

Eugeniusz KAŁUŻA
Aleksander UBYSZ

GRANICZNE PARAMETRY TRAKCYJNE POJAZDÓW AKUMULATROWYCH

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono wpływ parametrów konstrukcyjnych pojazdu, oporów ruchu oraz parametrów energetycznych baterii akumulatorowej na wartości graniczne promienia dojazdu i prędkości maksymalnej drogowego pojazdu akumulatorowego.

LIMIT TRACTION PARAMETRES FOR BATTERY POWERED VEHICLES

Summary. The report presents the influence of vehicle design parameters, motion resistance and battery energy characteristics on limit values of maximum velocity and access radius of road battery-powered vehicle.

1. WPROWADZENIE

W obecnej dobie pojazdy napędzane silnikami elektrycznymi zasilanymi poprzez przekształtnik z baterii akumulatorowej, czyli pojazdy akumulatorowe nie stanowią konkurencji dla pojazdów spalinowych. Pojazdy akumulatorowe charakteryzują się także w porównaniu z pojazdami spalinowymi gorszymi parametrami trakcyjnymi, a mianowicie:

- mniejszym promieniem dojazdu,
- mniejszą prędkością maksymalną i mniejszymi przyspieszeniami w zakresie wyższych prędkości.

Koszty eksploatacji pojazdów akumulatorowych, uwzględniające odpisy amortyzacyjne, znacznie przekraczają koszty eksploatacji porównywalnych pojazdów spalinowych. O poziomie kosztów stanowi w pierwszej kolejności wysoka cena zakupu baterii akumulatorowej oraz konieczność wymiany zużytej baterii w odstępach czasu nie przekraczających kilku lat. Na poziom tych kosztów wpływa także wysoka cena przekształtnika oraz silnika, który w

pojazdach drogowych powinien charakteryzować się szczególnie wysoką mocą jednostkową odniesioną do jego masy i wysoką sprawnością. Pomimo tych wad pojazdy akumulatorowe są niezastąpione w podziemiach kopalń zagrożonych wybuchem, w halach fabrycznych i magazynach, a także na terenach specjalnie chronionych przed zanieczyszczeniami spalinami samochodowymi. Na tych terenach ogranicza się ruch samochodami spalinowymi wprowadzając w ich miejsce pojazdy napędzane silnikami elektrycznymi.

Prezentowana w artykule analiza parametrów trakcyjnych pojazdów akumulatorowych ograniczona została do pojazdów drogowych małej i średniej wielkości.

2. PARAMETRY TRAKCYJNE POJAZDÓW AKUMULATOROWYCH

Parametry trakcyjne pojazdów akumulatorowych zależą zarówno od parametrów energetycznych baterii akumulatorowych, jak i od rodzaju pojazdu (drogowy lub szynowy), od jego masy i kształtu oraz od rozwiązania układu napędowego.

Podstawowymi parametrami trakcyjnymi pojazdów akumulatorowych są:

- masa całkowita i masa użyteczna pojazdu,
- promień dojazdu,
- prędkość maksymalna.

Promień dojazdu określa drogę, jaką może przebyć pojazd z naładowaną baterią akumulatorową, przy jeździe ze stałą prędkością, na trasie prostej i poziomej, obciążony ładunkiem o znamionowej masie użytecznej, do całkowitego wyładowania baterii.

Prędkość maksymalna ograniczona jest dopuszczalną mocą wyładowania baterii akumulatorowej.

a) Promień dojazdu

Promień dojazdu pojazdu akumulatorowego można obliczyć ze wzoru:

$$L = \frac{A_w \cdot \eta_M}{m_c \cdot j}, \quad (1)$$

gdzie:

A_w - energia elektryczna, jaką można pobrać z baterii akumulatorowej całkowicie naładowanej (energia wyładowania),

m_c - masa całkowita pojazdu obciążonego,

j - jednostkowe zużycie energii elektrycznej,

$\eta_M = \eta_M \cdot \eta_{prz} \cdot \eta_{pe}$ - łączna sprawność silnika napędowego η_M , układu przeniesienia napędu η_{prz} i przekształtnika η_{pe} włączonego w obwód zasilania silnika.

Energia wyładowania baterii akumulatorowej jest równa:

$$A_w = U_{wsr} \cdot I_w \cdot t_w = U_{wsr} \cdot Q_w = m_z \cdot q_{en} = m_c \cdot \beta \cdot q_{en}, \quad (2)$$

gdzie:

U_{wsr} - napięcie średnie wyładowania baterii odpowiadające określonemu prądowi wyładowania I_w i czasowi wyładowania t_w ,

Q_w - pojemność akumulatora, czyli ładunek elektryczny, który może być pobrany z naładowanego akumulatora w określonych warunkach wyładowania,

q_{en} - jednostkowa pojemność energetyczna baterii akumulatorowej, czyli wskaźnik energetyczny stanowiący stosunek energii baterii do jej masy,

β - stosunek masy baterii do masy całkowitej pojazdu.

Podstawiając (2) do (1) otrzymamy:

$$L = \frac{\beta \cdot q_{en} \cdot \eta_M}{j} \quad (3)$$

Wobec tego, że analiza parametrów trakcyjnych dotyczy małych i średnich pojazdów drogowych o masie całkowitej od stukilkdziesięciu kg do 2000 kg (od rowerów z napędem elektrycznym do samochodów osobowych i dostawczych), jednostkowe zużycie energii obliczono w [Wh/(kg · km)].

Dla jazdy ze stałą prędkością po jeździe prostej i poziomej, bez uwzględnienia strat energii związanych z rozruchem i hamowaniem, wartość liczbowa jednostkowego zużycia energii j wyrażona w [J/(kg m)] równa jest jednostkowym zasadniczym oporom ruchu w_0 obliczonym w [N/kg].

Wprowadzając zamiast dźwuli watogodziny otrzymano:

$$j = 0,278 \cdot w_o \left[\frac{Wh}{kg \cdot km} \right], \quad (4)$$

gdzie: w_o - jednostkowe zasadnicze opory ruchu w [N/kg],

Dla pojazdów drogowych jednostkowe zasadnicze opory ruchu w_o obejmujące opory toczenia i opory powietrza obliczono ze wzorów;

$$w_o = W_o / m_c = g \cdot f_t + f_x \cdot v^2 \left[\frac{N}{kg} \right], \quad (5)$$

$$f_x = \frac{0,047 F \cdot c_x}{m_c}, \quad (6)$$

gdzie:

W_o - zasadnicze opory ruchu pojazdu w N,

m_c - masa całkowita pojazdu w kg,

g - przyspieszenie ziemskie, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,

f_t - współczynnik oporów toczenia,

F - powierzchnia czołowa pojazdu w m^2 ,

v - prędkość pojazdu w km/h,

c_x - współczynnik oporów powietrza.

Maksymalna masa zasobnika energii m_z baterii akumulatorowej możliwej do zabudowania w samochodzie akumulatorowym w wyniku przebudowy seryjnie produkowanego samochodu z napędem spalinowym wyniesie:

$$m_z = m_u - m_u^i + (m_{ns} - m_{ne}), \quad (7)$$

gdzie:

m_u - obciążenie użyteczne samochodu spalinowego,

m_u^i - założona wartość obciążenia użytecznego samochodu akumulatorowego,

m_{ns} - masa układu napędowego samochodu spalinowego,

m_{ne} - masa układu napędowego samochodu akumulatorowego.

Zależność obciążenia użytecznego (masy użytecznej) od masy całkowitej określonej klasy pojazdów spalinowych można opisać za pomocą równania regresji:

$$m_u = k_u \cdot m_c + m_d, \quad (8)$$

gdzie współczynnik regresji k_u i stałą m_d szacuje się metodą najmniejszych kwadratów dla danych z próby określonej klasy pojazdów spalinowych.

Podstawiając (8) do (7) otrzymamy:

$$m_z = k_u \cdot m_c + \Delta m, \quad (9)$$

$$\Delta m = m_d - m'_u + (m_{ns} - m_{ms}). \quad (10)$$

Stosunek masy m_z baterii do masy całkowitej pojazdu m_c można więc obliczyć z równania:

$$\beta = \frac{m_z}{m_c} = k_u + \frac{\Delta m}{m_c}, \quad (11)$$

Wykorzystując równania (3), (5), (6) i (11) otrzymano zmodyfikowaną postać wzoru na obliczenie promienia dojazdu pojazdu akumulatorowego.

$$L = 3,6 \frac{(k_u + \Delta m/m_c) \cdot q_{en} \cdot \eta_M}{(g \cdot f_t + f_x \cdot v^2)} \text{ [km]}, \quad (12)$$

gdzie:

k_u - współczynnik z równania (8),

Δm - przyrost masy określony równaniem (10),

q_{en} - jednostkowa pojemność energetyczna baterii w Wh/kg,

η_M - sprawność układu napędowego,

f_t - współczynnik oporów toczenia,

f_x - współczynnik z równania (6).

b) Prędkość maksymalna

Prędkość maksymalną pojazdu akumulatorowego można obliczyć ze wzoru:

$$v_{\max} = 3,6 \frac{P_{w\max} \cdot \eta_M}{W_o}, \quad (13)$$

gdzie:

P_{wmax} - maksymalna moc wyładowania baterii akumulatorowej,

W_o - zasadnicze opory ruchu, czyli suma oporów toczenia i oporów powietrza

$$(W_o = F_t + F_p).$$

Wprowadzając w miejsce mocy wyładowania jej jednostkową wartość odniesioną do masy baterii :

$$P_{wmax} = p_{wmax} \cdot m_z = p_{wmax} \cdot \beta \cdot m_c \quad (14)$$

oraz podstawiając równanie (5) do (13) otrzymamy:

$$v_{max} = 3,6 \frac{\beta \cdot P_{wmax} \cdot \eta_{M'}}{g \cdot f_t + f_x \cdot v_{max}^2} \quad (15)$$

3. GRANICZNE PARAMETRY TRAKCYJNE POJAZDÓW AKUMULATOROWYCH

Zgodnie z wyprowadzonym równaniem (12) promień dojazdu pojazdu akumulatorowego jest proporcjonalny do:

- stosunku masy baterii do masy całkowitej pojazdu ($\beta = k_u + \Delta m/m_c$),
- jednostkowej pojemności energetycznej baterii akumulatorowej (q_{en}),
- sprawności układu napędowego ($\eta_{M'}$)

a odwrotnie proporcjonalnej do jednostkowych zasadniczych oporów jazdy

$$(w_o = g \cdot f_t + f_x \cdot v^2).$$

ad a) Stosunek masy baterii akumulatorowej do całkowitej masy pojazdu β wyznaczono:

-na podstawie współczynnika regresji k_u i stałej m_d (8) obliczonych metodą najmniejszych kwadratów z próby 86 różnych marek i odmian samochodów osobowych o masie całkowitej mieszczącej się w przedziale od 900 do 2000 kg [3]

$$k_u = 0,174 ; m_d = 200\text{kg (samochody osobowe) i}$$

-37 różnych marek i odmian samochodów dostawczych o całkowitej masie mieszczącej się w przedziale od 1300 do 3500 kg [3]

$k_u = 0,497$; $m_d = - 208\text{kg}$ (samochody dostawcze),

- na podstawie oszacowanej możliwości ograniczenia masy użytecznej samochodu do wartości $m_u^+ < m_u$ (7), (10),

- na podstawie oszacowanej różnicy mas układów napędowych (spalinowego i elektrycznego).

Dla samochodów elektrycznych projektowanych i budowanych od podstaw współczynnik β osiąga wartości od 0,24 do 0,34 [4].

ad b) Jednostkowa pojemność energetyczna akumulatorów q_{en} zależy w pierwszej kolejności od jego układu elektrochemicznego, temperatury i prądu wyładowania. Prąd wyładowania wiąże się jednoznacznie z czasem wyładowania oraz jednostkową mocą wyładowania [1]. Przykładowe wartości jednostkowej pojemności energetycznej q_{en} i odpowiadające im jednostkowe moce wyładowania $p_{w\acute{s}r}$ zestawiono w tabeli 1.

Dla ograniczonego zakresu zmian jednostki pojemności energetycznej odniesionych do czasów wyładowania od 5h do 1h wykres gęstości energii od jednostkowej mocy wyładowania można aproksymować prostą opisaną równaniem:

$$q_{en} = q_0 - c_{en} p_{w\acute{s}r}. \quad (16)$$

Tabela 1

Producent, typ i masa akumulatora	Q_5, U_n m_{ak}	$t_w, (I_w)$ [godz]	$p_{w\acute{s}r}$ [W/kg]	q_{en} [Wh/kg]
SAFt-Francja STM5.100 (Ni-Cd)	140Ah;	5 (0,02C ₅)	9,92	49,6
	6V	0,936 (1C ₅)	43,8	41,0
	17,5kg	0,22 (3C ₅)	96,0	21,5
Baren-Austria 9PzF	162Ah	5	4,97	24,8
	6V	1	13,34	21,8
	38kg	0,5	28,4	14,2
ABB B11 (NaS) temper.pracy ok 350°	280Ah	5	17,6	88,2
	90V	2	39,8	79,7
	276kg	(I _{max})	ok.100	-

Współczynniki równania (16) wyznaczone dla akumulatora STM 5.100 wynoszą:

$$q_0 = 52,1 \text{ Wh/kg}, c_{en} = 0,254\text{h}$$

ad c) Sprawność układu napędowego η_M zależy od rodzaju silnika elektrycznego (silniki prądu stałego szeregowo, silniki wzbudzone magnesami trwałymi i silniki indukcyjne) jego mocy znamionowej, sposobu chłodzenia, stopnia obciążenia, od rozwiązania układu przeniesienia napędu oraz od rozwiązania i rodzaju przekształtnika. Moce znamionowe silników napędowych samochodów elektrycznych mieszczą się w przedziale od kilku do dwudziestukilku kW, a sprawności ich mieszczą się w granicach od 80 do 93%. Sprawność układu przeniesienia napędu w rozwiązaniu klasycznym (skrzynka biegów, wał napędowy, przekładnia główna) wynosi około 90%, a w najnowszych rozwiązaniach z silnikiem zabudowanym wraz z przekładnią planetarną w kołach wynosi 95%. Natomiast sprawność przekształtnika energoelektronicznego mieści się w granicach od 92 do 96%, w zależności od mocy przenoszonej, zastosowanych zaworów sterowanych i rozwiązania układu przekształtnika.

Graniczną wartość promienia dojazdu dla założonej prędkości jazdy z mocą wynikającą z oporów ruchu (13) wiąże się zastosowaniem baterii o dopuszczalnej masie (11) i jednostkowej pojemności energetycznej określonej z równania (16). Natomiast graniczna wartość prędkości maksymalnej wiąże się z zastosowaniem baterii o dopuszczalnej masie (11) oraz z wykorzystaniem dopuszczalnej jednostkowej mocy wyładowania baterii odpowiadającej założonemu czasowi jej użytkowania, ograniczonemu z jednej strony warunkami termicznymi pracy elementów baterii a z drugiej strony niezbędnemu czasowi na rozwinięcie prędkości maksymalnej.

4. PRZYKŁAD OBLICZENIA GRANICZNEJ WARTOŚCI PROMIENIA DOJAZDU SAMOCHODU AKUMULATOROWEGO

Rodzaj samochodu: osobowy (przebudowany samochód z klasycznym napędem spalinywym). Dane samochodu: $m_c = 1500\text{kg}$; $F = 1,8\text{m}^2$; $c_x = 0,55$; $f_t = 0,0125$; $m_u = 200\text{kg}$; $(m_{ns} - m_{ne}) = 50\text{kg}$; $f_x = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{h}^2/(\text{kg} \cdot \text{km}^2)$; $\eta_M = 0,77$; $k_u = 0,174$; $m_d = 200\text{kg}$; $m_u = 461\text{kg}$; $\Delta m = 50\text{kg}$; $m_z = 311\text{kg}$; $\beta = 0,207$.

Dla $V = 60\text{km/h}$; $w_0 = 0,234 \text{ N/kg}$. Z równania (15): $p_w = v \cdot w_0/3,6 \cdot \beta \cdot \eta_M = 18,5\text{W/kg}$. Obliczonej mocy jednostkowej p_w odpowiada $q_{en} = 52,1 - 0,254 \cdot 18,5 = 47,4\text{Wh/kg}$.

Graniczna wartość promienia dojazdu $L_{gr} = 3,6 \cdot \beta \cdot q_{en} \cdot \eta_M / w_o = 154 \text{ km}$.

Dla baterii zestawionej z akumulatorów 9PzF162 : $q_{en} \cong 18 \text{ Wh/kg}$; $L_{gr} = 58 \text{ km}$.

Natomiast dla akumulatora B11 o masie 276kg, $\beta = 276/1500 = 0,184$; $q_{en} = 88,2 \text{ Wh/kg}$

$L = 3,6 \cdot 0,184 \cdot 88,2 \cdot 0,77 / 0,234 = 192 \text{ km}$.

LITERATURA

1. Kałuża E.: Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej. Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej nr. 1848 Gliwice 1994.
2. Kałuża E.: Aspekty techniczno-ekonomiczne doboru baterii akumulatorowych dla pojazdów elektrycznych. Sesje Katedry Techniczne Elektrotechniki FEI VSB-TU Ostrava, listopad 1996
3. Stępień A.: Analiza i projekt założeniowy układu napędowego samochodu elektrycznego. Praca magisterska napisana pod kierunkiem dra hab.inż E.Kałuży, Gliwice 1995
4. Chyla R.: Analiza i projekt samochodu dostawczego o napędzie elektrycznym. Praca magisterska napisana pod kierunkiem dra hab.inż E.Kałuży, Gliwice 1996
5. Brinbreier H.: A new generation of ABB high - energy batteries for electric vehicles. ABB Review, nr 10, 1992

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Tadeusz Glinka

Wpłynęło do Redakcji: 03.02.1997 r.

Abstract

The basic traction parameters of battery-powered vehicles are access radius and maximum velocity. The paper shows how the following factors: total and maximum mass of battery, motion resistance and energy characteristics of a battery (such as the specific energy and un-load power p.u.) influence the limit traction parameters of a vehicle.