

Article citation info:

Kieracińska A, Piórkowski P. Analysis of the reasonableness of using electric drives in motor vehicles – The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji. 2016; 74(4): 47-58, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL74.ART4>

Analysis of the reasonableness of using electric drives in motor vehicles

Krótki przegląd technologii głównych komponentów pojazdów elektrycznych

Anna Kieracińska¹, Piotr Piórkowski²

**Przemysłowy Instytut Motoryzacji,
Politechnika Warszawska**

Summary

The EU transport policy is to implement a plan aimed at a significant reduction of the CO₂ emission, to be phased over the years 2020-2030-2050. Therefore, restrictions are to be gradually imposed on the use of vehicles with internal combustion (IC) engines, to eliminate such vehicles from urban traffic by 2050. Instead, the vehicles with alternative, low-emission drive systems will be promoted. At present, very high prices of electrochemical traction batteries have a significant share in the vehicle purchase price and electric vehicles are much more expensive than vehicles with conventional drive systems. The high purchase prices are compensated by low electric energy costs in comparison with the costs of hydrocarbon fuels. The present-day battery technologies should be considered an interim stage and should not be treated as a target, because they may turn out within a few years to be cost-consuming and

¹ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: a.kieracinska@pimot.eu

² Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: piotr.piorkowski@simr.pw.edu.pl

obsolete solutions. On the other hand, electric traction motors have been built, developed, and used for many years and the risk of their failure is lower than the risk of a battery failure. The battery recharging process always involves the necessity of providing adequate infrastructure of a power supply network. Electric vehicles, especially their batteries and battery charging systems, are still at the development stage, without a crystallized vision of target solutions. Another problem is the lack of infrastructure and standardization. In spite of this, electrical drives (including those with hydrogen fuelling), as being characterized by zero emissions, may be expected to become in the long term a target and predominating solution.

Streszczenie

Celem polityki transportowej UE jest plan znacznej redukcji emisji CO₂ rozłożonej na lata 2020-2030-2050. Stopniowo wprowadzane będą obostrzenia dla pojazdów z napędem spalinowym, aż do całkowitego ich wyeliminowania z ruchu miejskiego do 2050 r. Pojazdy o napędach alternatywnych, niskoemisyjnych będą z kolei promowane.

Wysokie ceny trakcyjnych baterii elektrochemicznych sprawiają, że stanowią one znaczny udział w cenie pojazdu, a pojazdy elektryczne są znacznie droższe od pojazdów z napędem konwencjonalnym. Wysokie ceny zakupu są rekompensowane niskimi kosztami energii elektrycznej w stosunku do paliw węglowodorowych.

Obecne technologie baterii są technologiami przejściowymi i nie należy ich traktować, jako docelowe, a w ciągu kilku lat mogą okazać się rozwiązaniami drogimi i przestarzałymi. Z kolei trakcyjne silniki elektryczne są budowane, rozwijane i eksploatowane od wielu lat i ryzyko związane z ich awarią jest niższe niż w przypadku baterii. Z procesem ładowania baterii zawsze wiąże się konieczność zapewnienia odpowiedniej infrastruktury sieci energetycznej.

Pojazdy elektryczne, a szczególnie baterie i systemy ładowania, są ciągle w fazie rozwoju, jeszcze bez wykrystalizowanej wizji docelowych rozwiązań. Problemem jest też brak infrastruktury i standaryzacji. Mimo to można przypuszczać, że w długim terminie napęd elektryczny (w tym wodorowy), jako zero-emisyjny, będzie napędem docelowym i dominującym.

Keywords: electric vehicles, batteries, battery charging, charging infrastructure, electric drives

Słowa kluczowe: electric vehicles, batteries, battery charging, charging infrastructure, electric drives

1. Transport drogowy w miastach – cele polityki transportowej UE na lata 2020-2030-2050

Obecnie w 27 państwach Unii Europejskiej transport drogowy odpowiada za emisję 24% CO₂. Celem polityki transportowej UE jest plan znacznej redukcji emisji CO₂ rozłożonej na lata 2020-2030-2050, tak aby z obecnych 1200 milionów ton CO₂ rocznie, do roku 2030 obniżyć emisję do 1000 milionów ton, a do roku 2050 osiągnąć poziom 400 milionów ton [1].

Plan osiągnięcia tego celu rozpisany jest na szereg działań szczegółowych, których kilka najważniejszych przedstawionych jest poniżej:

Tab 1. Cele polityki transportowej UE dot. redukcji emisji CO₂ rozłożonej na lata 2020-2030-2050

Cel	Termin	Dokument źródłowy
Redukcja emisji gazów cieplarnianych przez środki transportu <ul style="list-style-type: none"> • o 20% względem poziomu z roku 2008 • o 60% względem poziomu z roku 1990 	2030 2050	Strategie UE opisane w dokumentach: <ul style="list-style-type: none"> • EC Energy 2020. COM(2010) 639 final • EC W.P. Roadmap to a single European transport area COM(2011) 144 final. • EU Road Map for moving to a competitive low carbon economy COM(2011) 112 final
Dopuszczalne poziomy emisji CO ₂ noworejestrowanych pojazdów osobowych: 130g CO ₂ /km 95g CO ₂ /km	2012-15 2020	EC Regulation 443/2009 for passenger cars
Poprawa efektywności zużycia paliwa w środkach transportu o 20%	2020	EC Energy 2020. COM(2010) 639 final
10% udziału Odnawialnych Źródeł Energii w transporcie	2020	Dyrektywa Directive 2009/28/EC on RES
Udział pojazdów z napędem spalinowym w transporcie miejskim <ul style="list-style-type: none"> • zredukowany o 50% • całkowicie wykluczony 	2030 2050	EC White Paper Roadmap to a single European transport area COM(2011) 144 final.

Dokumenty te jednoznacznie wskazują kierunek przyszłych działań administracyjnych, w kierunku stopniowo narastających obostrzeń dla pojazdów z napędem spalinowym, aż do całkowitego ich wyeliminowania z ruchu miejskiego do 2050 r.

Pojazdy o napędach alternatywnych, niskoemisyjnych będą z kolei promowane (m.in. poprzez brak restrykcji skupionych na pojazdach konwencjonalnych) tak, aby wykazać osiągnięcie poszczególnych celów, wytycznych, statystyk czy dopasowania do wymagań instytucji nadrzędnych.

Niskoemisyjność środków transportu może być osiągnięta początkowo poprzez zastosowanie paliw alternatywnych (CNG, LNG). Następnym stopniem jest napęd hybrydowy, stanowiący rozwiązanie przejściowe między napędem spalinowym i elektrycznym. W długim terminie rozwiązaniem docelowym jest napęd elektryczny i wodorowy. Należy jednak mieć na uwadze, że energia elektryczna służąca do ładowania pojazdów elektrycznych też może wiązać się z emisją CO₂. Obecnie korzyść ekologiczna zastosowania napędu elektrycznego wiąże się z „eksportem” emisji poza obszary miejskie i o kilka procent wyższej sprawności stacjonarnego spalania paliw w elektrowni często połączonego z kogeneracją. W długim terminie, docelowo energia elektryczna będzie wytwarzana z bezemisyjnych Odnawialnych Źródeł Energii (OZE), zatem zarówno pojazdy elektryczne jak i napędzane wodorem (wytworzonym poprzez elektrolizę wody) będą pojazdami całkowicie wolnymi od emisji CO₂.

2. Całkowity koszt posiadania pojazdu (ang. TOC – Total Cost of Ownership)

Na całkowity koszt posiadania pojazdu składają się:

- Koszt zakupu
- Koszty eksploatacji:
 - Koszt paliwa
 - Koszt serwisu i napraw
 - Inne koszty (ubezpieczenia, podatki itp.)

Obecnie wysokie ceny trakcyjnych baterii elektrochemicznych wynoszące ~500-1000 \$/kWh sprawiają, że stanowią one znaczny udział w cenie pojazdu, a pojazdy elektryczne są znacznie droższe od pojazdów z napędem konwencjonalnym.

Wysokie ceny zakupu są rekompensowane niskimi kosztami energii elektrycznej w stosunku do paliw węglowodorowych, co może sprawiać wrażenie ekonomicznej opłacalności zastosowania napędu elektrycznego.

Baterie elektrochemiczne są obecnie najmniej stabilnym, a jednocześnie najdroższym komponentem pojazdu elektrycznego. Baterie ulegają w trakcie eksploatacji stopniowej degradacji, objawiającej się wzrostem rezystancji wewnętrznej i utratą pojemności. Proces degradacji baterii jest nieunikniony i naturalny. Spadek użytecznej pojemności baterii objawia się coraz krótszym zasięgiem pojazdu oraz potrzebą serwisu baterii, polegającego na wymianie pojedynczych cel, a nawet całych modułów (zestawów cel) baterii. Baterie elektrochemiczne zbudowane są z wielu połączonych równolegle, ale przede wszystkim szeregowo pojedynczych cel. Taka konfiguracja sprawia, że jakość całego zestawu baterii limitowana jest kondycją najbardziej zdegradowanej celi (podobnie jak łańcuch, który ma wytrzymałość najsłabszego ogniwa). Wymiana pojedynczej celi poprawi parametry całego zestawu jedynie do poziomu kolejnej, najbardziej zużytej celi. Z tego względu można oczekiwać, że wyraźna poprawa stanu technicznego baterii i związanego z tym

zasięgu jazdy, będzie wiązała się z koniecznością wymiany wielu cel, co będzie wiązało się z wysokimi kosztami serwisu baterii i pojazdu.

Istnieją opracowania np. [2],[3], z których wynika, że mimo niższych kosztów energii elektrycznej w stosunku do paliwa węglowodorowego, Całkowity Koszt Posiadania (ang. TOC – Total Cost of Ownership) pojazdu elektrycznego może być wyższy, niż pojazdu konwencjonalnego, ze względu na degradację baterii i związane z tym koszty obniżenia wartości, serwisu czy wymiany baterii.

Wynika z tego wniosek, że z punktu widzenia właściciela pojazdu elektrycznego należy dążyć do zabezpieczenia się przed kosztami związanymi z obniżeniem wartości baterii, jej serwisu i ewentualnej wymiany, poprzez mechanizmy typu leasing, ubezpieczenie czy długookresowe gwarancje utrzymania określonych parametrów baterii pozwalających na utrzymanie odpowiedniego zasięgu jazdy w określonych warunkach.

3. Technologie trakcyjnych baterii elektrochemicznych

W chwili obecnej w pojazdach elektrycznych najczęściej stosuje się następujące technologie baterii elektrochemicznych:

Tab 2. Parametry energetyczne najczęściej stosowanych typów baterii litowych

	LiMn	LTO	LiFePO4
Gęstość energii masowa	120-140 Wh/kg	80-90 Wh/kg	90-110 Wh/kg
Gęstość energii wolumetryczna	~220 Wh/l	~165 Wh/l	~220 Wh/l
Napięcie nominalne jednej celi	3.8V	2.3V	3.3V

Dążenia producentów idą w kierunku zwiększania gęstości masowej i wolumetrycznej baterii tak, aby w jednostce masy i pojemności móc zmagazynować jak najwięcej energii, a poprzez to zwiększyć zasięg pojazdu. Nie zawsze zwiększanie gęstości energetycznej idzie w parze z trwałością baterii, gdyż często jest to wynik kompromisu pomiędzy wytrzymałością, a trwałością. Wysokie wartości gęstości energetycznej baterii powinny zawsze być konfrontowane z gwarantowaną przez producenta określoną trwałością baterii. Godna zastanowienia jest strategia wyboru technologii baterii o niższej gęstości energetycznej, ale większej gęstości mocy i bardziej odpornej na degradację. Przykładem jest tu technologia baterii litowo-tytanowych LTO.

Z bateriami elektrochemicznymi wiąże się specyficzna terminologia:

„State of Charge” SOC (stan naładowania) określa w jednostkach względnych (np. w %) poziom dostępnej energii zgromadzonej w baterii. Ponieważ pojemność baterii z czasem ulega obniżeniu, baterie nowa i używana w pełni naładowane do SOC=100% zapewnią dwa różne zasięgi jazdy. Parametr SOC jest informacją czy bateria jest naładowana i w jakim stopniu.

Z parametrem SOC wiąże się charakterystyka napięciowa baterii. Kształt charakterystyki napięciowej (napięcie w funkcji SOC) zależy od m.in. od technologii baterii. Szybsze opadanie napięcia wraz z rozładowywaniem nie musi oznaczać złej jakości baterii, o ile

kształt charakterystyki jest zachowany w miarę upływu czasu. Większe znaczenie ma odległość pomiędzy krzywymi wyznaczonymi dla różnych wartości prądu – obrazująca poziom rezystancji wewnętrznej. Z charakterystyki tej wprost wynika wniosek, że przy większych obciążeniach prądowych bateria szybciej osiąga poziom napięcia rozładowania, co skutkuje skróceniem zasięgu jazdy. Chcąc uzyskać większy zasięg, pojazd nie powinien być poddawany zbyt dużym obciążeniom prądowym. Prowadzi to wprost do konieczności zwiększenia pojemności baterii.

„State of Health” SOH (stan zużycia) – parametr określający stopień zużycia baterii. W wyniku eksploatacji maleje pojemność użyteczna baterii i wzrasta jej rezystancja wewnętrzna (przykład [4]) – skutkuje to skróceniem zasięgu jazdy pojazdu elektrycznego. Zużycie baterii jest procesem naturalnym i nieuniknionym, należy jednak okresowo przez cały okres eksploatacji badać czy stopień zużycia baterii postępuje zgodnie z deklaracjami producenta i czy nie następuje szybciej. Badanie stanu technicznego baterii można wykonać poprzez specjalistyczne badania np. spektroskopię impedancyjną [5] w wyspecjalizowanych laboratoriach lub doraźnie (prościej, ale z większym marginesem błędu), poprzez badanie zasięgu jazdy w określonych, powtarzalnych warunkach (ta sama trasa, obciążenie, natężenie ruchu, temperatura).

Jednym z istotnych czynników wpływających na szybszą degradację baterii jest wartość prądu ładowania. Technologie tzw. szybkiego ładowania wymuszają stosowanie wysokich wartości prądu. W ten sposób wewnątrz baterii wydziela się duża ilość ciepła, proporcjonalna do iloczynu kwadratu prądu i rezystancji wewnętrznej. Ciepło to, nawet jeżeli zostanie odprowadzone, powoduje przyspieszanie procesów degradacji baterii. Technologie szybkiego ładowania mogą być efektywnie i długotrwanie stosowane jedynie dla baterii o bardzo niskich wartościach rezystancji wewnętrznej (np. LTO) lub zestawów baterii współpracujących z superkondensatorami.

Pojemność baterii – parametr określający ilość ładunku elektrycznego, który bateria może akumulować. Pojemność można zwiększać poprzez równoległe łączenie cel. Szeregowo połączenie cel nie zwiększa pojemności, a jedynie napięcie zestawu baterii. Pojemność baterii w miarę eksploatacji ulega stopniowemu zmniejszaniu, co wyjaśniono powyżej. Ważne jest, aby pojemność była regularnie sprawdzana i weryfikowana z zadeklarowanymi przez producenta wartościami. Pojemność baterii wprost wiąże się z zasięgiem jazdy pojazdu. Pojemność baterii zależy od temperatury – generalnie rośnie ona wraz ze wzrostem temperatury, aby po osiągnięciu ekstremum potem znowu maleć. Zbyt wysoka temperatura, poza spadkiem pojemności, degraduje baterię i skraca jej żywotność [6]. Systemy zapewniające stabilizację temperatury baterii elektrochemicznej (ogrzewanie/wentylacja/ chłodzenie baterii) poza zwiększeniem bezpieczeństwa działania, zwiększają jej trwałość. Wyposażenie pojazdu w system stabilizacji temperatury baterii stanowi znaczną korzyść i zaczyna być już normą. Z drugiej strony brak systemu stabilizacji temperatury baterii i jej praca w niskich temperaturach (np. w okresie zimowym) naraża baterię na znaczne zredukowanie jej pojemności i wzrost rezystancji wewnętrznej, co może skutkować nawet całkowitym unieruchomieniem pojazdu.

Battery Management System BMS (system zarządzania pracą baterii) – Bateria elektrochemiczna jest elementem drogim i wrażliwym na niewłaściwą eksploatację. Jej trwałość należy poprawić poprzez zastosowanie systemu zarządzania pracą baterii tzw. BMS. Rolą takiego systemu jest m.in.:

- monitorowanie stanu pojedynczych cel baterii;
- uniemożliwienie przekraczania limitów prądowych, temperaturowych i napięciowych;
- możliwość działania baterii po przejściu w tryb awaryjny;
- odłączenie baterii w przypadku niebezpieczeństwa;
- wyrównywanie napięć i ładunku pomiędzy pojedynczymi celami;
- wyznaczanie SOC;
- wyznaczanie SOH;
- wyświetlanie kierowcy komunikatów i informacji o parametrach pracy baterii;
- predykcja zasięgu jazdy;
- zarządzanie procesem ładowania – kształtowanie profilu prądu ładowania;
- możliwość ładowania wstępnego, służącego przetestowaniu stanu baterii i uniemożliwieniu ładowania pełną mocą baterii uszkodzonej;
- możliwość doładowywania indywidualnych cel;
- zapisywanie historii błędów działania baterii – przekraczania limitów, w celu identyfikacji uszkodzonych cel;
- możliwość przejścia w tryb „Limp Home Mode” – polegającego na możliwości dojechania do stacji ładowania przy wyłączeniu zbędnych obciążeń (klimatyzacja, audio, wyświetlacze itp.).

Oczywiście im więcej tego typu funkcji system BMS zapewnia tym lepiej. Niedopuszczalny jest natomiast brak takiego systemu w pojeździe elektrycznym.

4. Perspektywy rozwoju technologii baterii elektrochemicznych

Obecnie największym problemem w stosowaniu pojazdów elektrycznych jest wysoka cena baterii ~500-1000 \$/kWh i ograniczona pojemność energetyczna. Niemniej jednak rosnąca skala produkcji pojazdów elektrycznych jak i rozwój nowych technologii baterii stwarzają realną szansę, że w perspektywie roku 2020 uda się znacznie obniżyć koszty baterii o ok. 60% do poziomu ~270-330 \$/kWh [7], [8].

Jednocześnie rozwój nowych technologii baterii, takich jak: Zn-air, Li-S, Li-air pozwoli zwiększyć gęstość energetyczną ogniw do poziomu 300-900 Wh/kg [9].

Dane te wskazują, że obecne technologie baterii są technologiami przejściowymi i nie należy ich traktować, jako docelowe, a w ciągu kilku lat mogą okazać się rozwiązaniami drogimi i przestarzałymi.

5. Technologie ładowania baterii

Baterie elektrochemiczne wymagają ładowania, co może odbywać się wg następujących sposobów:

- Wymiana baterii (battery swapping)
- Wolne ładowanie
- Szybkie ładowanie
- Ładowanie indukcyjne

Wady i zalety poszczególnych metod opisane są poniżej. Z procesem ładowania zawsze wiąże się konieczność zapewnienia odpowiedniej infrastruktury sieci energetycznej.

Wymiana baterii (swapping) – rozwiązanie to polega na szybkim usunięciu z pojazdu baterii rozładowanej i zastąpieniu jej naładowaną. System taki stosowany jest dla pojazdów osobowych np. przez firmę „Better Place”. Inny przykład to flota autobusów elektrycznych w Pekinie.

Zalety:

- Baterie ładowane są stacjonarnie poza pojazdem, co pozwala na ograniczenie ilości elektroniki ładowarek na pokładzie pojazdu;
- Stacjonarne, wolne ładowanie baterii w odpowiednich warunkach prądowych i temperaturowych pozwala na precyzyjne zarządzanie procesem ładowania i utrzymania dobrego stanu baterii przez długi czas;
- Stacja wymiany i ładowania jest stacjonarnym magazynem energii w systemie „smart grid”;
- Krótki czas wymiany baterii porównywalny z czasem tankowania paliwa węglowodorowego;
- Możliwość częstej wymiany baterii umożliwia redukcję jej pojemności i zwiększenie możliwości przewozowych.

Wady:

- Wysoki koszt infrastruktury;
- Konieczność dojazdów do stacji w celu wymiany baterii i wiążący się z tym ograniczony zasięg.

System wolnego ładowania polega na podłączeniu baterii pojazdu do ogólnie dostępnej sieci elektrycznej.

Zalety:

- Minimalny koszt infrastruktury i możliwość korzystania z już istniejących przyłączy;
- Duża elastyczność wyboru i zmiany miejsca ładowania;
- Długie ładowanie niską wartością prądu korzystnie wpływa na trwałość baterii;
- Duża pojemność baterii zapewnia stosunkowo duży zasięg jazdy.

Wady:

- Konieczność umieszczenia ładowarki na pokładzie pojazdu;
- Duża pojemność baterii wpływa na zmniejszenie wolnej przestrzeni w pojeździe;
- Długi czas ładowania i związany z tym przestój.

System szybkiego ładowania polega na podłączeniu baterii pojazdu do ładowarki o dużej mocy.

Zalety:

- Możliwość zastosowania baterii o małej pojemności i uzyskanie wolnej przestrzeni w pojeździe;
- Krótki czas ładowania i związane z tym minimalne przestoje.

Wady:

- Konieczność budowy drogiej infrastruktury na trasie przejazdu i doprowadzenia przyłączy energetycznych o wysokiej mocy rzędu kilkuset kW;
- Duża liczba rozwiązań różnych producentów ogranicza możliwość standaryzacji;
- Mała elastyczność wyboru trasy i jej zmiany;
- Ładowanie dużą wartością prądu wymaga zastosowania specjalnych złączy, przewodów. Wzrasta ryzyko uszkodzeń;
- Duża wartość prądu szybciej degraduje baterię;
- Technologia w fazie rozwoju. Brak standaryzacji.

Ładowanie indukcyjne działa podobnie jak szybkie ładowanie z tą różnicą, że energia przekazywana jest poprzez strumień magnetyczny analogicznie jak w transformatorze.

Wady i zalety są podobne.

Dodatkowe wady to:

- Konieczność minimalizacji odległości pomiędzy uzwojeniami umieszczonymi w jezdni i w pojeździe, co może sprawiać trudności dla jezdni złej jakości i w warunkach zimowych;
- Konieczność precyzyjnego pozycjonowania pojazdu względem uzwojenia umieszczonego w jezdni;
- Wysokie straty energii w powietrzu wskutek rozpraszania strumienia magnetycznego;
- Nie do końca rozpoznany wpływ silnego strumienia magnetycznego na urządzenia i osoby znajdujące się w pojeździe;
- Technologia w fazie rozwoju. Brak standaryzacji.

6. Inne komponenty pojazdów elektrycznych

Bateria elektrochemiczna i system jej ładowania jest obecnie najdroższym i najbardziej wrażliwym komponentem pojazdu elektrycznego, dlatego należy poświęcić jej szczególną uwagę w trakcie eksploatacji.

Innym ważnym komponentem jest trakcyjny silnik (silniki) elektryczny. Trakcyjne silniki elektryczne są budowane, rozwijane i eksploatowane od wielu lat i ryzyko związane z ich awarią jest niższe niż w przypadku baterii. Niemniej jednak należy mieć świadomość, że w pewnych warunkach takie ryzyko może występować. Najmniejsze ryzyko niesie ze sobą stosowanie asynchronicznych silników indukcyjnych prądu przemiennego AC ze względu na prostą konstrukcję. Z większym ryzykiem wiąże się stosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Magnesy trwałe są bardzo wrażliwe na przegrzanie i po osiągnięciu określonej temperatury (temp. Curie) na trwałe tracą swoje właściwości magnetyczne. Dlatego ważne jest czy silniki takie są wyposażone w system monitorowania temperatury i system chłodzenia (najlepiej cieczą). Inne ryzyko to możliwość odklejenia magnesów, ze względu na to, że połączenie klejone to w zasadzie jedyna możliwość mocowania magnesów w silniku. Obecnie nie stosuje się do celów trakcyjnych klasycznych silników prądu stałego.

Silniki elektryczne zasilane są z baterii poprzez falowniki, które zamieniają napięcie stałe na wielofazowe napięcie o określonym kształcie (np. sinusoidalne, trapezoidalne itp.) i parametrach (częstotliwości, amplitudzie, przesunięciu fazowym). Falownik powinien być na tyle zaawansowany, aby umożliwiał realizację hamowania odzyskowego. Zalecane byłoby, aby falownik również mógł być odpowiednio chłodzony.

Bardzo ważne jest też umiejscowienie silnika. Najprostsze i najmniej podatne na uszkodzenie jest klasyczne zastosowanie pojedynczego silnika z mechanizmem różnicowym. Takie rozwiązanie ogranicza jednak stosowanie niskopodłogowego nadwozia. Alternatywne rozwiązanie to silniki umieszczone w piastach kół. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie niskopodłogowego nadwozia na całej jego długości. Pojawiają się tu jednak pewne ryzyka, których istnienia trzeba mieć świadomość:

- Wzrost masy nieresorowanej koła;
- Konieczność odpowiedniego uszczelnienia i zabezpieczenia przed zamoczeniem i zanieczyszczeniem wnętrza silnika;
- Konieczność wymuszonego chłodzenia, zwłaszcza w przypadku silnika z magnesami stałymi;
- Konieczność niezależnego sterowania prędkościami poszczególnych kół (różnicowania prędkości), aby odwzorować efekt działania dyferencjału podczas zakrętów.

Silnik musi być odpowiednio zaprojektowany i wykonany, aby zminimalizować wyżej wymienione ryzyka.

Istotny wpływ na sprawność całego elektrycznego układu napędowego ma napięcie nominalne baterii i silnika trakcyjnego. Generalnie, im wyższe napięcie, tym niższa wartość prądu przy tej samej mocy, a niższa wartość prądu to niższe straty na rezystancjach. Rozwiązania wysokonapięciowe dają szansę na uzyskanie wyższych sprawności. Z drugiej

strony zbyt wysokie napięcie podnosi ryzyko porażenia w razie awarii oraz zwiększa poziom emisji elektromagnetycznej przez falownik. Za względnie bezpieczne uważa się napięcia rzędu 500V.

Parametrem, na który też należy zwrócić uwagę jest deklarowane zużycie energii na 1 km. Parametr ten zależy od wielu czynników i może się zmieniać w zależności od warunków jazdy. Na jego wartość wpływają podobne czynniki jak w przypadku pojazdu konwencjonalnego, m.in.:

- Cykl jazdy wg którego zasięg był szacowany i związane z tym wartości prędkości maksymalnych, wartości i częstotliwości przyspieszeń, hamowań, nachylenie terenu;
- Współczynnik c_x pojazdu (współczynnik oporów aerodynamicznych)
- Masa i opory toczenia
- Możliwość i sprawność odzyskiwania energii podczas hamowań
- Sprawność układu napędowego
- Stan i warunki pracy baterii (jej rezystancja wewnętrzna)

Warunki jazdy mają większy wpływ na wartość zużycia energii niż stan i jakość pojazdu. Przeciętnie dla autobusu 12 metrowego parametr ten waha się w przedziale 1.2-1.4 kWh/km, a dla pojazdu osobowego 0.25-0.4 kWh/km. Oczywiście w ciężkich warunkach (np. jazda pod górę albo z dużą prędkością) wartości te mogą być znacznie wyższe.

Podsumowanie

Pojazdy elektryczne, a szczególnie baterie i systemy ładowania, są ciągle w fazie rozwoju, jeszcze bez wykrystalizowanej wizji docelowych rozwiązań. Sytuację tę pogłębia brak infrastruktury i standaryzacji. Jednak w długim terminie napęd elektryczny (w tym wodorowy), jako zero-emisyjny, będzie napędem docelowym i dominującym. Należy liczyć się, że eksploatacyjnie pojazdy elektryczne będą konkurencyjne w stosunku do pojazdów konwencjonalnych dopiero w okolicach roku 2020.

Nie należy w początkowym etapie, pochopnie wybierać skomplikowanych rozwiązań, wiążących się z dużymi inwestycjami w infrastrukturę, gdyż z upływem czasu może okazać się, że dominować będą inne systemy. Inwestycje w infrastrukturę i w bardziej zaawansowane rozwiązania należy czynić stopniowo na bazie już zdobytych doświadczeń z prostszymi rozwiązaniami.

Należy ostrożnie podchodzić do planów uzyskania ekonomicznych korzyści stosowania pojazdów elektrycznych, wynikających z niższych kosztów energii elektrycznej w stosunku do paliw węglowodorowych, tym bardziej, iż często spotykane rozwiązania prototypowe mogą być obciążone wysoką awaryjnością.

Może okazać się, że koszty serwisu, napraw czy wymiany baterii przekroczą oszczędności uzyskane z różnicy cen energii elektrycznej i paliwa. Dlatego ważne jest, aby zabezpieczyć się przed takimi kosztami w postaci gwarancji utrzymania określonego stanu baterii w długim terminie. Stan baterii można doraźnie określać poprzez pomiar zasięgu jazdy

w określonych i powtarzalnych warunkach (np. określona trasa, w określonej porze dnia, roku, temperaturze) lub w wyspecjalizowanych laboratoriach.

Dobrym rozwiązaniem dla właścicieli flot pojazdów elektrycznych (np. autobusów) byłaby możliwość dysponowania zróżnicowanymi rozwiązaniami (np. różna pojemność baterii), aby móc selekcjonować rozwiązania lepsze i gorsze na bazie doświadczeń wynikających z rzeczywistej eksploatacji. Dysponując flotą pojazdów elektrycznych (np. autobusów) i mając doświadczenia wynikające z rzeczywistej ich eksploatacji, można stać się posiadaczem cennego „know-how”. Flota jak i baza wiedzy może być podstawą do ubieganie się o dofinansowanie bardziej zaawansowanych, ale i ekonomicznie bardziej ryzykownych projektów i rozwiązań.

Literatura

1. EC White Paper Roadmap to a single European transport area COM(2011) 144 final.
2. Propfe B, Redelbach M, Santini D J, Friedrich H. Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. [cited 2 Nov 2016] Available from: http://elib.dlr.de/75697/1/EVS26_Propfe_final.pdf
3. Raport McKinsey Quarterly June 2009: Electrifying Cars: How three industries will evolve [cited 2 Nov 2016] Available from: http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/electrifying_cars_how_three_industries_will_evolve
4. BU-208. Cycling Performance. [cited 2 Nov 2016] Available from: http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_performance_as_a_function_of_cycling
5. Kiel M, Mangler A. Monitoring, modelling and analysis of batteries for electromobility.
6. Lithium Battery Failures - Cycle Life and Temperature. [cited 2 Nov 2016] Available from: http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm
7. Hensley R, Knupfer S, Pinner D. Electrifying cars: How three industries will evolve. Raport McKinsey Quarterly June 2009. [cited 2 Nov 2016] Available from: <http://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/electrifying-cars-how-three-industries-will-evolve>
8. Dinger A, Martin R, Mosquet X, Rabl M, Rizoulis D, Russo M, Sticher G. Car Batteries: Plugging into a \$25 Billion Market - Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. Raport Boston Consulting Group, 1/7/10. [cited 2 Nov 2016] Available from: https://www.bcgperspectives.com/content/articles/sustainability_automotive_batteries_for_electric_cars/
9. Bruce P G, Freunberger S A, Hardwick L J, Tarascon JM. Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage. Nature Materials 11, 19–29. 2012. doi:10.1038/nmat3191