

Maciej Kozłowski
Wydział Transportu

Krzysztof Tomczuk
Instytut Elektrotechniki
Wydział Transportu (Projekt ECO-MOBILNOŚĆ)

ECO SAMOCHÓD, WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie: Przedstawiono metodykę doboru podstawowych parametrów funkcjonalnych samochodu elektrycznego obejmującą takie elementy postępowania jak: określenie założeń funkcjonalnych, określanie wartości parametrów modelu ruchowego, wybór i określenie parametrów miarodajnych warunków ruchu, wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych na kołach napędu, przejazdu teoretyczne, opracowanie modelu matematycznego i badania symulacyjne. Przedstawioną metodykę zilustrowano przykładowymi wynikami obliczeń, wykonywanych w ramach projektu ECO – Mobilność. Przedstawiono uzyskane wymagane wartości dla: mocy i sił maksymalnych oraz energii zasobnika.

Słowa kluczowe: ECO – Samochód, założenia funkcjonalne, miarodajne warunki ruchu, podstawowe parametry elektryczne, zużycie energii, zasięg jazdy

1. WSTĘP

Prace dotyczące opracowania napędu samochodu elektrycznego są fragmentem pracy ECO Mobilność finansowanej ze środków Unii Europejskiej. Najważniejsze założenia funkcjonalne samochodu koncentrują się na tym, że ma to być samochód miejski cztero osobowy współpracujący z systemem P&R (parkuj i jedź) umożliwiającą wykorzystanie go również przez osoby niepełnosprawne. Funkcje te rzutują na podstawowe parametry pojazdu, które ustalono następująco: prędkość maksymalna 60 km/h, przyspieszenie maksymalne 1.5 m/s^2 , zasięg bez ładowania baterii 100 km, masa nadwozia 500 kg. Przewiduje się wstępnie, że całkowita masa maksymalna brutto samochodu (w warunkach zapelnienia czterema pasażerami i bagażem) przy uwzględnieniu szacunkowej masy napędu (w tym masa akumulatorów 290 kg, silnika, przekształtnika, wałów transmisji i kół napędzanych) wyniesie ok. 1300 kg.

Układ napędowy samochodu elektrycznego obejmuje cztery podstawowe urządzenia napędowe: przekładnię reducyjną (w przypadku zastosowania silnika wysokoobrotowego), silnik elektryczny, przekształtnik energoelektroniczny i akumulator. Ograniczenia warunków pracy każdego z tych urządzeń charakteryzowane są odmiennymi parametrami dopuszczalnymi. Efektem tych ograniczeń są dopuszczalne zakresy siły i prędkości pojazdu na kołach opisujące tzw. dopuszczalne charakterystyki trakcyjne samochodu. Przyjmuje się, że parametry tych charakterystyk takie jak: moc maksymalna, maksymalna siła pociągowa i prędkość maksymalna są podstawowymi parametrami funkcjonalnymi układu napędu pojazdu. Metodyka ich wyznaczania przedstawiona np. w pracy [1] zakłada rozwiązywanie równań modelu matematycznego pojazdu dla określonych warunków ruchu. W przedstawionym referacie przedstawiono wybrane problemy związane z opracowywaniem modelu symulacyjnego do wyznaczania parametrów pojazdu takie np. jak: przedstawienie wybranego modelu obwodowego obwodu głównego samochodu, modelu pojazdu i warunków ruchu. Przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń podstawowych zakładanych parametrów elektrycznych, takich jak: moc (znamionowa ciągła, godzinowa i krótkotrwała: 1.5 min lub 15 s), maksymalna siła pociągowa, współczynnik maksymalnej przeciążalności siły i przewidywane zużycie energii cyklu miejskiego.

2. ZASTOSOWANIE SILNIKA BLDC DO NAPĘDU SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO

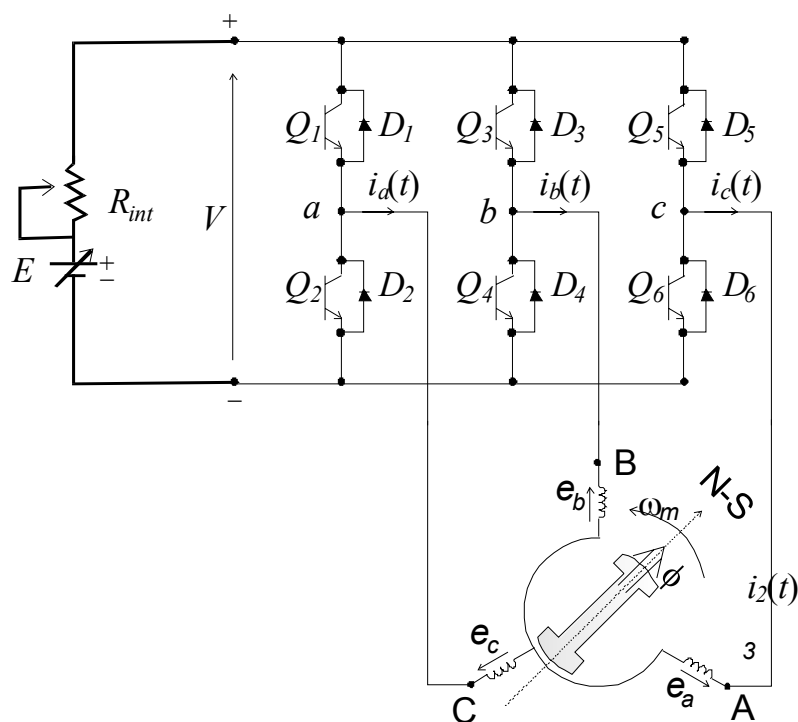
W chwili obecnej, do napędu samochodu elektrycznego najlepiej nadają się silniki: indukcyjne lub z magnesami trwałymi (wśród których można wyróżnić dwa typy ukształtowania nabiegunków: PMSM - ze strumieniem indukcji o rozkładzie sinusoidalnie zmiennym lub BLDC – trapezowym [2]). Jako kryteria oceny rozwiązań układowych (w tym wyboru rodzaju silnika napędowego) powinny być brane pod uwagę takie wskaźniki jakości jak np. bezpieczeństwo ruchu, niezawodność działania, zużycie energii w cyklu jazdy (ze względu na zasięg) lub pulsacja momentu obrotowego (ze względu na komfort jazdy). Wg obecnego stanu wiedzy, rozwiązania układowe z silnikami BLDC charakteryzują się lepszym wykorzystaniem energii niż układy z silnikami indukcyjnymi. Wadą tego typu silników jest brak możliwości oddziaływania na układ w awaryjnych stanach pracy.

Schemat ideowy obwodu elektrycznego samochodu napędzanego silnikiem BLDC trzyfazowym przedstawia rys. 1.

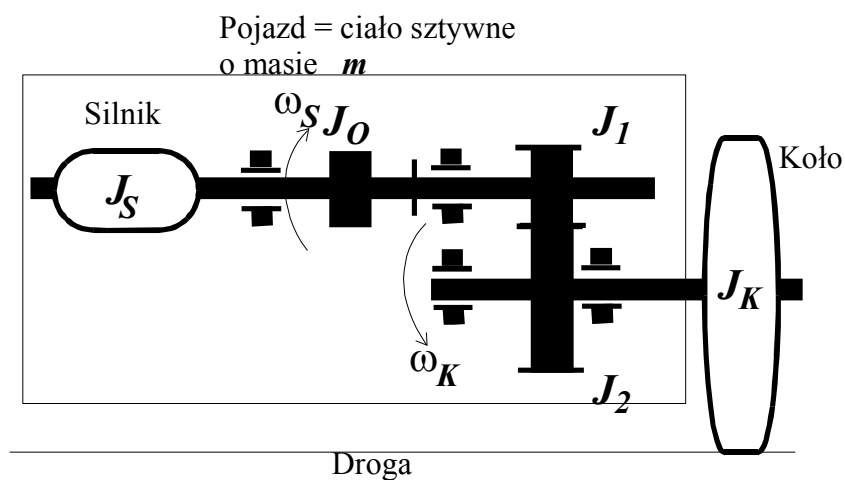
3. MODEL POJAZDU

Przyjęto, że model pojazdu jest bryłą sztywną o masie m . Bardziej skomplikowane modele opisano np. w pracy [3]. Koło napędzane toczy się po drodze bez poślizgu. Przeniesienie momentu trakcyjnego z silnika na koła odbywa się w układzie wałów

sztynnych, zawierających jednostopniową przekładnię redukcyjną. Mechaniczny układ zastępczy napędu przedstawia rys.2. Momenty bezwładności elementów wirujących oznaczono: J_S – silnika, J_0 – wału napędu, J_1 – koła zębatego 1, J_2 – koła zębatego 2, J_K – koła napędzanego z wałem odbiorczym. Prędkości obrotowe oznaczono: ω_S - prędkość obrotowa wału silnika, ω_K - prędkość kątowna koła napędzanego.



Rys.1. Schemat ideowy obwodu elektrycznego samochodu napędzanego silnikiem BLDC



Rys. 2: Mechaniczny układ zastępczy napędu pojazdu

Przy założeniu, że pojazd porusza się na odcinku prostym i płaskim, przyrost energii wydatkowanej z silnika można opisać jako:

$$E_S = E_\Omega + E_V + E_0 \quad (1)$$

gdzie: E_S – energia silnika, E_Ω – energia ruchu obrotowego, E_V – energia ruchu postępowego, E_0 – straty energii układu. Na tej podstawie, równania ruchu obrotowego wału napędu silnika przyjmują postać:

$$\frac{d\omega_S}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_0 - T_m) \quad (2)$$

$$\omega_S = \frac{d\alpha_S}{dt} \quad (3)$$

przy czym:

$$J = J_S + J_0 + J_1 + \frac{J_2 + J_K}{z^2} + \frac{mR^2}{\eta_Z z^2} = \frac{mk_W R^2}{\eta_Z z^2} \quad (4)$$

$$T_m = \frac{R}{\eta_Z z} W \quad (5)$$

gdzie: J – zredukowany moment bezwładności napędu, k_W – współczynnik mas wirujących, R – promień koła napędzanego, T_e – moment obrotowy elektromagnetyczny silnika, T_m – sprowadzony moment obrotowy obciążenia oporów toczenia i aerodynamicznych, T_0 – moment obrotowy strat mechanicznych silnika, W – siła oporów toczenia i aerodynamicznych, z – przełożenie kinematyczne przekładni, α_S – kąt obrotu wału silnika, η_Z – sprawność transmisji momentu obrotowego na zestaw kołowy (praca silnikowa).

Energię wydatkowana z akumulatora można opisać wzorem:

$$E_{AS} = \frac{E_S}{\eta_A \eta_P} = \frac{1}{\eta_A \eta_P} \frac{1}{\eta_S \eta_Z} \int k_S T_e \omega_S dt \quad (7)$$

gdzie: E_{AS} – przyrost energii akumulatora przy pracy silnikowej, k_S – współczynnik funkcyjny o wartościach 1 lub zero ($k_S = 1.0$ dla pracy silnikowej), η_A – sprawność akumulatora, η_P – sprawność przekształtnika, η_S – sprawność silnika.

Przyrost energii hamowania elektrycznego w akumulatorze wyraża wzór:

$$E_{AP} = \eta_A \eta_P E_S = \eta_A \eta_P \eta_S \eta_Z \int k_H T_e \omega_S dt \quad (8)$$

gdzie: E_{AP} – przyrost energii akumulatora przy pracy silnikowej, k_H – współczynnik funkcyjny o wartościach 1 lub zero ($k_H = 1.0$ dla hamowania elektrycznego).

4. WARUNKI RUCHU

Przyjęto, że podstawowe potrzeby użytkownika ECO – samochodu można opisać za pomocą kilku wymagań ruchowych zwanych warunkami miarodajnymi. Do najważniejszych należą:

- 1 – jazda na odcinku prostym i płaskim z prędkością stałą równą zakładanej wartości maksymalnej prędkości jazdy 60 km/h, przy dodatkowej prędkości wiatru czołowego (warunki obciążenia ciągłego),
- 2 – jazda na wzniesieniu 5 % ze stałą prędkością 30 km/h w czasie jednej godziny (obciążenie godzinowe),
- 3 – jazda pojazdu o minimalnej masie zastępczej (kierowca + bagaż) po pochylni garażu indywidualnego o nachyleniu 25 %,
- 4 – przyśpieszenie 1.5 m/s^2 w zakresie prędkości 0 – 25 km/h (czas dojścia do wymaganej prędkości),
- 5 – przyśpieszenie 0.5 m/s^2 przy prędkości 30 km/h,
- 6 – opóźnienie hamowania elektrycznego 1.6 m/s^2 w zakresie prędkości jazdy 20 – 0 km/h,
- 7 – jazda pojazdu o maksymalnej masie zastępczej (kierowca + 4 pasażerów + bagaż) po pochylni garażu wielostanowiskowego nachyleniu 20 %,
- 8 – chwilowe przebiegi prędkości jazdy zgodne z przebiegami Europejskiego Cyklu Miejskiego (ECE)

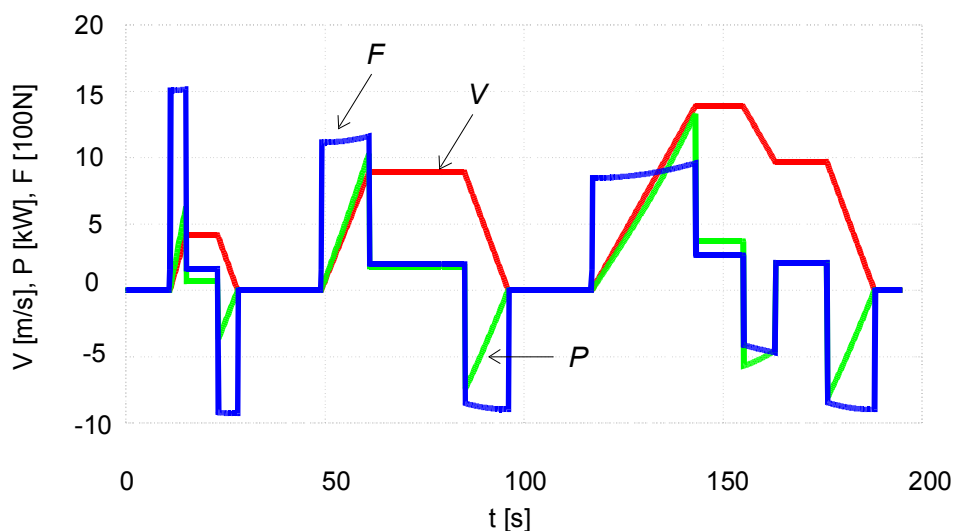
5. PODSTAWOWE WYMAGANE PARAMETRY ELEKTRYCZNE

Rys. 3 przedstawia przebiegi chwilowe prędkości (V), mocy (P) i siły (F) niezbędne do realizacji *Europejskiego Cyklu Jazdy*, wyznaczone z rozwiązań równań (2,3) modelu pojazdu. Przyrosty energii akumulatora obliczone z równań (7,8) wynoszą: $E_{AS} = 0.145 \text{ kWh}$, $E_{AP} = -0.027 \text{ kWh}$. Uwzględniając, że odcinek przebytej w cyklu jazdy drogi wynosi $s = 0.995 \text{ km}$, wskaźniki zużycia energii cyklu przeliczony na odcinek drogi 100 km wynosi $E_{AS}(100 \text{ km}) = 14.8 \text{ kWh}$. Maksymalna wartość energii rekuperacji wynosi w tym przypadku $E_{AP}(100 \text{ km}) = -2.3 \text{ kWh}$.

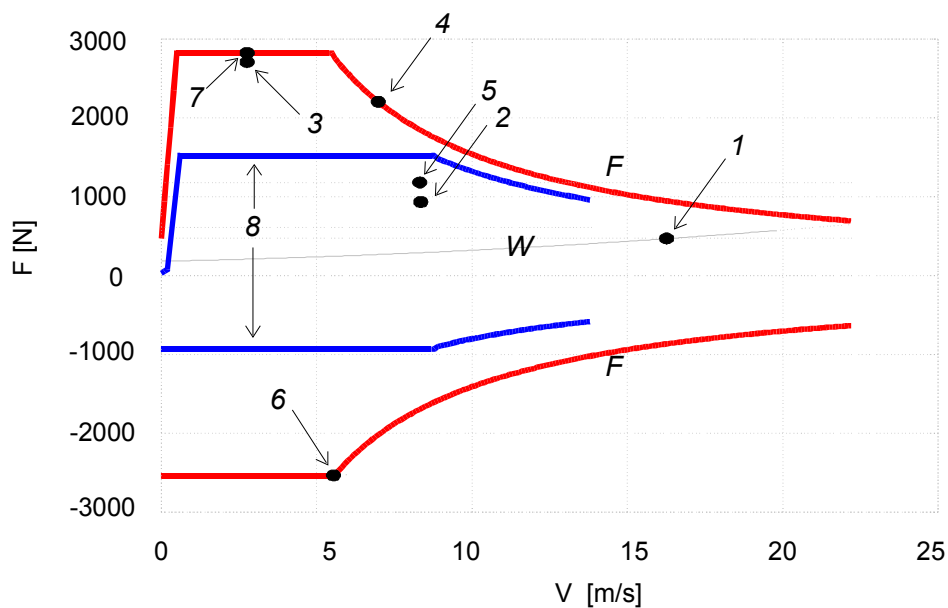
Rys. 4 przedstawia punkty pracy warunków ruchu i charakterystyki trakcyjne samochodu (na kołach) umożliwiające mu osiągnięcie wymaganych miarodajnych warunków ruchu. Oznaczono: F – wymagana charakterystyka trakcyjna, W – funkcja całkowitych oporów ruchu na odcinku prostym i płaskim z uwzględnieniem wiatru czołowego (składających się z oporów ruchu toczenia i aerodynamicznych). Symbolami 1 – 8 oznaczono punkty pracy spełniające warunki ruchu (numer punktu odpowiada liczbie porządkowej warunków ruchu zdefiniowanym powyżej). Wymagane podstawowe parametry elektryczne napędu zestawiono w tabelicy 1.

Analizując rys. 4 i wyniki zestawione w tabelicy 1 łatwo jest zauważyć, że do spełnienia wymaganych warunków ruchu potrzebny jest napęd charakteryzujący się dużą krotnością siły maksymalnej w stosunku do siły minimalnej (wyrażoną współczynnikiem maksymalnej przeciążalności siły $k_T = 5.95 [-]$). W silnikach z magnesami trwałymi przeciążalność siły maksymalnej nie może przekraczać wartości dopuszczalnej (o wartości typowej $k_{T_max} = 4.0 [-]$), powyżej której rozpoczyna się rozmagnesowanie magnesów).

W celu ograniczenia przeciążalności siły w napędzie można stosować zabiegi dostosowawcze, np.: przekładnia mechaniczna dwubiegowa (z przełożeniem dla jazdy normalnej – warunki 1,2,4,5,6 oraz przełożeniem wymagającej niskiej prędkości i dużej siły – warunki 7 i 3), dwa silniki na wale (jeden silnik główny do jazdy po mieście i drugi wspomagający załączany dla jazdy pod górę) lub zastosowanie jednego silnika umożliwiającego rozwinięcie wymaganej siły maksymalnej przy dopuszczalnej przeciążalności k_{T_max} (ten silnik będzie miał znaczną nadwyżkę mocy trakcyjnej, nie wykorzystywaną w jeździe po mieście. Rozwiązanie takie charakteryzuje się niską sprawnością maszyny, negatywnie wpływającą na zasięg pojazdu).



Rys.3. Przebiegi chwilowe prędkości (V), mocy (P) i siły (F) niezbędne do realizacji Europejskiego Cyklu Jazdy



Rys. 4. Punkty pracy warunków ruchu i charakterystyki trakcyjne

Tablica 1.

Wymagane podstawowe elektryczne parametry napędu

WARUNEK	1	2	3	4	5	6	7	8
Obciążenie	trwale	1 h	1.5 min	15 s	15 s	15 s	1.5 min	CYKL
Moc [kW]	7.88	9.82	7.82	15.3	7.8	-14.0	7.6	13.3
Prędkość [m/s]	16.67	8.33	2.78	6.94	8.33	5.55	2.78	13.9
Siła [kN]	0.47	1.17	2.81	2.21	0.93	-2.53	2.53	1.52
Siła maks [kN]	2.81							
Prędkość maks [m/s]	16.67							
Moc maks [kW]	15.3							
Siła minimalna [kN]	0.47							
Współczynnik maks. przeciążalności siły [-]	5.95							
Energia potrzebna do przebycia 100 km w cyklu miejskim [kWh]	15							

5. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Na bieżącym etapie pracy koncepcja napędu elektrycznego nie jest jeszcze ostatecznie przesądzona. Konieczne są dalsze badania symulacyjne dotyczące zastosowań napędowych różnych rodzajów maszyn elektrycznych: silnika indukcyjnego lub silników z magnesami trwałymi (PMSM - ze strumieniem indukcji o rozkładzie sinusoidalnie

zmiennym lub BLDC – trapezowym). Jako kryteria oceny rozwiązań powinny być brane pod uwagę takie wskaźniki jakości jak np. bezpieczeństwo ruchu, niezawodność działania, zużycie energii w cyklu jazdy (ze względu na zasięg) lub pulsacja momentu obrotowego (ze względu na komfort jazdy). Na Wydziale Transportu planuje się wykonanie badań symulacyjnych napędu wykorzystującego silnik BLDC z uzwojeniami trójfazowymi. Badania symulacyjne napędów z pozostałymi rodzajami silników planuje się wykonać na Wydziale Elektrycznym PW (w Instytucie Maszyn Elektrycznych i w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej).

Praca finansowana z projektu ECO – Mobilność: WND-POIG.01.03.01-14-154/09

This Paper is financed by ECO – Mobilność projekt: WND-POIG.01.03.01-14-154/09

Bibliografia

1. Kozłowski M., Badania podstawowych parametrów technicznych układu napędowego pojazdu z silnikami prądu przemiennego, Prace Naukowe Transport z 54, OFPW Warszawa 2004
2. Glinka T.: Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002
3. Prochowski L.: Mechanika ruchu. Pojazdy samochodowe. WKiŁ, Warszawa 2005.

ECO CAR, DETERMINATION OF BASIC ELECTRICAL PARAMETERS

Abstract: The article presents methodology of selection process of basic functional parameters of an electric motor vehicle. This methodology encompasses such elements of procedure as determination of functional assumptions, determination of values of parameters of a motion model, selection and determination of parameters of reliable traffic conditions, defining traction characterizations on drive wheels, theoretical runs, drawing up a mathematical model and simulation researches. The presented methodology has been illustrated with sample calculation results performed within the framework of the project ECO – Mobility. The required values obtained for maximum power and forces as well as for accumulator energy have been presented.

Keywords: ECO – motor vehicle, functional assumptions, reliable traffic conditions, basic electric parameters, energy consumption, driving range