

Janusz Biliński, Maciej Błażejowski, Marta Malczewska, Marta Szczepiórkowska

Opory ruchu pociągów metra (5)

W artykule przedstawiono zależności empiryczne, opisujące opory ruchu dla wagonów metra. Przedstawiono szereg wzorów, opartych na równaniu Davisa, opisujących opory ruchu pojazdu jako kwadratową funkcję prędkości jazdy. Większość zależności związana jest z masą lub obciążeniem osi pojazdu oraz z oporem aerodynamicznym w czasie ruchu pojazdu. Artykuł stanowi próbę usystematyzowania istniejących zależności, opracowanych przez wielu autorów, które zostały przedstawione w literaturze przedmiotu. Takie zestawienie jest pomocne w inżynierskich obliczeniach szacunkowego zużycia energii, wykorzystywanych zarówno w fazie projektowej pojazdu, jak i w procesie oceny zużycia energii na cele trakcyjne. W artykule omówiono oszacowanie dokładności obliczeń teoretycznych sił oporów ruchu ze wskazaniem na konieczność weryfikacji wyników symulacji z wynikami uzyskanymi w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Słowa kluczowe: opory ruchu, tabor szynowy, metro.

Metro jest jednym z najpopularniejszych środków komunikacji miejskiej na świecie. Chociaż jego definicja nie jest ściśle określona, istnieje kilka cech, które go charakteryzują.

Dzięki całkowitej niezależności względem innych środków komunikacji oraz brakiem skrzyżowań jednopoziomowych, możliwe jest wykonywanie przejazdów z dużą prędkością oraz częstotliwością, co czyni z metra najbardziej efektywny, ale też wymagający największych nakładów finansowych środek transportu.

Historia metra sięga roku 1863, kiedy w Londynie otwarto linię podziemną obsługiwaną przez lokomotywy parowe oraz roku 1890, w którym pojawiły się w Londynie składy metra z napędem elektrycznym.

Ze względu na zróżnicowane warunki eksploatacji: składy poruszające się zarówno w tunelach podziemnych jak i naziemnych estakadach oraz na odmienne cechy konstrukcyjne np. zastosowanie kół gumowych, istnieje szereg wzorów opisujących opory ruchu składów metra.

Przedstawione wzory opierają się na zależności Davisa ze specyficznymi współczynnikami, właściwymi dla danego typu składu z uwzględnieniem warunków eksploatacyjnych.

$$F_{res} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad (1)$$

gdzie:

F_{res} – wartość siły oporów ruchu [kN],

v – prędkość pojazdu [km/h],

A – współczynnik charakterystyczny, niezależny od prędkości [kN],
 B – współczynnik charakterystyczny, proporcjonalny do prędkości [kN/(km/h)],
 C – współczynnik charakterystyczny oporu aerodynamicznego [kN/(km/h)²].

♦ Opory ruchu pociągów metra [3]:

– dla siły pociągowej $F_p \leq 0$ (hamowanie):

$$F_{res} = \left(1,1 \cdot m_{poc} + \frac{0,033 \cdot S_{czol} \cdot v^2}{n_{wag}} \right) \cdot g \quad (2)$$

– dla siły pociągowej $F_p \leq 0$ (hamowanie):

$$F_{res} = \left(52 + 1,09 \cdot m_{poc} + \frac{0,033 \cdot S_{czol} \cdot v^2}{n_{wag}} \right) \cdot g \quad (3)$$

gdzie dla wzorów 2–3

F_{res} – względna wartość siły oporów ruchu [N],

n_{wag} – liczba wagonów [-],

m_{poc} – masa pociągu metra [t],

S_{czol} – powierzchnia przekroju czołowego [m²],

v – prędkość jazdy [m/s],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

♦ Opory ruchu pociągów metra NS-74 produkcji Alstom dla Santiago de Chile, na kołach gumowych [6]:

$$F_{res} = 0,0116 \cdot \frac{m_{poc} \cdot g}{10} + 0,2 \cdot v^2 \quad (4)$$

gdzie:

F_{res} – wartość siły oporów ruchu [daN],

m_{poc} – masa pociągu [kg],

v – prędkość jazdy [km/h],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

♦ Opory ruchu metra w Lyonie na kołach gumowych [6]:

$$F_{res} = 0,1 \cdot m_{poc} + 0,015573 \cdot v + 0,0002942 \cdot v^2 \quad (5)$$

gdzie:

F_{res} – wartość siły oporów ruchu [kN],

m_{poc} – masa zespołu trakcyjnego [t],

v – prędkość jazdy [km/h],

♦ Opory ruchu kolei jednoszynowej Monorail Saõ Paulo, Brazylia [7]:

$$F_{res} = A \cdot m_{poc} \cdot g + 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S_{czol} \cdot v^2 \quad (6)$$

gdzie:

F_{res} – wartość siły oporów ruchu [kN],

A – współczynnik oporu tocznego [-], $A = 0,007451$,

m_{poc} – masa pociągu [t],

ρ – gęstość powietrza [kg/m³], przyjmuje się $\rho = 1,2$ kg/m³,

v – prędkość jazdy pociągu [m/s],

C_x – współczynnik aerodynamiczny [-], $C_x = 0,8$,

S_{czol} – pole powierzchni czołowej [m²], $S_{czol} = 8,9$ m²,

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

♦ Opory ruchu dla pociągów metra typu Metropolis [5]:

$$F_{res} = 6,4 \cdot m_{poc} + 130 \cdot n_{osi} + 0,14 \cdot v + [0,046 + 0,0065 \cdot (n_{wag} - 1)] \cdot S_{czol} \cdot v^2 \quad (7)$$

gdzie:

F_{res} – wartość oporów ruchu [N],

m_{poc} – masa pociągu [t],

n_{osi} – liczba osi [-],

n_{wag} – liczba wagonów [-],

S_{czol} – pole powierzchni czoła pociągu metra [m²],

v – prędkość jazdy [m/s],

- ♦ **Opory ruchu dla rosyjskich pociągów metra poruszających się w tunelach [4]:**

$$F_{res} = 2,5 \cdot m_{poc} \cdot g + (53,61 + 13,4 \cdot n_{wag})v^{3/2} \quad (8)$$

gdzie:

F_{res} – wartość siły oporów ruchu [kN],
 m_{poc} – masa pociągu metra [t],
 n_{wag} – liczba wagonów [-],
 v – prędkość jazdy [m/s],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

- ♦ **Opory ruchu dla metra na podstawie [8]:**

$$f_{res} = A + B \cdot \frac{v}{100} + C \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (9)$$

gdzie:

f_{res} – względna wartość całkowitej siły oporów ruchu [kN/N],
 A – stała podstawowej siły oporów ruchu [kN/N]:
 - dla pojazdu o 3 wagonach $A = 2,75$,
 - dla pojazdu o 8 wagonach $A = 2,60$,
 B – stała oporów ruchu [kN/N]:
 - dla pojazdu o 3 i o 8 wagonach $B = 4,20$,
 C – wartość współczynnika oporów powietrza [kN/N]:
 - dla pociągu o 3 wagonach $C = 9,20$,
 - dla pociągu o 8 wagonach $C = 2,90$,
 v – prędkość pociągu [km/h].

- ♦ **Opory ruchu dla metra wg Alstom [2]:**

$$F_{res} = 30 \cdot m_{poc} + 0,3384 \cdot (v + 10)^2 \quad (10)$$

gdzie:

F_{res} – wartość całkowitej siły oporów ruchu [N],
 m_{poc} – masa pociągu metra (bez dodatku na masy wirujące) [t],
 v – prędkość pociągu [km/h].

- ♦ **Opory ruchu dla metra wg Alstom, druga postać [2]:**

$$f_{res} = \begin{cases} 3 \text{ (const) dla } v = 0 \dots 40 \frac{\text{km}}{\text{h}} \\ \frac{3}{40} \cdot v \text{ dla } v = 40 \dots 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \end{cases} \quad (11)$$

gdzie:

f_{res} – względna wartość całkowitej siły oporów ruchu [N/kN],
 v – prędkość pociągu [km/h].

- ♦ **Dodatkowe opory powietrza w tunelach i wykopach [3, 8]:**

$$F_{res\ dod} = \frac{0,0064 \cdot l_{tun}}{S_{poc} - 1} \cdot v^2 \quad (12)$$

gdzie:

$F_{res\ dod}$ – dodatkowa siła oporu ruchu [N],
 l_{tun} – odległość czoła pociągu od wylotu lub poszerzenia tunelu [m],
 S_{tun}, S_{poc} – pole przekroju poprzecznego, odpowiednio tunelu i pociągu [m²],
 v – prędkość pociągu [m/s].

W praktyce wzór można stosować dla tuneli, których długość nie przekracza 2000 m. Może być także wykorzystany na potrzeby metra, w którym tunele można traktować jako krótkie, a stacje metra jako poszerzenia – przy założeniu, że opory te nie zostały uwzględnione we wzorach na opory zasadnicze.

Podsumowanie

Do wyznaczenia wartości współczynników we wzorach na opory ruchu zazwyczaj stosuje się dwie metody: metodę Sauthoffa, polegającą na bezpośrednim pomiarze siły pociągowej lub pchającej przy zadanej i ustalonej prędkości jazdy oraz metodę „wybiegu”, gdzie na podstawie zarejestrowanych parametrów bezwładnego ruchu pojazdu od prędkości maksymalnej aż do zatrzymania wyznacza się wartości odpowiednich współczynników. Pierwszą metodę stosuje się do badania oporów ruchu zarówno wagonów, jak i samych lokomotyw. Drugą z nich, do badania oporów ruchu zespołów trakcyjnych, zwłaszcza składów dużych prędkości. W metodzie pierwszej korzysta się z dodatkowej lokomotywy oraz wagonu dynamometrycznego. W metodzie drugiej zespół trakcyjny rozpędza się do prędkości maksymalnej za pomocą napędu własnego [1]. Dla zminimalizowania wpływu infrastruktury i otoczenia, pomiary są wielokrotnie powtarzane dla obu kierunków jazdy po tym samym poziomym, prostym i suchym torze. Minimalizowanie oporów ruchu zespołów trakcyjnych ma szczególne znaczenie w procesie zmniejszenia ich zużycia energii. Związane jest to z zagadnieniem zmniejszenia masy zespołów trakcyjnych oraz udoskonaleniem parametrów wózków napędowych i tocznych mających na celu obniżenie oporów tocznych pociągów.

Bibliografia:

1. Bergiel K.: Podstawy trakcji elektrycznej (wykłady). Zespół Trakcji Elektrycznej, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka, 2006.
2. Iwnicki S. (red.): Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
3. Kacprzak J. Teoria trakcji elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
4. Karwowski K. (red.) Energetyka transportu zelektryfikowanego. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2018.
5. Karwowski K. (red.). Trakcja elektryczna. Zbiór zadań problemowych z rozwiązaniami. Zakład Trakcji Elektrycznej, Politechnika Gdańska, 2006.
6. Licitación Pública Internacional Modernización de los Trenes NS-74 del Metro de Santiago. Volumen 2. Especificaciones Técnicas Proyecto de Modernización de Trenes NS-74. Santiago de Chile, Enero de 2013.
7. Scomi. Line 17 Monorail Project. São Paulo, Brasil, 2011.
8. Wende D. Fahrdynamik des Schienenverkehrs. B.G. Teubner. Wiesbaden 2003.

Autorzy:

dr inż. **Janusz Biliński**, inż. **Maciej Błazejewski**,
 mgr inż. **Marta Malczewska**, mgr inż. **Marta Szczepiórkowska** – MEDCOM Sp. z o.o.

Drag resistance of metro trains – empirical equations

The article presents empirical formulae, describing the drag resistance of various types of metro trains. It is presented a number of formulas, based on Davis equation, describing the train's resistance to motion as a square function of driving speed. Most of the equations are related to the mass or axle load of the vehicle and to the aerodynamic resistance during the movement of the vehicle. The article is an attempt to systematize the existing mathematical descriptions of drag resistance, which are presented in the several publications on the subject and were developed by many authors.

Keywords: drag resistance, rolling stock, metro.