

Sandra KUŚNIERZ
Izabela ZIENTEK*

PROGNOZA KONKURENCYJNOŚCI ZASTOSOWANIA PALIW ALTERNATYWNYCH W TRANSPORCIE MIEJSKIM WZGLĘDEM POJAZDÓW ELEKTROMOBILNYCH

Słowa kluczowe: *elektromobilność, paliwa alternatywne, pojazdy hybrydowe, pojazdy wodorowe*

Tematem artykułu jest zastosowanie alternatywnych paliw w transporcie miejskim oraz wprowadzanie rozwiązań zeroemisyjnych w logistyce miejskiej transportu miejskiego. Zostaną przedstawione uwarunkowania techniczne wykorzystywania konkretnych rozwiązań technologicznych. Wyszczególniono prognozowane kierunki progresji transportu publicznego oraz działania mające na celu osiągnięcie zrównoważonego rozwoju terenów miejskich. Celem artykułu jest zbadanie mocnych i słabych stron poszczególnych środków komunikacji oraz przeanalizowanie szans na ich ekspansję w transporcie miejskim.

1. WSTĘP

Suburbanizacja miast jest zjawiskiem nasilającym się. Wysokie ceny nieruchomości, ograniczona przestrzeń życiowa, pogarszająca się jakość powietrza oraz warunków środowiskowych przy wzrastającej kongestii skutecznie motywują mieszkańców miast do migracji na tereny podmiejskie.

Nie dotyczy to jednak miast, które cechuje innowacyjność i ukierunkowanie na potrzeby mieszkańców. Aglomeracje kierujące się filozofią inteligentnych miast (ang. *smart city*) są w stanie powstrzymać proces dezurbanizacji, zapewniając swoim mieszkańcom najlepsze technologiczne oraz systemowe rozwiązania. Władze samorządowe skupiają swoje starania wokół budowy przyjaznego otoczenia, opartego na ideologii *design thinking*, czyli empatyzację z potrzebami użytkownika, przenikliwym określaniu problemów oraz tworzeniu innowacyjnych rozwiązań, które będą odpowiedzią na rosnące wymagania mieszkańców miast [1].

Jednym z najczęściej analizowanych obszarów jest transport publiczny, który łączy ekonomiczne uzasadnienia zachodzących zmian z badaniami na temat wpływu na środowisko naturalne oraz ergonomii ich użytkowania. Wśród najczęstszych implikacji prym wiedziony jest przez wszelakie proekologiczne inicjatywy. Rosnąca świadomość zagrożeń wynikających z postępujących zmian klimatycznych

* SKNL „LogistiCAD”, Politechnika Śląska

zmusza do kładzenia większego nacisku na zapobieganie dalszych negatywnych zmian środowiskowych. Samorządy stają w obliczu wielkiej szansy rozbudowy taboru niskoemisyjnego bądź zeroemisyjnego oraz niezbędnej infrastruktury, która może zostać zrealizowana z licznych funduszy wspierających.

2. POJAZDY ZEROEMISYJNE A NISKOEMISYJNE

Wprowadzaniu pojazdów zasilanych paliwami alternatywnymi do taboru komunikacji miejskiej towarzyszy wiele nieścisłości oraz niejasna, niespójna nomenklatura. Wielokrotnie miało miejsce stosowanie słowa zeroemisyjny zamiennie z niskoemisyjny, co jest znacznym uchybieniem, szczególnie podczas korzystania z licznych unijnych funduszy, które priorytetowo wspierają wszelkie inicjatywy obejmujące tabor zeroemisyjny.

Opierając się na *Ustawie o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych* do taboru zeroemisyjnego zalicza się pojazdy napędzane energią elektryczną wytworzoną z wodoru w ogniwach paliwowych, bądź zasilane przez silnik, którego praca nie powoduje lokalnej emisji gazów cieplarnianych.

Pojazdy niskoemisyjne charakteryzują się niższą emisją szkodliwych związków oraz zanieczyszczeń akustycznych. Wśród rozwiązań niskoemisyjnych wyszczególnia się między innymi LPG, CNG oraz LNG [2].

2.1. POJAZDY HYBRYDOWE

Szczególne kontrowersje wzbudzają pojazdy hybrydowe, które uważane były jako wydajne oraz ekologiczne pojazdy, jednak w świetle nasilających się zastrzeżeń przepisów o zrównoważonym rozwoju transportu pasażerskiego ich rola została nieznacznie zdegradowana. Autobusy hybrydowe to pojazdy, w których stosuje się połączenie napędu zasilanego konwencjonalnym paliwem oraz napędu elektrycznego, jednak jest również możliwe wykorzystanie tylko jednego z nich. Tego rodzaju alternatywę stosuje się głównie w transporcie miejskim, a liderem w tej dziedzinie jest firma Solaris z siedzibą w Bolechowie. Wzrastająca liczba mieszkańców w aglomeracjach przekłada się na większe wykorzystanie transportu miejskiego. Najistotniejszymi czynnikami wpływającymi na decyzję o wyborze pojazdów hybrydowych jest redukcja spalin oraz obniżenie poziomu hałasu. Energia, która jest wykorzystywana w środkach transportu z napędem hybrydowym pochodzi ze spalania oleju napędowego. Warto jednak zwrócić uwagę, iż ich emisyjność jest nieco większa w porównaniu do innych paliw alternatywnych, ponieważ jednostki hybrydowe posiadają również silnik spalinowy, który jak wiadomo emituje znaczną ilość spalin. Konstrukcja środków transportu miejskiego umożliwia wbudowanie systemów koniecznych do rozpoczęcia pracy układu hybrydowego. Nie powoduje to zmniejszenia powierzchni przeznaczonej na przewóz osób, gdyż istnieje rozwiązanie, które polega na umiejscowieniu kompletnego układu na

dachu pojazdu. Istotną rolę odgrywa liczba zatrzymań oraz rozruchów, iż od tego głównie zależy opłacalność korzystania z napędu hybrydowego. Podczas hamowania istnieje możliwość odzysku energii, co niesie za sobą mniejsze straty energetyczne. Cykl jazdy ma znaczący wpływ na efektywność wykorzystania energii, gdyż zapewnia to sprzyjające warunki do jej akumulacji. Ma to swoje źródło w nadwyżkach energii oraz w hamowaniu odzyskującym. W transporcie możemy wyróżnić trzy rodzaje napędów hybrydowych: szeregowy, równoległy oraz mieszany. Napędy różnią się od siebie sposobem połączenia silnika spalinowego i elektrycznego. W napędzie szeregowym funkcję generatora pełni silnik spalinowy, pod wpływem którego zostaje napędzany silnik elektryczny. Sprawia to, iż silnik spalinowy ma zapewniony odpowiedni zakres parametrów, które pozwalają na płynną oraz optymalną jazdę. Silnik spalinowy przestaje pracować w momencie, gdy akumulator, z którego silnik elektryczny pobiera prąd jest naładowany. Sytuacja zmienia się w chwili wyczerpania zasobów prądu. Następuje wtedy uruchomienie jednostki spalinowej, która napędza generator i pozwala na jazdę bez ładowania akumulatora. Inną formą napędu jest odmiana równoległa, korzystająca głównie z silnika spalinowego. Jednostka elektryczna wspomaga jedynie w sytuacjach wymagających znacznego momentu obrotowego. Koncepcja ma na celu uzyskanie korzystnej dynamiki, przy mniejszym zużyciu paliwa. Najczęściej stosowany jest jednak napęd szeregowo-równoległy, inaczej mieszany bądź pełny. Następuje w nim praca obu silników zależna od stylu jazdy. Podczas hamowania silnik elektryczny pełni rolę generatora, a ten zostaje przeznaczony do funkcji rozrusznika podczas uruchamiania silnika spalinowego. Stosunkowo niewielkie odległości mogą być pokonywane wyłącznie przy użyciu silnika elektrycznego, co eliminuje zużycie paliwa. Napędy hybrydowe nie mają konieczności ładowania, gdyż wykorzystują energię odzyskiwaną z hamowania [3].

Stosowanie napędów hybrydowych niesie ze sobą korzyści takie jak niski koszt użytkowania, spowodowany odpowiednim wykorzystaniem energii. Tego rodzaju środki transportu idealnie sprawdzają się w transporcie publicznym, ponieważ odzyskiwanie energii odbywa się na przykład podczas postoju w korkach. Istnieje możliwość jazdy wyłącznie na silniku elektrycznym na niewielkich odległościach oraz z małą prędkością, podczas której nie występuje żadne zużycie paliwa. Opłacalność pojazdów hybrydowych jest ściśle związana z zasadami ich użytkowania. Zwiększenie ekonomiki jazdy polega na kontrolowaniu mocy pojazdu oraz doprowadzaniu do jak najczęstszych wyłączeń silnika spalinowego. Wpływa to również znacząco na jakość powietrza, gdyż używanie silnika elektrycznego nie powoduje emisji spalin. Spalanie oleju napędowego jest mniejsze w porównaniu do silników diesla, jednak wciąż wywołuje to częściowe zanieczyszczenie powietrza. Ograniczenie hałasu wywołanego pracą silnika to zdecydowana poprawa komfortu jazdy oraz koncentracji kierowcy. Pojazdy hybrydowe charakteryzują się wyższą ceną zakupu niż pojazdy zasilane tradycyjnym paliwem. Ma to jednak wpływ na dłuższą

trwałość, gdyż podczas odzyskiwania energii z hamowania następuje mniejsze zużycie hamulców.

Pojazdy hybrydowe cieszą się sporym zainteresowaniem, jednak większą szansę na rozwój mają elektryczne hybrydy. W tego typu środkach transportu istnieje możliwość decyzji, w których momentach zostanie wykorzystany silnik elektryczny, a w których silnik spalinowy [4]. Tradycyjne hybrydy automatycznie zmieniają pracę silnika podczas przekroczenia danej prędkości, natomiast hybrydy elektryczne zostają odpowiednio zaprogramowane w celu pełnego wykorzystania energii. Automatyczna zmiana następuje po odczytaniu danych z GPS, a silnik spalinowy pełni jedynie funkcję pomocniczą. Na stacjach końcowych dozwolone jest korzystanie z szybkiego ładowania, które stanowi idealne rozwiązanie dla autobusów poruszających się w strefach niskoemisyjnych. W takich miejscach pojazdy mogą poruszać się używając wyłącznie silnika elektrycznego, na którym można przejechać około 70% całej trasy. Zmniejsza to zdecydowanie emisję szkodliwych dla środowiska spalin emitowanych podczas używania silnika spalinowego. Poziom hałasu, który jest emitowany przez elektryczną hybrydę wynosi 65 dB, co jest wartością porównywalną do hałasu wywołanego zwykłą rozmową. Są to główne przyczyny większego zainteresowania elektrycznymi hybrydami, gdyż pozwalają one na transport pasażerski w strefach wolnych od spalin [5]. POJAZDY ZASILANE CNG

CNG (*ang. Compressed Natural Gas*) to jedna z najczęstszych alternatyw stosowanych do zasilania pojazdów silnikowych. Paliwo alternatywne wykorzystujące gaz ziemny w postaci sprężonej to korzystne rozwiązanie mające na celu zmniejszenie emisji zanieczyszczeń. Silniki napędzane CNG w porównaniu do tradycyjnych paliw takich jak benzyna, pozytywnie wpływają na jakość powietrza, podnosząc jednocześnie komfort życia mieszkańców miast [6].

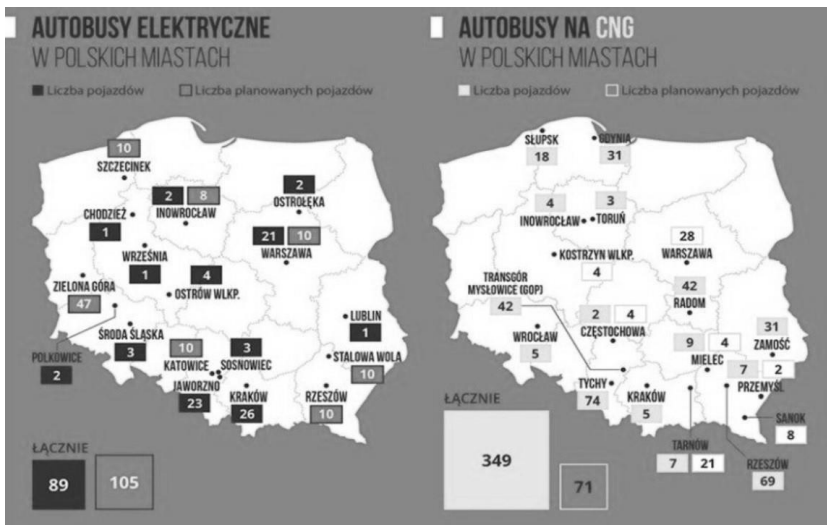
CNG to mieszanina węglowodorów lekkich, której głównym składnikiem jest metan. W przypadku nieszczelności instalacji, utleniający się gaz rozprasza się w powietrzu nie powodując jakiegokolwiek zagrożenia. W obecnej chwili niewielka liczba środków transportu jest zasilana gazem ziemnym, głównie są to autobusy oraz większe pojazdy, które emitują znaczną ilość spalin oraz pokonują spore przebiegi na terenach miast. W naszym kraju jest eksploatowanych lub w najbliższym czasie zostanie włączonych do eksploatacji około 420 autobusów napędzanych sprężonym gazem ziemnym, co stanowi w przybliżeniu 3,5% wszystkich autobusów zarejestrowanych na terenie Polski. Zasięg takich autobusów jest większy w porównaniu do elektrycznych i zawiera się w przedziale od 350 do 400 kilometrów. Stosunkowo niewielka ilość środków transportu zasilanych CNG jest głównie spowodowana niedostatecznie rozwiniętą infrastrukturą, która ma znaczący wpływ na poruszanie się pojazdów w miastach. W Polsce stacje tankowania CNG są dostępne jedynie w 15 miastach, gdyż wprowadzenie tego typu miejsc jest skomplikowanym przedsięwzięciem [7]. Budowę stacji poprzedza szereg złożonych czynności, takich jak doprowadzenie paliwa, które odbywa się podziemnymi

rurociągami gazowymi. W Polsce sieć gazociągów jest stosunkowo dobrze rozwinięta, co znacznie przyspiesza proces budowy niezbędnej infrastruktury towarzyszącej. Sprężony gaz ziemny, którego ciśnienie wynosi 20 MPa wymaga odpowiedniego zbiornika będącego w stanie wytrzymać tak wysokie ciśnienie [8]. Butla gromadząca CNG jest stosunkowo duża, więc wybór takiego rozwiązania obciąża pojazd dodatkowymi kilogramami. Wiąże się to z koniecznością wygospodarowania znacznej ilości miejsca oraz ze zmniejszeniem ładowności pojazdu. Pozytywnym aspektem jest dłuższa żywotność silnika oraz zużywanie mniejszej ilości oleju napędowego. Koszt zakupu pojazdów zasilanych CNG jest wysoki, dlatego władze samorządowe podchodzą sceptycznie do tego rozwiązania, jednak inwestycja w zakup pojazdów zasilanych CNG wiąże się ze stosunkowo szybkim zwrotem zainwestowanych środków oraz z niskimi kosztami użytkowania.

Korzyścią wynikającą z zastosowania CNG jest jego cena, która z roku na rok ma tendencję spadkową. W przeciągu ostatnich miesięcy średnia cen we wszystkich województwach wahała się w granicach 3,70- 3,90 zł za m³ gazu. Zastosowanie gazu ziemnego jako paliwa alternatywnego jest ściśle związane ze zmniejszeniem kosztów ochrony zdrowia, gdyż maleje liczba chorób spowodowanych emisją szkodliwych spalin. Czynniki wpływającymi na podjęcie decyzji o zastosowaniu autobusów wykorzystujących sprężony gaz ziemny są często względy ekologiczne oraz ekonomiczne. Redukcja spalin znacząco wpływa na środowisko, co wiąże się ze zmniejszeniem emisji tlenu azotu o 50%, dwutlenku węgla o 20%, natomiast pyłów PM10 o 99% . Ponadto silniki pracują stosunkowo cicho, a ich hałas nie przekracza 72 dB, dzięki temu mogą być użytkowane również w godzinach nocnych. Niedostatecznie rozwinięta infrastruktura powoduje obawy o rentowność inwestycji w tabor zasilany gazem ziemny, co dodatkowo jest potęgowane przez wyższe koszty zakupu autobusów CNG [9].

Niezbędnym działaniem jest rozwój infrastruktury, która umożliwi ekspansję zasięgu sieci pojazdów napędzanych CNG. Planowana jest budowa 104 nowych stacji CNG do 2020 roku. Powodem powstania kolejnych punktów jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego, która zakłada, iż odległość między stacjami na terenie Unii Europejskiej nie może przekraczać 150 kilometrów [10]. Mniejsze odległości sprawiają, iż korzystanie z gazu ziemnego stanie się wygodniejsze w użytkowaniu oraz bardziej uzasadnione ekonomicznie. Prognozy gospodarcze przewidują kolejne inwestycje w środki transportu miejskiego na paliwa alternatywne, co jest spowodowane uprzywilejowaniem ekologicznych pojazdów. Uchwalenie zerowej akcyzy na paliwa CNG miało na celu zachęcenie władze miast do wprowadzania komunikacji miejskiej korzystającej z paliw alternatywnych [11]. Dzięki środkom z Funduszu Niskoemisyjnego Transportu zaistnieje możliwość dofinansowania rozwoju infrastruktury, która wymaga największego nakładu finansowego. Z początkiem 2019 roku spółka PGNiG Obrót Detaliczny podpisała listy intencyjne z dwoma miastami w Polsce, którymi są Łomża i Suwałki [12]. Inwestycja polega na zaopatrzeniu Łomży w 10 autobusów zasilanych gazem ziemnym, natomiast

w Suwałkach planowany jest zakup 15 takich pojazdów. Władze miast są zdania, że zdecydowanie obniży to koszt eksploatacji i pozwoli na wprowadzenie darmowej komunikacji. Oszacowano, iż popyt od 2018 do 2023 roku będzie wynosił około 800-1000 autobusów zasilanych CNG. Rosnącą tendencją zakupu pojazdów na paliwa alternatywne widać na rys. 1, gdzie zestawiono ilość obecnego taboru najbardziej popularnych pojazdów na paliwa alternatywne wraz z przewidywaną ilością zakupu nowych pojazdów w 2019 roku.



Rys. 1. Ilość pojazdów i liczba planowanych pojazdów dla najpopularniejszych pojazdów zeroemisyjnych [13]

Fig. 1. Vehicle's amount and quantity of planned vehicle for the most popular zero-emission vehicles [13]

Skupiając się na paliwie alternatywnym, którym jest gaz ziemny należy również wspomnieć o mniej popularnej i rzadziej stosowanej metodzie zasilania płynnym gazem ziemnym. Jest to również rozwiązanie niskoemisyjne, które jednocześnie ogranicza poziom hałasu. LNG (*ang. Liquefied Natural Gas*) ma zastosowanie w postaci płynnej w celu ułatwienia transportu do stacji, w której możliwe jest zaopatrzenie w gaz ziemny. Skraplanie odbywa się w temperaturze -162 stopnie Celsjusza, tym samym wymaga to zastosowania specjalnych zbiorników kriogenicznych, które są przystosowane do tak niskiej temperatury. Pod wpływem temperatury objętość płynnego gazu ziemnego zostaje obniżona około 600 razy, jednocześnie wzrasta jego gęstość, co wpływa jednocześnie na zwiększenie zasięgu pojazdu. Wspólną cechą obu paliw jest poprawa warunków środowiskowych poprzez zmniejszenie ilości spalin, które niekorzystnie wpływają na otoczenie. Stosowanie LNG jest zalecane w pojazdach, które pokonują duże dystanse. Innowacyjnym rozwiązaniem jest powstanie stacji LCNG, które jest połączeniem dwóch odmian gazu ziemnego. Doprowadzony poprzez gazociągi LNG zostaje ogrzany

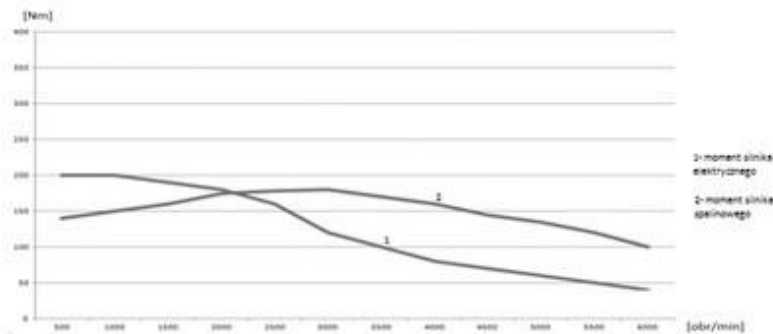
i zamieniony w gaz, który następnie przechodzi przez układ priorytetu napełniania zbiorników paliw. Koszt zaistnienia takiej stacji nie jest zbyt wysoki, gdyż istnieje możliwość przebudowania wcześniej istniejącej stacji LNG.

Wykorzystywanie gazu ziemnego w stanie ciekłym oraz gazowym wiąże się z poprawą warunków środowiska zaburzonych poprzez emisję szkodliwych spalin. Rozwój infrastruktury ma na celu zachęcenie władze miast do zaopatrywania się w środki transportu miejskiego na paliwa alternatywne, gdyż niewątpliwie spowoduje to poprawienie sytuacji ekonomicznej w aglomeracjach.

2.3. POJAZDY ELEKTRYCZNE

Elektrobusy z każdym rokiem umacniają swoją pozycję na rynku pojazdów napędzanych paliwami alternatywnymi. Tendencję wzrostową można zaobserwować również w Polsce, gdzie znaczny udział pojazdów napędzanych elektrycznie jest zawdzięczany przedsiębiorstwu Solaris Bus&Coach S.A., które jest liderem na skalę europejską w produkcji autobusów z napędem elektrycznym. Jednak rosnąca popularność elektrobusów jest uwarunkowana szeregiem zalet, które wynoszą je ponad pozostałe środki komunikacji. Pojazdy elektryczne cechuje zerowa emisja zanieczyszczeń powietrza, co sprawia, że są szczególnie pożądane w centrach miast, gdzie przyczyniają się do obniżenia stężenia pyłów zawieszonych, będących głównym składnikiem smogu. Zeroemisyjność E-busów zyskuje priorytetowe znaczenie podczas porównania ze średnią emisją tlenków azotu NO_x plasującej się na poziomie 1,1 g/km, cząsteczek stałych PM_{10} wynoszącej 0,03 g/km dla autobusów w standardzie Diesel Euro 6 oraz innych szkodliwych związków, które były przyczyną zakwalifikowania spalin Diesla jako czynnik kancerogeny przez Światową Organizację Zdrowia [13].

Elektrobusy nie tylko ograniczają wytwarzanie zanieczyszczeń powietrza, ale również akustycznych, przez co są doskonałym środkiem komunikacji w centrach miast oraz na obszarach mieszkalnych, gdzie korzystnie wpływa na obniżenie hałasu komunikacyjnego. Z ergonomicznego punktu widzenia bardzo istotna jest również redukcja drgań w pojazdach elektrycznych, która wynosi około 70% na siedzisku kierowcy, w porównaniu do autobusu spalinowego, co zmniejsza ryzyko wystąpienia zespołu wibracyjnego, którego skutkiem są niekorzystne zmiany w narządach wewnętrznych oraz układzie kostnym, a także pozytywnie wpływa na komfort jazdy reszty pasażerów. Z technicznego punktu widzenia warto wspomnieć również o wysokiej sprawności silników elektrycznych, które są w stanie średnio wykorzystać 85-95% wytworzonej energii, podczas gdy silnik spalinowy jest w stanie wykorzystać 38-40% wytworzonej energii, reszta wydatkowana jest na chłodzenie, opory ruchu oraz straty wylotu [14].



Rys. 2. Porównanie charakterystyk momentów silnika elektrycznego oraz spalinowego [15]

Fig.2. Comparison of torque's characteristics electric and combustion engines [15]

Elektrobusy doskonale sprawdzają się podczas trudnych warunków drogowych występujących w godzinach szczytów, ponieważ najwydajniej pracują podczas startu, ze spadającą efektywnością wraz z wzrastającym obciążeniem, czyli ze zwiększeniem obrotów silnika. Na rys 2. zestawiono charakterystyki silnika spalinowego oraz elektrycznego, które potwierdzają efektywniejszą pracę silników elektrycznych, gdy wymagana jest szybka reakcja na sytuację zaistniałą w ruchu drogowym.

Użytkowanie E-busów jest również uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia, co wynika z niższych kosztów operacyjnych niż w autobusach diesla, ponieważ energia elektryczna jest tańsza niż energia wytwarzana podczas spalania paliw konwencjonalnych, a jej cena nie jest uzależniona od wahań cen ropy. Osiągnięcie wysokiej mocy od momentu ruszenia umożliwia elastyczne dostosowanie do zmieniających się warunków na drodze, a przez to elektrobusy idealnie wpisują się w charakterystykę ruchu miejskiego, pełnego zmian sygnalizacji świetlnej, respektowania znaków drogowych oraz dostosowywania się do innych uczestników ruchu. Co więcej elektrobusy korzystają z zjawiska odzyskiwania energii podczas hamowania. Proces ten nazywany również rekuperacją energii, który polega na wykorzystaniu silnika elektrycznego jako prądnicy, która podczas hamowania zamienia energię kinetyczną na energię elektryczną, która zostaje zmagazynowana w akumulatorze. Silniki elektryczne zapewniają wysoką sprawność, małą awaryjność oraz znaczną moc, jednak ich słabym punktem są akumulatory, które cechuje niska gęstość magazynowania energii w stosunku do ich masy i objętości. Przeciętny autobus elektryczny cechuje się zasięgiem w granicach 120-250 km na jednym pełnym ładowaniu. Wielkość zasięgu jest mocno skorelowana ze stopniem wypełnienia pojazdu, warunków drogowych oraz atmosferycznych. Pojemność obecnych akumulatorów nie spełnia wymogów całodziennej pracy pojazdu komunikacji miejskiej, mimo korzystania z akumulatorów o znacznych gabarytach, które zwiększają masę pojazdu oraz zmniejszają przestrzeń użytkową

pasażerów. Wymusza to konieczność ładowania pojazdów podczas całonocnego cyklu pracy. W tym celu muszą zostać zapewnione stacje ładujące, wśród których wyróżnia się następujące metody ładowania: plug-in, pantografową oraz indukcyjną. Jedną z najłatwiej dostępnych metod jest plug-in, co wynika ze stosunkowo dużej dostępności oraz najmniejszego nakładu kosztów. Rys. 3 przedstawia ładowanie odbywające się poprzez podpięcie ustandaryzowanej wtyczki do sieci elektrycznej, której napięcie i natężenie prądu definiuje długość ładowania [16].



Rys. 3. Ładowanie elektrobusem metodą plug-in [17]
Fig. 3. Charging of an electric bus by plug-in method [17]

Rozwiązaniem o większej mocy jest ładowanie pantografowe, przedstawione na rys. 4, które klasyfikuje się ze względu na miejsce umieszczenia pantografu. Bardziej uzasadnionym ekonomicznie rozwiązaniem jest pantograf zainstalowany po stronie infrastruktury ładującej tzw. pantograf odwrócony, wynika to z prostej korelacji, iż liczba pojazdów zawsze będzie większa od ilości stacji ładujących, w związku z tym standardowy pantograf montowany na dachu autobusu jest rozwiązaniem coraz rzadziej używanym. Obecnie na rynku dostępne są pantografy o mocy nawet 750 kW, co znacznie zmniejsza czas ładowania w stosunku do ładowarek typu plug-in, które w przeciwieństwie do ładowania pantografowego wymagają obsługi przez kierowcę, co wiąże się z ryzykiem błędu człowieka.

Elektrobusy ładowane pantografowo są wyposażone w system lokalizacji pojazdu względem ładowarki, co umożliwia automatyzację procesu podłączania pojazdu do sieci elektrycznej. Przez wzgląd na specjalistyczne wymagania eksploatacyjne oraz znaczne koszty budowy infrastruktury, ładowarki pantografowe zazwyczaj lokalizowane są w zajezdniach, bądź na końcowych przystankach pętli. Często stosuje się zabezpieczenie szlabanem z czujnikiem RFID (ang. Radio-frequency identification), który na podstawie fal radiowych rozpoznaje autobusy elektryczne i wyłączy im przejazd.



Rys. 4. Ładowanie pantografowe [18]

Fig. 4. Charging by pantograph [18]

Najbardziej kosztownym, a przez co najrzadziej używanym rozwiązaniem jest ładowanie indukcyjne, które wymaga modernizacji zarówno pojazdu jak i fragmentu jezdni, w którą wbudowywana jest płyta indukcyjna o długości ok 1,5 metra, którą można zauważyć na rys. 5. Przedstawia on przystanek autobusowy wraz z wbudowaną infrastrukturą. Elektrobus zostaje natomiast wyposażony w izolowaną płytę ładującą, która zbliża się na odległość 10 cm do płyty indukcyjnej wytwarzając w ten sposób fale elektromagnetyczne, które ładują akumulator w elektrobusie. Podczas indukcyjnego ładowania możliwe jest maksymalne osiągnięcie mocy 200 kWh, co jest wartością wystarczającą do efektywnego ładowania pojazdów komunikacji miejskiej [19].



Rys 5. Płyta do ładowania indukcyjnego [19]

Fig. 5.: Plate for inductive charging [19]

2.4. POJAZDY WODOROWE

Pojazdy napędzane wodorem to rozwiązanie zeroemisyjne mające w najbliższym czasie szansę na rozwój. Podczas procesu otrzymywania wodoru ma miejsce niewielka emisja spalin, jednak same wykorzystanie wodoru jako paliwa nie powoduje wytwarzania szkodliwych związków chemicznych. Wodór jest stosowany jako alternatywne źródło energii w pojazdach elektrycznych, które nie wymagają specjalnie rozbudowanej infrastruktury. Wodór w reakcji z tlenem przeobraża się w wodę oraz energię elektryczną niezbędną do zasilania środków transportu. [20]

Wodór + tlen = prąd + woda

Wodór ma swoje zastosowanie jako paliwo w tradycyjnym silniku spalinowym lub jako ogniwo paliwowe w przypadku silnika elektrycznego. W drugim rodzaju silnika zostaje wytworzona energia do jego napędzania. Elastyczność pojazdów wykorzystujących wodór polega na możliwości ich tankowania w sposób identyczny jak pojazdów z silnikiem spalinowym. Czynność ta trwa średnio od 5 do 10 minut, co nie stanowi większych utrudnień w codziennym użytkowaniu. W Polsce jednak nie ma dostępnej żadnej stacji pozwalającej na tankowanie wodorem, dlatego możliwości wprowadzenia takich pojazdów są ograniczone. Zbiornik zawierający 38,2 kg paliwa pozwala na przejechanie całodziennego rozkładu jazdy, co umożliwi pokonanie nawet 400 kilometrów w czasie 20 godzin. Wykorzystując 8 kilogramów wodoru możliwe jest przejechanie 100 kilometrów na obszarach aglomeracyjnych. W trakcie obsługi pasażerów z rur wydechowych wydobywa się wyłącznie para wodna, co nie stanowi żadnego zagrożenia dla otaczającego środowiska. Stosowanie ogniw paliwowych zwiększa wydajność autobusów o 50%. Pracę nad produkcją autobusów zasilanych wodorem prowadzi między innymi firma Solaris, która w 2019 roku planuje wprowadzenie autobusu wodorowego nowej generacji. Innymi przedsięwzięciami zajmującymi się wprowadzeniem pojazdów wodorowych jest Ursus Bus oraz Solbus. Zakup takiego autobusu w wersji podstawowej to koszt przekraczający 3 milionów złotych, jest to zdecydowanie wysoka cena w porównaniu do silników diesla, jednak ich koszty użytkowania są zbliżone. Z czasem jednak cena ulegnie zmniejszeniu, gdyż zazwyczaj wdrażanie nowych rozwiązań cechuje się wyższymi cenami zakupu. Koszty eksploatacji nie zostały dokładnie przewidziane, natomiast Polska ma szansę na niewygórowane koszty ze względu na powstawanie wodoru jako produkt uboczny w wielu procesach chemicznych. Aby wodór mógł zostać wykorzystany do zasilania pojazdów konieczne jest usunięcie z niego wszelkiej ilości tlenu węgla [21].

Prognozy na kolejne lata przewidują powstanie dwóch stacji tankowania wodoru w Warszawie oraz w Gdańsku. Firma Lotos w 2021 roku planuje przeprowadzenie inwestycji, której celem będzie rozwinięcie infrastruktury niezbędnej do poruszania się w miastach pojazdów wodorowych. W ciągu godziny firma Lotos jest w stanie wyprodukować taką ilość wodoru, która wystarczy do zasilania auto-

busu przez rok [22]. Otrzymując dotację, spółka będzie w stanie wybudować instalację, służącą do oczyszczania wodoru oraz jego dystrybucji. Aby przekonać władze miast do wprowadzania pojazdów wodorowych konieczne jest przyznawanie wsparcia w formie dofinansowania lub programów wspomagających dla nowoczesnych rozwiązań. W obecnej sytuacji żadne miasto nie decyduje się na zakup tego typu pojazdów bez jakiegokolwiek dofinansowania. Główną przeszkodą uniemożliwiającą wprowadzenie autobusów zasilanych wodorem jest brak jego dostępności oraz wymóg odpowiedniego magazynowania.

Perspektywa średnioterminowa zakłada pojawienie się średnio od 20 do 30 autobusów rocznie do roku 2025. Inicjatywę w tym kierunku prowadzi program Unii Europejskiej o nazwie NewBusFuel. Jego głównym zadaniem jest podjęcie współpracy między producentami ogniwi paliwowych, przewoźnikami oraz dostawcami stacji zaopatrujących się w wodór. Do tej pory miasta, które wyrażały chęć wypróbowania autobusów wodorowych wprowadzały je w niewielkich ilościach. Z tej przyczyny nie było możliwości zauważenia widocznych zmian w redukcji emisji spalin, czy w ich rentowności. W 2021 roku pojazdy wodorowe mają szansę trafić do Gdańska w celu sprawdzenia, czy inwestycja jest uzasadniona ekonomicznie, co stanowi element programu „Bezemisyjny transport publiczny”. Istnieją dotacje z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, których fundusze mogą zostać przeznaczone na zakup pojazdów komunikacji miejskiej zasilanych wodorem, hybrydowych, bądź też elektrycznych. Szansa na rozwój jest możliwa dzięki Jastrzębskiej Spółce Węglowej, zajmującej się w produkcją gazu koksowniczego, której współpraca z Chinami oraz Japonią ma na celu oczyszczenie gazu tak, aby mógł stanowić użytek w ogniwach wodorowych. Oszacowano, iż stosując takie rozwiązanie będziemy w stanie zasilić nawet do 900 autobusów. W październiku 2018 roku zostało zawarte porozumienie dotyczące technologii wodorowych, które obejmuje współpracę ponad 30 państw, w tym również przez Polskę. Pozytywnym tego aspektem powinno być coraz częstsze wprowadzanie napędów wodorowych w komunikacji publicznej [23].

3. PODSUMOWANIE

Wybór najbardziej konkurencyjnego środka transportu jest funkcją wielu determinant, wśród których prym wiodą kwestie ekonomiczne. W zależności od wielkości aglomeracji rozważane są różne typy pojazdów, które pozwalają dostosować wielkość i specyfikację taboru do wymagań pasażerów. Z analizy kosztów dokonanej w tab. 1, z której wynika, iż najbardziej kosztowną inwestycją jest zakup oraz eksploatacja pojazdu zasilanego wodorem. Szczególnie trudne do oszacowania są oszczędności wynikające z obniżenia zachorowalności na dolegliwości powiązane z stanem środowiska naturalnego. Wraz z upływem czasu nastąpi spadek jednostkowych kosztów wytwarzania pojazdów, spowodowany rozwojem i upowszechnieniem technologii produkcyjnych. Jednak najczęstszą przyczyną,

która wpływa na rezygnację z zakupu niskoemisyjnego jest koszt infrastruktury towarzyszącej, która wymaga dużej, jednorazowej inwestycji w elementy ładujące oraz modernizację zajezdni, w celu przystosowania do wymagań eksploatacyjnych nowego taboru.

Tabela 1 Porównanie wybranych aspektów ekonomicznych pojazdów zasilanych paliwami alternatywnymi [24] (Założenia do tworzenia tabeli: cena 1 kg wodoru to 5 euro przy kursie 5,29, cena 1 kWh to 0,5 zł, cena 1 litra ON to 4,5 zł)

Table 1 Chosen economical factors comparison of vehicles powered by alternative fuels [24] (Assuming: 1 kg of hydrogen costs 5 euro at the exchange rate 5,29, 1 kWh of electric energy costs 0,5 zł, 1 litre of diesel fuel costs 4,5 zł)

	RODZAJ NAPIĘDU			
	elektryczny	CNG	hybrydowy	wodorowy
niskoemisyjność	TAK	TAK	NIE	TAK
koszt zakupu (netto) [zł]	1,669 mln	0,998 mln	1,439 mln	3,217 mln
koszty eksploatacyjne na 100 km [zł]	67	168	135	171
Wymaga budowy dodatkowej infrastruktury	TAK	TAK	NIE	TAK

Przedstawienie poszczególnych paliw alternatywnych na podstawie analizy SWOT pozwala na przejrzyste zobrazowanie mocnych stron (Strengths), słabych stron (Weaknesses), szans (Opportunities) oraz zagrożeń (Threats) związanych z wprowadzeniem środków transportu miejskiego na paliwa alternatywne. Każde z opisanych rozwiązań jest uzależnione od wielu czynników, które mają wpływ na rozbudowę danego taboru [25].

Tabela 2 Analiza SWOT pojazdów elektrycznych
Table 2 SWOT analysis of electric vehicles

<p>MOCNE STRONY (S)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brak emisji spalin • Niskie koszty eksploatacyjne • Niski poziom hałasu 	<p>SŁABE STRONY (W)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wysoki koszt zakupu • Budowa dodatkowej infrastruktury • Ograniczony zasięg
<p>SZANSE (O)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wysoka szansa na rozwój podczas wykorzystania alternatywnych źródeł energii 	<p>ZAGROŻENIA (T)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Powstanie kolejnych elektrowni ciepłych

Tabela 3 Analiza SWOT pojazdów zasilanych CNG
Table 3 SWOT analysis of vehicles powered by CNG

<p>MOCNE STRONY (S)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Niskoemisyjność •Niskie koszty zakupu 	<p>SŁABE STRONY (W)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Wysokie koszty eksploatacyjne •Budowa dodatkowej infrastruktury
<p>SZANSE (O)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Dyrektywa Parlamentu Europejskiego o zmniejszeniu odległości pomiędzy stacjami tankowania w krajach Unii Europejskiej 	<p>ZAGROŻENIA (T)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Skomplikowany proces budowy stacji tankowania

Tabela 4 Analiza SWOT pojazdów hybrydowych
Table 4 SWOT analysis of hybrid vehicles

<p>MOCNE STRONY (S)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Nie wymaga dodatkowej infrastruktury •Odzyskiwanie energii z hamowania 	<p>SŁABE STRONY (W)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Emisja spalin wywołana występowaniem silnika spalinowego
<p>SZANSE (O)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Wprowadzenie elektrycznych hybryd 	<p>ZAGROŻENIA (T)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Długi i skomplikowany proces wdrożenia pojazdów

Tabela 5 Analiza SWOT pojazdów wodorowych
Table 5 SWOT analysis of hydrogen vehicles

<p>MOCNE STRONY (S)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Niskoemisyjność 	<p>SŁABE STRONY (W)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Wysoki koszt zakupu •Wysokie koszty eksploatacji
<p>SZANSE (O)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Możliwość znacznej produkcji wodoru do napędzania pojazdów przez dłuższy czas 	<p>ZAGROŻENIA (T)</p> <ul style="list-style-type: none"> •Skomplikowany proces magazynowania wodoru oraz rozdzielania wodoru od tlenu

Wykonanie analizy SWOT pozwoliło dostrzec różnice między poszczególnymi paliwami alternatywnymi w transporcie miejskim, a jej efekty umożliwiły wybór jednego z nich jako wiodącego nad pozostałymi. Najkorzystniejszym rozwiązaniem, które ma największą szansę na rozwój jest tabor elektryczny ze względu na możliwość wykorzystania alternatywnych źródeł energii. Definicja zeroemisyjności słusznie podkreśla brak lokalnych zanieczyszczeń powietrza, czyli w miejscu użytkowania pojazdu, nie oznacza to jednak iż nie następuje emisja szkodliwych związków chemicznych w procesie wytwarzania paliwa. W Polsce, gdzie większość energii elektrycznej jest produkowana w elektrowniach ciepłych, które są

opalone węglem, wytwarzanie energii elektrycznej zawsze niesie za sobą produkcję szkodliwych pyłów. Polska staje w obliczu unijnych zaostżeń odnośnie redukcji dwutlenku węgla, który w dużej mierze jest wytwarzany w elektrowniach opalanych węglem, z których pochodzi ponad 70% energii elektrycznej wytwarzanej w Polsce. Stąd też rodzi się inicjatywa inwestowania w rozwój w niekonwencjonalne elektrownie przed rozbudową taboru elektrycznego, który wtedy będzie w stanie spełnić swoje założenia całościowo. Odwrotną sytuację generuje wykorzystanie wodoru jako paliwa napędowego, którego uzyskiwania co prawda generuje niewielką emisję zanieczyszczeń, jednak jest on produktem ubocznym wielu procesów chemicznych, w związku z tym jego wykorzystanie wpisuje się w nurt *zero waste*, którego głównym założeniem jest maksymalne ograniczenie generowania zanieczyszczeń i odpadów [26].

Oczywistym kierunkiem rozwoju komunikacji miejskiej jest rozbudowa taboru nisko i zeroemisyjnego. Jednak władze samorządowe powinny mieć na uwadze dynamicznie zmieniające się przepisy i zaostżenia wynikające z planów redukcji emisji spalin. W związku z tym w najbliższych latach prognozuje się największą rozbudowę taboru elektrycznego, który ma znaczną szansę na rozwój ze względu na możliwość powstania elektrowni wykorzystujących alternatywne źródła energii. Korzyści środowiskowe oraz ekonomiczne sprawiają, iż pojazdy zasilane alternatywnymi paliwami wyprą stosowanie autobusów konwencjonalnych.

LITERATURA

- [1] <http://designthinking.pl/co-to-jest-design-thinking/> [dostęp 16.10.2019 r.].
- [2] Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych z dnia 11 stycznia 2018 r.
- [3] ROBERT BOSCH GMBH, *Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [4] <https://www.autofakty.pl/poradniki/naped-hybrydowy-samochodzie-warto-wiedziec/> [dostęp 20.10.2019 r.].
- [5] <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/hybryda-elektryczna-hybryda-elektrobus--czym-sie-roznia-55926.html> [dostęp 16.10.2019 r.].
- [6] E. KORZEC, A. SZURLEJ *CNG jako paliwo alternatywne w zakładach komunikacji miejskiej, IV Krakowska Konferencja Młodych Uczonych ProFuturo, 17-19.09.2009* Kraków.
- [7] http://innobaltica.pl/1_55_paliwa-alternatywne-w-komunikacji.html [dostęp 16.10.2019 r.].
- [8] <https://cng.auto.pl/3144/cng-i-Ing-dyrektywa-czysta-energia-dla-transportu-stracona-szansa-paliw-alternatywnych/>
- [9] <http://pgnig.pl/cng/cennik-cng> [dostęp 16.10.2019 r.].
- [10] <https://cng-Ing.pl/wiadomosci/Gazomobilnosc-dzieki-elektromobilnosc,wiadomosc,9249.html> [dostęp 18.10.2019r.]
- [11] <https://cng.auto.pl/15554/zerowa-stawka-akczyzy-na-gaz-ziemny-cng-i-Ing-od-1-czerwca-2018-r/> [dostęp 16.10.2019r.]
- [12] http://infobus.pl/lomza-i-suwalki-kupia-25-autobusow-cng-zaczynaja-od-stacji_more_111462.html# [dostęp 20.10.2019r.]
- [13] *Paliwa alternatywne w komunikacji miejskiej*, Centrum Informacji o Rynku Energii
- [14] <https://elektrowoz.pl/transport/jaka-wydajnosc-ma-silnik-elektryczny-abb-osiagnelo-9905-procent/> [dostęp 20.10.2019r.]

-
- [15] <https://blog.pgd.pl/moc-hybrydy-systemowa-czy-sumaryczna/> [dostęp 17.10.2019r.]
- [16] K. Krawiec, *Proces wprowadzania autobusów elektrycznych do eksploatacji przedsiębiorstwach komunikacji miejskiej – wybrane zagadnienia*
- [17] <http://zielonagora.wyborcza.pl/zielonagora> [dostęp 17.10.2019 r.].
- [18] <https://www.pkm.jaworzno.pl> [dostęp 16.10.2019 r.].
- [19] <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/autobus-elektryczny-bez-kabla-i-gniazdka-2641.html> [dostęp 16.10.2019 r.].
- [20] <https://www.green-projects.pl/wodorowe-autobusy-zero-emisji/> [dostęp 17.10.2019 r.].
- [21] <http://gramwzielone.pl/auto-ekologiczne/30255/najwieksze-w-europie-zamowienie-na-autobusy-wodorowe> [dostęp 17.10.2019 r.].
- [22] http://www.lotosp.pl/322/p,174,n,4845/grupa_kapitalowa/centrum_prasowe/aktualnosci/wodor_na_stacjach_lotosu_od_2021 [dostęp 16.10.2019 r.].
- [23] <https://moto.rp.pl/technologie/18166-wodorowy-przelom-polskich-drogach> [dostęp 18.10.2019r.].
- [24] <http://gashd.eu/2017/12/16/autobusy-cng-koszt-zakupu-w-porownaniu-z-innymi-paliwami/> [dostęp 17.10.2019 r.].
- [25] M. ORZECZOWSKA, D. KRYZIA, 2014. *Analiza SWOT wykorzystania gazu ziemnego w transporcie drogowym w Polsce*. Polityka energetyczna- Energy Policy Journal.
- [26] E. SZUMSKA, E. SENDEK-MATYSIAK, M. PAWEŁCZYK, *Porównanie kosztów cyklu życia autobusów miejskich z napędami konwencjonalnymi i alternatywnymi*.

FORECAST OF COMPETITIVENESS APPLYING ALTERNATIVE FUELS IN URBAN TRANSPORT IN TERMS OF ELEKTROMOBILE VEHICLES

Key words: *electromobility, alternative fuels, hybrid vehicles, hydric vehicles*

The main topic of article is use of alternative fuels in a public transport and implementing zero-emission solutions in urban logistics of public communication. There will be introduced a technical conditioning of technological solutions. There will be highlighted forecasted development's directions of public transport and activities aimed at sustainable development urban areas. The main goal of paper is research of strengths and faults of particular means of transport and analysis of theirs expansion's chances in urban communication.