. Należy jednak zbudować w jezdni odpowiedni układ wytwarzający w momencie ładowania silne pole magnetyczne oraz odpowiedni układ w podwoziu autobusu, przekształcający strumień magnetyczny w energię elektryczną. Spośród trzech wyżej wymienionych rozwiązań jest to układ zdecydowanie najdroższy i jak do tej pory stosowany sporadycznie. Zapewnia on jednak najkrótszy czas ładowania autobusu.

Możliwe jest także wymienianie rozładowanych baterii na inne, naładowane poza autobusem. Rozwiązanie to stosowane jest rzadko, gdyż wymaga skoncentrowania baterii w autobusie w jednym, łatwo dostępnym z zewnątrz miejscu na palecie umożliwiającej łatwe wyciąganie i wkładanie baterii do autobusu oraz rozbudowanej infrastruktury dla sprawnego wkładania i wyciągania zespołu baterii oraz efektywnego ich ładowania poza autobusem. W tym celu buduje się specjalne terminale do szybkiej wymiany i ładowania baterii.

Drugim z rozwiązań umożliwiających autonomiczną jazdę autobusu elektrycznego jest wyposażenie go w generator prądu, który uniezależnia go od ładowania z zewnętrznych źródeł. Najczęściej stosowanym układem jest szeregowa hybryda spalinowo elektryczna. W rozwiązaniu tym źródłem napędu autobusu są elektryczne silniki trakcyjne, a silnik spalinowy wraz z odpowiednim generatorem służy jedynie do wytwarzania energii elektrycznej. Takie rozwiązanie powszechnie stosowane jest od dziesiątek lat, na przykład w lokomotywach spalinowo-elektrycznych. Przewagą tego rozwiązania nad silnikiem spalinowym, jako bezpośrednim źródłem napędu, jest możliwość uniezależnienia pracy silnika spalinowego od chwilowej sytuacji ruchowej, a dzięki temu zaprogramowanie jego pracy w optymalnym dla danej konstrukcji przedziale obrotów, co skutkuje możliwością uzyskania maksymalnej efektywności jego pracy, a w praktyce przekłada się na mniejsze jednostkowe zużycie paliwa niż w przypadku zastosowania napędu bezpośredniego. Oczywiście wadą tego rozwiązania jest niewyeliminowanie emisji spalin z silnika spalinowego. Jednak dzięki mniejszemu zużyciu oleju napędowego niż w układzie z klasycznym napędem spalinowym wielkość emisji spalin jest mniejsza. Ponadto, stosując dodatkowo w układzie zasobniki energii elektrycznej, można tak sterować pracą silnika, aby w pewnych strefach (na przykład w centrum miasta lub innych obszarach chronionych) był on wyłączony i wtedy jazda autobusu jest całkowicie bezemisyjna. Poza tymi strefami pracujący silnik spalinowy wraz z generatorem prądu ponownie będzie produkował energię do zasilania silników trakcyjnych i równocześnie ładował zasobniki energii pozwalające zgromadzić jej zapas na kolejny odcinek bezemisyjnej jazdy. Efekty wdrożeniowe takich prac widoczne są już w Krakowie, gdzie eksploatowane

są autobusy hybrydowe Solaris i Volvo. Na rynku dostępne są również autobusy hybrydowe innych producentów, których zasada działania napędu jest podobna. Zasadą każdej hybrydy jest współpraca co najmniej dwóch układów napędowych, najczęściej spalinowo-elektrycznych, zasilanych różnymi źródłami energii. W Krakowie można spotkać hybrydy w konfiguracji szeregowej i równoległej. W konfiguracji szeregowej silnik spalinowy połączony jest z generatorem, który jest źródłem energii elektrycznej magazynowanej w akumulatorach, a ta poprzez silnik trakcyjny i przekładnię napędza pojazd. W tym rozwiązaniu nie ma mechanicznego połączenia pomiędzy silnikiem spalinowym a kołami napędowymi. W drugim rozwiązaniu, w układzie równoległym silnik spalinowy jest wspomagany przez silnik elektryczny, który potrzebną energię czerpie z akumulatora. Energia w akumulatorze pochodzi z odzysku energii hamowania oraz jej nadwyżki w silniku spalinowym.

Innym sposobem wykorzystania generatora prądu na przykładzie autobusu jest zastosowanie ogniw paliwowych do produkcji energii elektrycznej. Źródłem zasilania ogniw paliwowych może być czysty wodór, dzięki czemu uzyskuje się całkowicie „czystą energię”. Takie rozwiązanie wymaga jednak pozyskania źródła wodoru do zasilania ogniw. Aktualnie, właśnie ze względu na wysoką cenę czystego wodoru, rozwiązanie to stosowane jest w stosunkowo niewielkiej skali, jednak ewentualna zmiana relacji ekonomicznych w tym zakresie może przynieść upowszechnienie się tego rozwiązania. Pionierem w konstruowaniu autobusów z ogniwami wodorowymi był Mercedes Benz, ale obecnie takie rozwiązania już oferuje na rynku wielu producentów autobusów.

Istota różnic poszczególnych typów autobusów elektrycznych tkwi w zastosowanym układzie napędowym, magazynie energii i sposobie jego uzupełniania. Na rynku dostępnych jest wiele wersji kompletacji autobusów elektrycznych przygotowanych na potrzeby potencjalnych klientów. Konstrukcja autobusu elektrycznego wymusiła zmianę sposobu napędu i zasilania osprzętu dodatkowego. W tym przypadku wykorzystywany jest napęd elektryczny korzystający z energii w bateriach trakcyjnych. W konstrukcjach pierwszych autobusów elektrycznych widoczne było różne podejście do zagospodarowania wnętrza pojazdu, rozkładu nacisku na osie czy jego masy własnej. We wszystkich konstrukcjach i ich modyfikacjach konstruktorzy ograniczali do minimum ilość baterii wewnątrz autobusu, wprowadzali nowe i lżejsze materiały.

Użytkownicy autobusów elektrycznych oczekują konstrukcji, której możliwości trakcyjne będą porównywalne z pojazdami z napędem konwencjonalnym. W okresie, gdy rozpoczynano prace wdrożeniowe w Krakowie, każdy pojazd od producenta europejskiego był prototypem lub pojazdem wyprodukowanym w kilku egzemplarzach. Jedynie kilku producentów azjatyckich oferowało autobusy wyprodukowane w tysiącach sztuk.

Magazyny energii są tym elementem, w którym tkwią obecne ograniczenia eksploatacyjne autobusów. Każdy autobus, niezależnie od rodzaju napędu, musi spełniać obowiązujące przepisy dotyczące jego warunków technicznych,

w tym dopuszczalnych nacisków na poszczególne osie. Z tego powodu ilość baterii w poszczególnych typach autobusów jest kompromisem oczekiwanego zasięgu bez doładowania oraz ilości przewożonych pasażerów. W Krakowie eksploatowane są autobusy o długości 12 metrów z akumulatorami 160 kWh i 240 kWh, które różnią się zasięgiem oraz ilością przewożonych pasażerów. Autobusy przegubowe wyposażone są w baterie o zdolności magazynowania energii 200 kWh. Standardem obecnych autobusów elektrycznych jest odzysk energii hamowania, która magazynowana jest w akumulatorach, a następnie wykorzystywana do napędu pojazdów.

Wraz ze zmianą konstrukcji napędów autobusów elektrycznych zmieniło się podejście do sposobu ogrzewania przestrzeni pasażerskiej. Na rynku dostępne są wersje pojazdów z ogrzewaniem energią elektryczną, z wykorzystaniem pompy ciepła i za pomocą agregatu grzewczego zasilanego olejem napędowym lub gazem. Każde z tych rozwiązań ma zalety i wady, jednak rodzaj jego zastosowania zależy od warunków eksploatacji i oczekiwanego komfortu przejazdu. W autobusach eksploatowanych w Krakowie zmiana sposobu ogrzewania zmieniała się wraz z kolejnymi zakupami tych pojazdów. Nie sprawdziły się rozwiązania ogrzewania tylko elektrycznych, a najbardziej efektywne okazały się rozwiązania mieszane tj. elektryczne, wspomagane przy znacznych spadkach temperatury ( $-5^{\circ}\text{C}$ ) agregatem spalinowym.

Wszystkie oferowane autobusy elektryczne posiadają własne dedykowane systemy ładowania. Każdy z nich pozwala uzupełnić energię w bateriach poprzez złącze plug-in prądem stałym lub zmiennym, jeśli ładowarka zamontowana jest na pojeździe.

W celu uzupełnienia energii w trakcie jazdy autobusy przystosowane są do ładowania szybkiego dużymi mocami za pomocą pantografu na pojeździe, opuszczanego z wysięgnika lub indukcyjnie. Każda z tych form jest dostępna w oferowanych na rynku autobusach. Duża różnorodność występuje w zakresie umiejscowienia złącza plug-in, które najczęściej wzorowane jest na lokalizacji wlewu paliwa w autobusach z silnikiem spalinowym.

Autobusy elektryczne w Krakowie stały się nośnikiem pozytywnych odczuć proekologicznych, gdyż jako pojazdy ciche, bezemisyjne, w przyjaznych kolorach, mają zachęcić do rezygnacji z transportu indywidualnego na rzecz zbiorowego oraz do zakupu samochodu osobowego elektrycznego.



Fot. 3. Autobusy elektryczne Solaris U12 Electric  
Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych stała się sygnałem dla producentów autobusów, aby rozpocząć produkcję pojazdów napędzanych czystymi źródłami energii. Zapotrzebowanie na pojazdy elektryczne wywołało zainteresowanie także firm bez doświadczenia motoryzacyjnego lub z bardzo małym i skłoniło do rozpoczęcia produkcji autobusów elektrycznych.

### Infrastruktura ładowania autobusów elektrycznych

Nierozłącznym elementem autobusów elektrycznych jest infrastruktura ładowania, z którą mają one współpracować. Brak możliwości ładowania lub niewydolna infrastruktura wyłączy z eksploatacji nawet najlepsze pojazdy elektryczne. Najbardziej znane na rynku autobusy elektryczne mają możliwość ładowania plug-in lub ładowania na końcówkach linii oparte na stanowiskach z kopułą współpracującą z pantografami. Z obserwacji rynku infrastruktury ładowania wynika, że brakuje standardów ładowania autobusów elektrycznych.

W Krakowie przyjęto rozwiązanie ładowania wolnego plug-in oraz szybkiego za pomocą pantografu zamontowanego na autobusie, choć nie są to jedyne dostępne rozwiązania na rynku.

Jak wynika z informacji medialnych, grupa firm produkujących autobusy IRIZAR, SOLARIS, VDL oraz VOLVO oraz dostawców systemów ładowania ABB, Heliox i Siemens podjęły się współpracy nad opracowaniem wspólnego otwartego systemu ładowania autobusów elektrycznych.



Fot. 4. Infrastruktura dla autobusów elektrycznych w Stacji Obsługi autobusów Wola Duchacka  
Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

Uniwersalny system ma obejmować rozwiązania do szybkiego ładowania, takie jak automatyczne ładowanie pantografowe, komunikację bezprzewodową, płyty kontaktowe, a także infrastrukturę łączącą pojazd z pantografem. Dla autobusów elektrycznych ładowanych w zajezdni rodzaj wtyczki oraz system komunikacji między stacją ładowania a pojazdem będzie bazować na systemie szybkiego ładowania CCS.

Brak standardów ładowania stanowi problem eksploatacyjny u użytkownika. W Krakowie prowadzone były testy autobusów elektrycznych pochodzących od siedmiu producentów i każdy z tych pojazdów posiadał własny dedykowany przewód do ładowania, własną ładowarkę i złącza.

Dlatego też w Krakowie, poprzez wymagania przetargowe dla autobusów i stanowisk ładowania, udało się do-

prowadzić do ujednoczenia wymagań w zakresie pozwalającym ładować na tych samych stanowiskach autobusy zakupione w kilku kolejnych postępowaniach przetargowych.

Parametrami integrującymi autobusy i stanowiska ładowania były wymagania dotyczące położenia kopuły ładującej od krawężnika zatoki przystankowej (1350 mm), wysokości zawieszenia (4,3 m) i odległości od czoła zatoki przystankowej (9 m). Ładowarki umożliwiają ładowanie autobusów mocą do 250 kW, komunikacja pomiędzy stacją ładowania pojazdem ma się odbywać w oparciu o standardy ISO/IEC 15118 i DIN SPEC 70121, a zarządzanie ładowarkami zgodnie z OCPP 1.6.

Krakowski standard ładowania składa się z dwóch części: pantografu z głowicą (*contact head*), który jest zainstalowany na dachu autobusu elektrycznego, oraz z platformy zasilającej (*contact hood*), podłączonej do stacji ładowania, zawieszanej ponad autobusem elektrycznym na odpowiedniej wysokości minimum 4,5 m. Informacje o aktualnym procesie ładowania są wyświetlane w kokpicie autobusu, z poziomu którego kierowca potwierdza rozpoczęcie lub zakończenie ładowania. Platforma zasilająca połączona ze stacją ładowania jest wykonana w kształcie trapezu i wyposażona w 5 pól kontaktowych: biegun dodatni (DC+), biegun ujemny (DC-), styk ochronny (PE), styk komunikacyjny (CP), styk komunikacyjny (PP). Mogą być również wersje czteropolowe. Fizyczne połączenie pomiędzy autobusem elektrycznym i platformą zasilającą stanowi głowica z odpowiednio ułożonymi stykami, umieszczona na ramieniu pantografu. W podstawie pantografu umieszczony jest napęd elektryczny, który unosi ramię pantografu z głowicą poprzez sprężynę. Czas unoszenia pantografu to około 3 sekundy, natomiast czas opadania wynosi około 4,5 sekundy.

W krakowskiej drodze do elektromobilności prowadzono testy autobusu Rampinii, dla potrzeb którego wykonano bardzo proste stanowisko ładowania pantografowego, z dwoma przewodami „+” i „-”. Po rocznej eksploatacji, okazało się, że stanowisko nie spełnia najnowszych norm dotyczących bezpieczeństwa, więc należy je zlikwidować i zainstalować nowe rozwiązanie.

Stacje ładowania mogą być zasilane prądem zmiennym 3x400 V lub prądem stałym z sieci tramwajowej, trolejbusowej lub metra, jednak konstrukcja ładowarki zasilanej prądem stałym jest bardziej rozbudowana od tej zasilanej prądem zmiennym. Praktyka potwierdziła, że niezawodność instalacji zasilania prądem zmiennym jest wyższa od niezawodności instalacji zasilania prądem stałym.



Fot. 5. Stanowisko ładowania autobusu Rampinii „sposobem wiedeńskim”  
Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie



Fot. 6. Autobusy elektryczne testowane w Krakowie w 2013 roku (od lewej: Solaris, AMZ Kutno, BYD)  
Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

Wszyscy obecni użytkownicy autobusów elektrycznych, którzy dla swoich potrzeb wybudowali stacje ładowania autobusów, znaleźli się w pułapce związanej z koniecznością dostosowania swoich stanowisk do nowych wymagań technicznych, które będą dopiero wydane przez ministra energii.

Ustawa o elektromobilności zobowiązała ministra energii do określenia w drodze rozporządzenia szczegółowych wymagań technicznych dotyczących stacji ładowania i punktów ładowania, ich bezpieczeństwa eksploatacji, naprawy i modernizacji. Prezes UDT został zobowiązany do wstrzymania eksploatacji każdego punktu ładowania lub stacji ładowania, jeżeli nie spełniają one wymagań określonych w rozporządzeniu. Z projektu nowego rozporządzenia wynika, że będzie to ważny akt prawny określający szczegółowe wymagania techniczne stacji lub punktów ładowania dotyczące bezpieczeństwa ich eksploatacji, naprawy i modernizacji, szczegółowe wymagania techniczne dla gniazd wyjściowych lub złączy pojazdowych, terminy i sposób przeprowadzania badań oraz wykaz dokumentów składanych do wniosku o przeprowadzenie badań. Wszystkie stacje ładowania oddane do użytku przed wydaniem rozporządzenia będą musiały być przystosowane do nowych wymagań i uzyskać pozytywny audyt przeprowadzony przez UDT.

### Doświadczenia z eksploatacji autobusów elektrycznych w Krakowie oraz jej efekty

Pierwszy autobus elektryczny został zaprezentowany w Krakowie na terenie Stacji Obsługi Autobusów w Płaszowie w 2012 roku podczas uroczystego przekazania do ruchu autobusów spalinowych wyprodukowanych przez Solaris Bus & Coach. Był to dziewięćmetrowy midibus (fot. 6) ładowany metodą plug-in, o niewielkim – w porównaniu z dzisiejszymi standardami – zasięgu kilkudziesięciu kilometrów. Autobus wówczas nie posiadał jeszcze wszystkich wymaganych przepisami dopuszczeń do ruchu z pasażerami, dlatego skierowanie go do testu w ruchu liniowym nie było możliwe. Był to jednak wyraźny znak, nt. kierunku rozwoju trakcji autobusowej w najbliższej przyszłości przewidywanej przez krakowskiego przewoźnika.

Pierwsze jazdy testowe z pasażerami odbyły się rok później. Ich celem było uzyskanie pierwszych praktycznych doświadczeń, jak alternatywne zasilanie autobusów spraw-

dzi się w rzeczywistych warunkach eksploatacji z pasażerami. Ponieważ w tym czasie nie funkcjonował jeszcze normalny rynek autobusów elektrycznych, brak było też powszechnie przyjętych standardów i każdy z producentów stosował w autobusach elektrycznych własne, specyficzne rozwiązania techniczne i konstrukcyjne, zdecydowano o przetestowaniu wszystkich dostępnych wówczas autobusów z napędem elektrycznym. Do testów udało się sprowadzić do Krakowa autobusy od trzech producentów: dwóch z Polski i jednego z Chin (fot. 6). Były to autobusy:

- Solaris Urbino 8,9 LE (ten sam, który zaprezentowano rok wcześniej w Płaszowie)
- AMZ Kutno CS 10 E
- BYD K9C01

Każdy z autobusów kursował w ruchu liniowym przez około 2 tygodnie, gdyż w tym czasie dłuższe testy nie były możliwe ze względu na małą dostępność takich pojazdów. Niemniej pozwoliły one na zebranie pierwszych doświadczeń eksploatacyjnych, które stały się bazą do podjęcia w roku następnym decyzji o utworzeniu regularnej linii obsługiwanej autobusami elektrycznymi.

W dniu 29 kwietnia 2014 roku zainaugurowano regularną obsługę autobusami elektrycznymi linii 154, przebiegającej od Dworca Głównego do Prądnika Białego. Do obsługi tej linii sprowadzono do Krakowa następujące autobusy (fot. 6):

- Solaris Urbino 12 Electric,
- Rampini A1e EL,
- AMZ Kutno CS 10 E (znany już z testów rok wcześniej).

Najbardziej interesujące rozwiązania techniczne miał autobus Rampini, udostępniony przez Wiener Linien. Producentem autobusu była włoska firma Rampini, a napęd i osprzęt elektryczny dostarczył Siemens. Całkowita nowością w stosunku do poprzednio testowanych autobusów była możliwość doładowywania baterii za pomocą specjalnego pantografu zainstalowanego na dachu pojazdu. W tym celu przy Dworcu Głównym na ulicy Pawiej wykonano bocznicę od tramwajowej sieci trakcyjnej i doprowadzono przewody nad zatokę przystankową autobusu (fot. 7). Dzięki temu po zakończeniu każdego kursu autobus mógł doładowywać swoje baterie, co pozwoliło mu osiągać zasięg niedostępny dla autobusów wyposażonych



Fot. 7. Ulica Pawia. Na stanowisku ładowania stoi autobus Rampini (z lewej) obok przejeżdża elektryczny Solaris (z prawej)

Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

jedynie w gniazdo plug-in. Rozwiązanie wiedeńskie okazało się prawdziwie rewolucyjne, pozwalając na pokonanie, a przynajmniej na znaczne ograniczenie uciążliwości w eksploatacji autobusów elektrycznych, wykazanych we wcześniej testowanych rozwiązaniach. Zmodyfikowany później system doładowywania autobusów elektrycznych przez pantograf stał się podstawą obecnie przyjętego w Krakowie (a także wielu innych miastach) standardu technicznego dla tego rodzaju autobusów.

Linia 154, mimo że obsługiwana regularnie autobusami elektrycznymi, stanowiła poligon doświadczalny dla testowania różnorodnych rozwiązań stosowanych przez różnych producentów. Chcąc w miarę możliwości uniknąć stosowania rozwiązań niszowych, a z drugiej strony nie wiedząc, jakie standardy w autobusach elektrycznych się upowszechnią, zarząd MPK SA w Krakowie zdecydował o powstrzymaniu się w tym czasie od kupowania autobusów elektrycznych, a wszystkie eksploatowane pojazdy tego typu były pozyskiwane metodą długookresowych wypożyczeń i dzierżawy. W sumie w okresie testowania przewinęło się przez Kraków 10 autobusów elektrycznych pochodzących od 6 różnych producentów.

Doświadczenia zebrane w okresie testów pozwoliły podjąć przemyślaną decyzję o zakupie autobusów elektrycznych. Ze względu na specyfikę linii 154 jako pierwsze zostały zakupione autobusy elektryczne klasy midi. Zwycięzcą przetargu na zakup 4 takich autobusów został Solaris Bus & Coach. W dniu 2 września 2016 roku na placu przed dawnym budynkiem Dworca Głównego, skąd ponad 130 lat wcześniej rozpoczęły kursowanie w Krakowie pierwsze tramwaje elektryczne, przekazano do ruchu pierwsze autobusy elektryczne będące własnością krakowskiego MPK SA. Były to pierwsze autobusy skompletowane w tak zwanym standardzie krakowskim, czyli między innymi posiadające na dachu pantograf systemu Schunk, zapewniający wyższe bezpieczeństwo podczas szybkiego doładowywania autobusów, niż było to w „systemie wiedeńskim”. Wymagało to również przebudowy na nowy system stacji ładowania autobusów przy ulicy Pawiej. Nowe autobusy skierowano do obsługi linii 154, a posiadane wtedy pozostałe autobusy

testowo skierowano próbnie na inne linie, przewidziane w planach do obsługi taborem elektrycznym po zakupie kolejnych takich pojazdów.

W 2017 roku w ramach Zintegrowanych Inwestycji Terytorialnych zakupiono kolejnych 20 autobusów elektrycznych, w tym po raz pierwszy w Polsce 3 autobusy przegubowe o długości 18 metrów. Dzięki tym zakupom MPK SA w Krakowie dysponowało w 2017 roku najliczniejszą flotą autobusów elektrycznych w Polsce. Zakup taboru połączony był z zamówieniem 5 stacji szybkiego ładowania autobusów przez pantograf Schunka. Niezależnie od inwestycji w ramach ZIT konieczne było stworzenie odpowiedniej infrastruktury zaplecza do obsługi autobusów elektrycznych. Przy takiej liczbie pojazdów nie można było stosować doraźnych rozwiązań. Przede wszystkim konieczny był odpowiednio wyposażony plac postojowy, umożliwiający kilkugodzinne ładowanie każdego autobusu prądem małej mocy (tzw. balansowanie), co jest niezbędne do prawidłowej pracy baterii w dłuższym czasie oraz zapewnienie w zajezdni energii elektrycznej o mocy pozwalającej na równoczesną pracę 20–30 ładowarek. Miejsce na taki plac znaleziono na terenie Stacji Obsługi Autobusów Wola Duchacka. Był to teren wymagający kompleksowych prac budowlanych, począwszy od jego odwodnienia, ustabilizowania, aż po wykonanie instalacji elektrycznych wraz z ładowarkami i nowej nawierzchni. W ten sposób uzyskano miejsce na około 30 autobusów, w tym autobusy przegubowe, co obecnie zapewnia pewną rezerwę na kolejne autobusy elektryczne. Równocześnie MPK SA w Krakowie zakupiło 2 kolejne autobusy elektryczne oraz pozyskało 2 kolejne stacje ładowania autobusów przez pantograf.

Obecnie MPK SA w Krakowie eksploatuje 26 autobusów elektrycznych, które mogą korzystać z 8 stacji szybkiego ładowania zlokalizowanych w różnych punktach miasta, ponadto plac postojowy na Woli Duchackiej umożliwi wolne ładowanie (metodą plug-in) równocześnie ponad 30 autobusów. Stanowi to dobrą bazę dla rozwoju tego rodzaju transportu w najbliższych latach. W bezpośrednim sąsiedztwie funkcjonującego placu postojowego dla autobusów elektrycznych znajduje się obecnie nie wykorzystywany teren po byłej kotłowni i placach składowych, który



Fot. 8. Szybkie ładowanie autobusu Solaris U12 Electric metodą Schunka na pętli autobusowej Osiedle Podwawelskie

Źródło: Zasoby własne MPK SA w Krakowie

w przyszłości można zagospodarować na kolejne miejsca dla autobusów elektrycznych.

MPK SA w Krakowie jest zdecydowane rozwijać tego rodzaju transport. Jest aktywnym uczestnikiem rządowego programu E-Bus koordynowanego przez NCBR, w ramach którego będzie mogło pozyskać – w zależności od dostępnych środków – nawet do 150 nowych autobusów elektrycznych. Ponadto krakowski przewoźnik aplikuje też w innych programach pozwalających uzyskać dofinansowanie zakupu kolejnych autobusów elektrycznych. Wypracowany w Krakowie, a przyjęty także w wielu innych miastach, standard wyposażenia autobusów elektrycznych wymagać będzie także budowy kolejnych stacji szybkiego ładowania autobusów w rejonach miasta dotychczas pozbawionych tego rodzaju infrastruktury. Dlatego już teraz staraniem krakowskiego MPK SA oraz organizatora transportu publicznego w Krakowie wprowadzane są wymogi uwzględniające ładowarki autobusów na nowo powstających i projektowanych dworcach przesiadkowych i pętlach autobusowych.

### Wnioski i zamierzenia

Z perspektywy kilku lat doświadczeń można uznać, że napęd elektryczny w pojazdach komunikacji miejskiej został przyjęty jako kierunek zmian systemowych środków transportowych. Na taki wniosek wskazują doświadczenia pojazdów tramwajowych zasilane energią elektryczną, które od 119 lat przewożą mieszkańców Krakowa.

Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych zaczęła obowiązywać w momencie, gdy krakowska elektromobilność była już po pierwszym etapie wdrażania. Kolejne jej etapy będą musiały się wpisać do wymagań nowych aktów wykonawczych do ustawy.

Nowym wyzwaniem dla krakowskiej elektromobilności będą integracja i optymalizacja posiadanych rozwiązań w aspekcie kosztów jej prowadzenia. Będzie to zbieżne z obowiązkiem, jakim na jednostki samorządu terytorialnego, świadczące usługę lub zlecające świadczenie usług komunikacji miejskiej, nakłada ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych. Zgodnie z tą ustawą należy sporządzać co 36 miesięcy analizę kosztów i korzyści związanych z wykorzystaniem autobusów zeroemisyjnych, przy świadczeniu usług komunikacji miejskiej. Analiza ma obejmować analizę finansowo-ekonomiczną, oszacowanie efektów środowiskowych oraz analizę społeczno-ekonomiczną.

Być może napęd elektryczny w obecnym kształcie będzie rozwiązaniem przejściowym w kierunku wdrożenia wodoru jako nośnika energii w autobusach komunikacji zbiorowej, a w ten sposób unikniemy emisji spalin i wydłużymy przebiegi pojazdów. Paliwo wodorowe zostało uznane przez Parlament Europejski, który poprzez swą dyrektywę w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych zobowiązał on kraje członkowskie do przyspieszenia prac i stworzenia krajowej ogólnodostępnej sieci infrastruktury paliw alternatywnych. Użytkownicy paliw ropopochodnych narażeni będą na dodatkowe uciążliwości związane z tworzonymi na terenach o zwartej zabudowie śródmiejskiej strefami czystego transportu, do których będą mogły

wjeżdżać tylko pojazdy elektryczne, wodorowe lub zasilane gazem ziemnym.

Niewiadomych związanych z przyszłością rozwiązań w zakresie elektromobilności jest wiele. Każdy podmiot wprowadzający dziś do użytku autobusy elektryczne ponosi ryzyko zastosowania nietrafnych rozwiązań, które mogą w dłuższym okresie nie sprawdzić się w praktyce eksploatacyjnej. Należy oczekiwać, że po pewnym czasie, trudnym aktualnie do określenia, upowszechnią się pewne standardy w zakresie ładowania, magazynowania energii elektrycznej, umiejscowienia czy rodzaju silników trakcyjnych. Podobnie jak i ukształtują się pewne typowe, powszechnie stosowane rozwiązania, jak choćby ma to miejsce w przypadku tramwajów, gdyż będzie to jednym z warunków obniżenia kosztów produkcji autobusów elektrycznych. Ci, których rozwiązania okażą się niszowe, ryzykują koniecznością poniesienia w przyszłości kosztów dostosowania swoich rozwiązań do powszechnie ukształtowanych standardów, zwłaszcza w zakresie infrastruktury ładowania autobusów. Jest to ryzyko, którego na obecnym etapie rozwoju elektromobilności nie sposób całkowicie wyeliminować, stąd konieczna jest rozważa we wprowadzaniu autobusów elektrycznych na dużą skalę.

### Literatura

1. Zawadzki J., *Uzasadnienie zasady zmiany szybkości wozu tramwajowego na podstawie działania obwodu elektrycznego w tym wozie*, Opracowanie wewnętrzne MPK SA w Krakowie, Kraków 2007.
2. Luft S., Skrzek T., *Współczesny silnik autobusowy – cechy charakterystyczne. Eksploatacja i testy*, „Autobusy”, 2016, nr 12.
3. DYREKTYWA RADY 91/542/EWG z dnia 1 października 1991 r. zmieniająca dyrektywę 88/77/ EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw w państwach członkowskich dotyczące środków, jakie należy podjąć w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń gazowych z oleju napędowego silników zastosowanych w pojazdach.
4. Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają zostać podjęte przeciwko emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych przez silniki wysokoprężne stosowane w pojazdach oraz emisji zanieczyszczeń gazowych z silników z wymuszonym zapłonem napędzanych gazem ziemnym lub gazem płynnym stosowanych w pojazdach oraz zmieniająca dyrektywę Rady 88/77/EWG.
5. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady 595/2009 z dnia 18 czerwca 2009 r. dotyczące homologacji typu pojazdów silnikowych i silników w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z pojazdów ciężarowych o dużej ładowności (Euro VI) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i obsługi technicznej pojazdów, zmieniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 i dyrektywę 2007/46/WE oraz uchylające dyrektywy 80/1269/EWG, 2005/55/WE i 2005/78/WE.
6. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22.10.2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych.
7. Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych z dnia 11.01.2018 r.
8. Krajowy Program Ochrony Powietrza do roku 2020 (z perspektywą do 2030).