

Zagadnienie jednostkowego zużycia energii pojazdu elektrycznego na przykładzie samochodu osobowego po konwersji napędu

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono wynik badania jednostkowego zużycia energii. Obiektem badań był pojazd elektryczny po konwersji napędu. Wyniki badania porównano z innymi pojazdami opisywanymi w literaturze naukowej.

Abstract. This paper presents result of specific energy consumption test. The object of the study was an electric vehicle after the drive conversion. The results were compared with other vehicles described in the scientific literature. (The problem of specific energy consumption of an electric vehicle on the example of a car after the drive conversion).

Słowa kluczowe: zużycie energii, pojazd elektryczny, europejski cykl jezdny, miejski cykl jezdny.

Keywords: energy consumption, electric vehicle, NEDC, UDC.

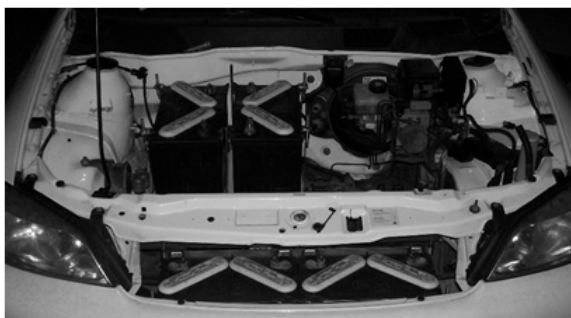
Wstęp

W ostatnich latach ponownie wzrosło zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Pojazdy te szybko znajdują sobie zwolenników oraz przeciwników ich użytkowania. Jednym ze sposobów porównania pojazdów spalinowych z elektrycznymi jest jednostkowy bilans energetyczno-emisyjny. Metoda ta pozwala na obliczenie ilości emitowanego do atmosfery dwutlenku węgla, przy uwzględnieniu wszystkich strat, począwszy od wytworzenia energii, aż po straty związane z ruchem pojazdu – mówiąc prościej – aż po koła. Co ciekawe, samochody zasilane energią elektryczną pochodzącą z elektrowni węglowych, powodują większą emisję dwutlenku węgla niż samochody tradycyjne [1].

Prostszym, sposobem porównywania pojazdów jest jednostkowe zużycie energii czyli ilość energii, jaką potrzebuje pojazd na pokonanie dystansu 100km.

Konwersja pojazdu – opis modelu poddanego badaniu

Do badań wykorzystano samochód osobowy klasy C, produkowany przez jedną z wiodących marek europejskich. Pojazd ten zakupiony został w wersji kombi z silnikiem o zapłonie iskrowym. Następnie został poddany konwersji napędu na elektryczny. W efekcie usunięto silnik spalinowy, pozostawiono oryginalną skrzynię biegów oraz sprzęgło, natomiast zamontowano silnik prądu stałego o mocy znamionowej 14kW i masie 11kg, sterownik silnika (chopper), 12 trakcyjnych akumulatorów kwasowo-ołowiowych o sile elektromotorycznej 12V, pojemności 20-godzinnej 115 Ah i masie 28kg (każdy), przetwornicę napięcia 84VDC/12VDC, ładowarkę pokładową 230VAC/72VDC. Masa pojazdu po konwersji osiągnęła wartość 1500kg, z czego 336kg stanowi masa baterii akumulatorów, zaś współczynnik oporów powietrza c_x – deklarowany przez producenta – wynosi 0,3.



Rys.1. Rozmieszczenie akumulatorów w komorze silnika



Rys.2. Rozmieszczenie akumulatorów w przedziale bagażowym

Akumulatory połączone w dwie gałęzie równoległe – po 6 akumulatorów połączonych szeregowo w każdej gałęzi. Cztery akumulatory znalazły miejsce w komorze silnika (rys.1), zaś pozostałe osiem w przedziale bagażowym (rys.2). Przetwornica pełni funkcję stałego doładowywania akumulatora pokładowego zasilającego odbiorniki elektryczne 12V. Powierzchnia czołowa została obliczona korzystając ze wzoru:

$$(1) \quad A = \gamma_p H b_k$$

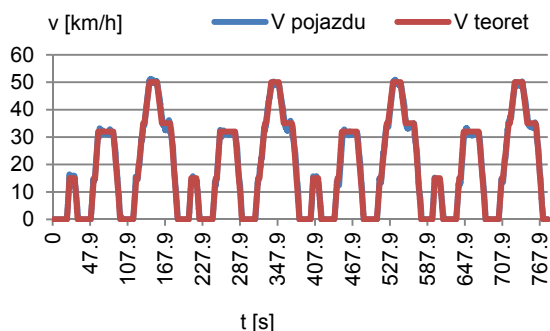
gdzie : γ_p – współczynnik wypełnienia przekroju poprzecznego, wynoszący 0,8÷1,1; H – wysokość pojazdu, b_k – rozstaw kół jezdnych.

Zakładając (po oszacowaniu), że γ_p wynosi 0,93; powierzchnia czołowa pojazdu to około 2m².

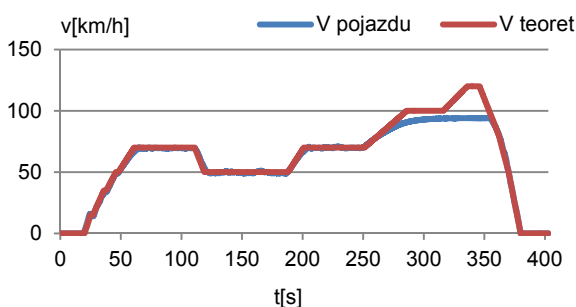
Badanie jednostkowego zużycia energii

Badanie jednostkowego zużycia energii zostało wykonane zgodnie z polską normą PN-EN 1986-1:2001 Pojazdy drogowe o napędzie elektrycznym – Pomiar sprawności energetycznej. Przebiegi zawarte w normie są zgodne z nowym europejskim cyklem jezdny – NEDC (ang. New European Driving Cycle) – składającego się z cyklu miejskiego – UDC (ang. Urban Driving Cycles) i pozamiejskiego – EUDC (ang. Extra-Urban Driving Cycle). Do badań wykorzystano hamownię podwoziową typu EMDY 48, z maszyną prądu przemiennego – pełniącą funkcję hamulca. Przed przystąpieniem do badań bateria akumulatorów została naładowana oraz zmierzono poziom napięcia baterii akumulatorów. Następnie wykonano dwukrotny przejazd na hamowni podwoziowej zgodnie z przebiegiem nr2 [2]. Przebieg nr2 składa się z cyklu

miejskiego (4 elementarnych cykli miejskich – przebieg nr1) i 1 cyklu pozamiejskiego. Po wykonaniu badania niezwłocznie podłączono pojazd do sieci i naładowano baterię akumulatorów do stanu sprzed badań. Pojedynczy przebieg nr2 – wykonany podczas badań – prezentuje rysunek 3 oraz 4. Po zakończeniu procesu ładowania sprawdzono napięcie baterii akumulatorów. Wartość napięcia zgadzała się z wartością zmierzoną po ładowaniu, przed rozpoczęciem badań. Proces ładowania pojazdu został wykonany na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku laboratoryjnym. Stanowisko to zawiera licznik energii elektrycznej, który umożliwia bezpośrednie podłączenie pojazdu elektrycznego (nie wliczając zabezpieczeń) i służy wyłącznie do celów badawczych prowadzonych nad pojazdem elektrycznym.



Rys.3. Przebieg prędkości w funkcji czasu osiągnięty podczas badań jednostkowego zużycia energii (cykl miejski)



Rys.4. Przebieg prędkości w funkcji czasu osiągnięty podczas badań jednostkowego zużycia energii (cykl pozamiejski)
V teoret – przebieg teoretyczny, V pojazdu – przebieg pojazdu

Po zakończeniu badania wyniki wykazały, że pojazd pokonał odcinek 21424m, co potwierdziło się z odczytem z licznika pokładowego pojazdu. Wynik różni się z teoretycznym, przewidywanym przez normę, co związane jest z niską prędkością maksymalną pojazdu. Do naładowania (doładowania) baterii akumulatorów potrzebna była energia 6kWh. Wykorzystano wzór na jednostkowe zużycie energii przedstawiony w normie [2]:

$$(2) \quad C = \frac{E}{d}$$

gdzie: E – wartość pobranej energii [kWh], d – dystans pokonany przez pojazd podczas badania [km].

W wyniku obliczeń otrzymano w przybliżeniu wartość 0,28kWh/km.

Analiza wyników badań

Porównując pojazd do innych pojazdów elektrycznych (tab.1), produkowanych przez duże koncerny pojazd badany plasuje się za dużym sportowym autem – Audi R8 –

oraz niewiele za samochodem dostawczym – Mercedes Vito. Pojazd badany jest pojazdem klasy C, więc jego wynik nie należy do najlepszych, jednak należy wziąć pod uwagę, że pojazd ten został wyposażony w inny rodzaj akumulatorów stanowiący zasobnik energii. Akumulatory pojazdu badanego – kwasowo-ołowiowe – charakteryzują się znacznie mniejszą energią właściwą, bowiem rzędu 30÷50Wh/kg, podczas gdy energia właściwa akumulatorów litowo-jonowych, w które został wyposażony, np. Audi R8 to 84Wh/kg [3].

Tabela 1. Porównanie zasięgów i zużycia energii aut elektrycznych w cyklu NEDC (dot. Europejskich wersji aut) [4]

Model	Zasięg [km]	Pakiet [kWh]	Zużycie energii na 100 km [kWh]	
			śr. NEDC	śr. wg producenta
Ford Focus Electric 2013	162	23	14,2	-
Mercedes-Benz SLS AMG Coupé Electric Drive	250	60	24,0	-
Mercedes-Benz Vito E-Cell	130	36	27,7	-

Nie sposób jednak ukrywać, że powyższe dane zaczerpnięte z serwisu popularno-naukowego nie dają pełnego zaufania, co do ich wartości, bowiem opierają się na danych podanych przez producenta pojazdów. Wśród literatury naukowej można odnaleźć wynik pojazdu o masie 1549kg, zasilanego akumulatorami litowo-jonowymi, o zasięgu 160km – który wyniósł 15kW/100km [5]. Wynik zbliżony jest do średniej wyników pojazdów elektrycznych prezentowanych w tabeli 1, niestety nie zostało sprecyzowane w oparciu o jakie wytyczne został osiągnięty ten wynik. Inny artykuł znaleziony również wśród publikacji zagranicznych przedstawia jednostkowe zużycie energii pojazdu elektrycznego w oparciu o testy obowiązujące na terenie Ameryki Północnej. Przeprowadzone testy miejskie – UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), pozamiejskie – HWFEDS (Highway Fuel Economy Driving Schedule) zwane też – HWFET (Highway Fuel Economy Test) oraz US 06 (Supplemental Federal Test Procedure – SFTP) dały wynik odpowiednio: 137Wh/km, 165Wh/km, 249Wh/km [6]. Pojazd opisywany w tej publikacji charakteryzował się masą 1360kg oraz współczynnikiem oporu powietrza $c_x=0,5$. Wyniki tego pojazdu nie należą do złych, biorąc pod uwagę, że wymienione testy cechują się większą dynamiką i prędkościami średnimi w porównaniu do testów obowiązujących na terenie Unii Europejskiej (tab.2), dodatkowo masa i współczynnik oporów powietrza c_x są dość duże. Potwierdza to znaczenie jakie ma energia właściwa zamontowanych akumulatorów.

Tabela 2. Prędkości średnie testów jednostkowego zużycia energii

Rodzaj testu	Prędkość średnia [km/h]
UDC	18,77 [2]
NEDC	62,6 [2]
UDDS	31,5 [7]
HWFEDS	77,73 [7]
US 06	77,25 [7]

Najbliższym odpowiednikiem pojazdu badanego jest pojazd elektryczny Zilent Courant, na temat którego zostały odnalezione dwie publikacje. Jedna z nich przedstawia jednostkowe zużycie energii w przedziale od 155Wh/km do 223Wh/km [8]. Niestety trudno te wyniki porównywać do wyników zaprezentowanych w punkcie 3. ze względu na charakter badań, które zostały przeprowadzone na drogach ruchu publicznego, a nie na hamowni w ściśle określonych warunkach. Druga z publikacji przedstawia wyniki badań

przeprowadzonych zgodnie z cyklem miejskim (UDC), pomijając niestety tryb pozamiejski i choć jest to uzasadnione zaleceniami normy [2], to jednak znów nie umożliwia jednoznacznego porównania pojazdów. Oprócz powyższego nie jest wskazana dokładna wartość jednostkowego zużycia energii, jednak z przedstawionego w artykule wykresu można odczytać, że wartość osiągnęła niewiele poniżej 0,8Mj/km [9], co w przeliczeniu na kWh/km daje wynik poniżej 0,22kWh/km – a więc niższy niż pojazd badany, opisywany w artykule. Wyższy wynik jednostkowego zużycia energii pojazdu badanego tłumaczy kilka czynników. Jednym z nich jest większa o 230kg masa pojazdu, która ma wpływ na opory toczenia. Kolejnym czynnikiem, który ma znaczący wpływ na wynik badania jest opór aerodynamiczny.

$$(3) \quad F_p = c_x A \rho \frac{v^2}{2}$$

gdzie: A – pole powierzchni czołowej pojazdu; ρ – gęstość powietrza, $\rho=1,2\text{kg/m}^3$; c_x – współczynnik oporu powietrza; v – prędkość względna pojazdu.

Zgodnie ze wzorem można zauważyć, że na opór aerodynamiczny mają 4 czynniki: współczynnik oporu powietrza, powierzchnia czołowa, gęstość powietrza i prędkość. Gęstość powietrza na hamowniach, na których badano pojazdy powinna być ustawiona na tą samą wartość, w związku z czym nie powinna mieć wpływu na różnicę wyników pojazdów. Współczynnik oporu powietrza nie został przedstawiony w artykule porównywanym, ale we współczesnych samochodach są one do siebie zbliżone. Powierzchnia czołowa również nie została przedstawiona w przypadku pojazdu Zilent Courant, jednak faktem jest, że pojazd ten jest mniejszy, a zatem jego powierzchnia czołowa również powinna być mniejsza. Natomiast prędkości, z którymi pojazdy poruszały się podczas testów były różne. Różnica wynika z wyboru różnych przebiegów do przejazdu podczas badań. Pojazd Zilent Courant pokonywał przebieg składający się wyłącznie z cyklu miejskiego, a zatem pojazd badany, klasy C choć nie osiągnął maksymalnej, teoretycznej prędkości zakładanej przez przebieg nr2, to jednak poruszał się z większymi prędkościami. Biorąc pod uwagę, że opór aerodynamiczny rośnie z kwadratem prędkości, pojazd badany (klasy C) miał do pokonania większe opory, a co za tym idzie pobierał więcej energii z zasobnika energii. Ten problem miał znaczący wpływ na gorszy wynik pojazdu badanego.

Czynnikiem, który mógł pozytywnie wpłynąć na wynik badań pojazdu badanego jest zdolność rekuperacji energii, której nie posiadał pojazd porównywany – Zilent Courant. Niestety czynnik ten nie mógł mieć znaczącego wpływu na wynik badań, ponieważ zdolność odzyskiwania energii to tylko ułamek energii, którą należy włożyć w rozpędzenie pojazdu, zaś przebieg nr2 nie zawiera wielu operacji hamowania, a co za tym idzie – możliwości odzyskania znaczącej ilości energii.

Wnioski

Badanie pojazdów wg testów określonych w normach umożliwiła obiektywne ocenienie energochłonności pojazdu. Nieujednoczenie dokumentów na skalę światową utrudnia jednoznaczne porównywanie pojazdów. Wynik badanego pojazdu nie jest wynikiem dobrym w porównaniu do obecnie produkowanych pojazdów komercyjnych ze względu na rodzaj użytych akumulatorów, a dokładnie mówiąc – charakteryzującą je energię właściwą.

LITERATURA

- [1] Popczyk J., Bilans energetyczno-emisyjny samochodów elektrycznych. *Ecomanager*, (2011), Numer 11, 1
- [2] PN-EN 1986-1:2001 Pojazdy drogowe o napędzie elektrycznym – Pomiar sprawności energetycznej, 7, 15, 9, 11,13
- [3] Audi R8 e-tron – Electric Dreams., <http://www.9tro.com>
- [4] Porównania zasięgów i osiągnięć pojazdów elektrycznych. www.samochoध्येlektryczne.org
- [5] Faias S., Sousa J., Xavier L., Ferreira P., Energy Consumption and CO2 Emissions Evaluation for Electric and Internal Combustion Vehicles using a LCA Approach. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*, (2014), Córdoba 7-10 April, 4
- [6] Young K., Wang C., Wang L., Strunz K., Electric Vehicle Battery Technologies, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, (2013),19
- [7] <http://www.epa.gov>
- [8] Moćko W., Ornowski M., Szymańska M., Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny w czasie testów drogowych, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, (2013), Nr 2, 34
- [9] Chłopek Z., Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny. *Archiwum Motoryzacji*, Vol. 57, (2012), No. 3, 113

Autor: mgr inż. Borys Bakun, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, pl. Politechniki 1, 06-601 Warszawa, e-mail:borys.bakun@ee.pw.edu.pl