

Janusz Biliński, Maciej Błazejewski, Marta Malczewska, Marta Szczepiórkowska

Opory ruchu tramwajów (6)

W artykule przedstawiono zależności empiryczne, opisujące opory ruchu tramwajów. Zaprezentowano szereg wzorów, opartych na równaniu Davisa, opisujących opór 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, tramwaj.

Omawiając zagadnienie oporu ruchu tramwaju, nie sposób pominąć kwestii definicji pojazdu, jaki może być nazwany tramwajem. Norma EN 17343 „Railway applications - General terms and definitions” definiuje tramwaj jako miejski pojazd szynowy przeznaczony do poruszania się po sieci tramwajowej.

System tramwajowy zdefiniowany jest jako miejski system kolejowy eksploatowany na odrębnej infrastrukturze lub infrastrukturze współdzielonej z ruchem drogowym, lub obu typach infrastruktury. System tramwajowy obejmuje sieć tramwajową, powiązany z nią tabor oraz czynności operacyjne. Zarówno tory jak i infrastruktura wchodząca w skład systemu tramwajowego, przeznaczone są dla pojazdów o nacisku na oś mniejszym niż 13 t. Pojazdy są zgodne z kategorią konstrukcyjną P-IV lub P-V (EN 12663-1:2010+A1:2014) i projektem zderzeniowym kategorii C-IV (EN 15227:2008+A1:2010).

Odcinki trasy mogą posiadać sygnalizację sterującą ruchem. Sieć tramwajowa może być podłączona do innych sieci kolejowych. Dla systemów tramwajowych posiadających odcinki oddzielone od ruchu drogowego można stosować termin system kolei lekkiej (Light Rail System). W przypadku systemów tramwajowych określanych jako systemy kolei lekkiej, termin lekki pojazd szynowy (Light Rail Vehicle) może być stosowany w odniesieniu do pojazdów (tramwajów) użytkowanych w takich systemach.

Ze względu na zróżnicowane warunki eksploatacji: składy poruszające się zarówno w ruchu miejskim – po szynach wbudowanych w strukturę jezdni, jak i separowanych, wydzielonych torowiskach czy tunelach, zapewniających fragmentami jazdę bezkolizyjną oraz na odmienne cechy konstrukcyjne istnieje szereg różnych wzorów opisujących opory ruchu składów tramwajowych.

Opory ruchu tramwajów aproksymowane są na podstawie rozbudowanych wzorów 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].

Prezentowane w artykule wzory można stosować dla wszystkich tramwajów, ale ich dokładność będzie niższa niż w przypadku wykorzystania dedykowanych dla konkretnego tramwaju wzorów, które zostały wyznaczone doświadczalnie dla danego typu pojazdu.

Należy także podkreślić zależność oporów ruchu pojazdu od rodzaju szyn, po których porusza się tramwaj – współczynniki dla ruchu po szynach Vignole’a czy szyn rowkowych różnią się w znaczący sposób.

♦ Opory ruchu tramwaju, przyjmowane jako stałe:

$$f_{res} = 60 \left[\frac{N}{t} \right] \quad (2)$$

gdzie:

f_{res} – względna wartość siły oporów ruchu [N/t].

Takie założenie oznacza przyjęcie stałej wartości siły oporów ruchu tramwaju w całym zakresie prędkości jazdy. Jest to wartość często przyjmowana w projektowaniu układów hamowania tramwaju.

♦ Opory ruchu tramwaju M32 Sirio firmy AnsaldoBreda wg [2]:

$$F_{res} = m_{tram} \cdot g \cdot \left(2,5 + \frac{v^2}{850} \right) \quad (3)$$

gdzie:

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

m_{tram} – masa tramwaju [t],

v – prędkość jazdy [m/s],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$).

♦ Opory ruchu tramwajów (wg Lebediewa) wg [3]:

$$F_{res} = (24,5 + 1,27 \cdot v^2) \cdot m_{tram} + (0,546 + 0,072 \cdot n_{wag}) \cdot S_{czol} \cdot v^2 \quad (4)$$

gdzie:

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

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

n_{wag} – liczba wagonów tramwaju [-],

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

v – prędkość jazdy [m/s].

♦ Opory ruchu tramwajów (wg Coopera) wg [3]:

$$f_{res} = 61,8 + 1,28 \cdot v + 0,235 \cdot v^2 \quad (5)$$

gdzie:

f_{res} – względna wartość siły oporów ruchu [N/t],

v – prędkość jazdy [m/s].

♦ **Opory ruchu tramwajów (wg Davisa) wg [3]:**

$$f_{res} = 3,58 + \frac{14,2}{m_{osi}} + 0,045 \cdot \frac{0,151 \cdot S_{czol} \cdot v^2}{m_{osi} \cdot n_{wag}} \quad (6)$$

gdzie:

- f_{res} – względna wartość siły oporów ruchu [N/t],
- m_{osi} – masa pojazdu, wraz z pasażerami, odniesiona do jednej osi tramwaju [t],
- n_{wag} – liczba wagonów w tramwaju [-],
- S_{czol} – przekrój powierzchni czoła [m²],
- v – prędkość jazdy [m/s].

♦ **Opory ruchu tramwajów klasycznych typu N produkcji Konstal Chorzów i jego pochodnych wg [3]:**

– dla siły pociągowej $F_p > 0$:

$$f_{res} = 0,45 + 0,0028 \cdot v^2 \quad (7)$$

– dla hamowania i jazdy z wykorzystaniem energii kinetycznej ($F_p \leq 0$):

$$f_{res} = 5,0 + 0,0031 \cdot v^2 \quad (8)$$

gdzie, dla wzorów (7)–(8):

- f_{res} – względna wartość siły oporów ruchu [N/t],
- v – prędkość tramwaju [m/s].

♦ **Opory ruchu pojazdów tramwajowych typu 13N produkcji Konstal Chorzów i jego pochodnych wg [3]:**

– dla siły pociągowej $F_p > 0$ (hamowanie):

$$f_{res} = 1,5 + \frac{8 + 0,038 \cdot v^2}{m_{tram} \cdot g} \quad (9)$$

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

$$f_{res} = 1,5 + \frac{45 + 0,062 \cdot v^2}{m_{tram} \cdot g} \quad (10)$$

gdzie, dla wzorów (9)–(10):

- f_{res} – względna wartość siły oporów ruchu [N/t],
- m_{tram} – masa tramwaju [t],
- v – prędkość tramwaju [m/s],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

♦ **Opory ruchu dla tramwajów na podstawie [5]:**

$$f_{res} = \frac{A_{nap} \cdot m_{nap} + A_{tocz} \cdot m_{tocz}}{m_{tram}} + \left[C_2 + \frac{F_p + F_{pow} \cdot n_{wag}}{m_{tram}} \right] \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (11)$$

gdzie:

- f_{res} – względna wartość całkowitej siły oporów ruchu [N/t],
- A_{nap} – współczynnik podstawowych oporów ruchu osi napędnej:
 - dla szyn Vignole’a $A_{nap} = 0,004$ [-],
 - dla szyn rowkowych $A_{nap} = 0,006$ [-],
- A_{tocz} – podstawowe opory ruchu osi tocznej:
 - dla szyn Vignole’a $A_{tocz} = 0,025$,
 - dla szyn rowkowych $A_{tocz} = 0,004$,
- C_2 – stała wartości oporów powietrza: $C_2 = 1,5$ [N/t],
- F_p – stała ciśnieniowa (nadciśnienia i podciśnienia): $F_p = 4460$ [N],
- F_{pow} – stała oporów aerodynamicznych: $F_{pow} = 800$ [N],
- m_{nap} – masa przypadająca na osie napędne [t],

- m_{tocz} – masa przypadająca na osie toczne [t],
- m_{tram} – masa tramwaju [t],
- n_{wag} – liczba wagonów (członów) tramwaju [-],
- v – prędkość tramwaju [km/h].

♦ **Opory ruchu dla 4-osioowych tramwajów z wkładkami gumowymi w kołach (wg Davisa) na podstawie [5]:**

$$f_{res} = A + \frac{F_{osi}}{m_{osi \text{ sred}} \cdot g} + B \cdot \frac{v}{100} + \frac{F_{pow}}{m_{tram} \cdot g} \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (12)$$

gdzie:

- f_{res} – względna wartość całkowitej siły oporów ruchu [N/t],
- A – stała podstawowych oporów ruchu: $A = 3,65$ [N/t],
- B – stała oporów ruchu: $B = 4,50$ [N/t],
- F_{osi} – stała siły oporu od osi: $F_{osi} = 142$ [N],
- F_{pow} – stała oporów aerodynamicznych: $F_{pow} = 3050$ [N],
- $m_{osi \text{ sred}}$ – średnia masa przypadająca na oś [t],
- m_{tram} – masa tramwaju [t],
- v – prędkość tramwaju [km/h],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

♦ **Opory ruchu tramwajów jadących po szynach rowkowych na torowisku wbudowanym w jezdnię wg [4]:**

$$F_{res} = (78,3 + 0,406 \cdot v^2) \cdot \sqrt{m_{tram} \cdot g} + 1,27 \cdot S_{czol} \cdot (0,43 + 0,06 \cdot n_{wag}) \cdot C_{xtram} \cdot v^2 \quad (13)$$

♦ **Opory dla tramwajów jadących po szynach kolejowych na torowisku wydzielonym wg [4]:**

$$F_{res} = (1,83 + 0,54 \cdot v) \cdot m_{tram} \cdot g + 1,27 \cdot S_{czol} \cdot (0,674 \cdot C_{xczol} + 0,00954 \cdot C_{xbocz} \cdot l_{tram}) \cdot v^2 \quad (14)$$

gdzie, dla wzorów (13)–(14):

- F_{res} – wartość siły oporów ruchu [N],
- m_{tram} – masa tramwaju [t],
- S_{czol} – pole powierzchni czołowej tramwaju [m²],
- n_{wag} – liczba wagonów (członów) tramwaju [-],
- C_{xtram} – współczynnik kształtu tramwaju:
 - dla pojazdów nieopływowych z odsłoniętymi częściami jezdni: $C_{xtram} = 1,0$ [-],
 - dla pojazdów opływowych z osłoniętymi częściami jezdni: $C_{xtram} = 0,6$ [-],
- C_{xczol} – współczynnik kształtu czoła tramwaju: $C_{xtram} = 0,33 \div 0,6$ [-], (mniejsze wartości dla czoła o kształtach opływowych),
- C_{xbocz} – współczynnik kształtu powierzchni bocznej tramwaju: $C_{xbocz} = 0,5 \div 1$ [-], (mniejsze wartości opływowych ścian bocznych)
- l_{tram} – długość tramwaju [m],
- v – prędkość tramwaju [m/s],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²] ($g = 9,80665$ m/s²).

Zależności (12) i (13) zostały opracowane dla tramwajów starszej generacji, uzyskane wyniki należy traktować jako orientacyjne [4]. 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. W metodzie

pierwszej korzysta się z dodatkowej lokomotywy oraz wagonu dynamometrycznego. W metodzie drugiej pojazd 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 pojazdów ma szczególne znaczenie w procesie zmniejszenia ich zużycia energii. Związane jest to z zagadnieniem zmniejszenia masy oraz udoskonaleniem parametrów wózków napędowych i tocznych mających na celu obniżenie oporów tocznych pojazdów.

Literatura:

1. Bergiel K.: Podstawy trakcji elektrycznej (wykłady). Zespół Trakcji Elektrycznej, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka, 2006.
2. Edstrand J.: Calculation method for powering a tramway network (M.Sc thesis). Dept of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2012.
3. Kacprzak J. Teoria trakcji elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
4. Karwowski K. (red.) Energetyka transportu zelektryfikowanego. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2018.
5. Wende D. Fahrdynamik des Schienenverkehrs. B.G. Teubner, Wiesbaden 2003.

Autorzy:

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

Drag resistance of Light Rail Vehicles – empirical equations

The article presents empirical formulae, describing the drag resistance of various types of Light Rail Vehicles (LRV). It is presented a number of formulas, based on Davis equation, describing the vehicle'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. Such a comparison is helpful in engineering calculations of estimated energy consumption, used in the design phase of the vehicle as well as in the process of evaluating energy consumption for traction purposes. This paper discusses the estimation of the accuracy of theoretical calculations of resistance forces with the indication of the need to verify the results of the simulation with the results obtained under conditions of actual operation.

Keywords: drag resistance, rolling stock, tram.



Katarzyna Brożek

Innowacyjność przedsiębiorstw jako czynnik wzrostu gospodarczego. Przykład krajów Grupy Wyszehradzkiej

ISBN 978-83-66017-90-0

Liczba stron: 248

Format: B5

Oprawa: twarda

Rok wydania: 2019

Cena 59,00 zł (w tym 5% VAT)

Innowacyjność, postrzegana jako immanentna cecha współczesnej gospodarki, jest jednym z najistotniejszych czynników determinujących wzrost gospodarczy. Ma ona także kluczowe znaczenie w kreowaniu konkurencyjności przedsiębiorstw oraz państw i regionów. Uważa się, że osiągnięcie trwałej przewagi konkurencyjnej nie byłoby możliwe bez inwestycji sprzyjających wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań. Głównym celem pracy jest ocena zależności pomiędzy czynnikami determinującymi innowacyjność przedsiębiorstw a wzrostem gospodarczym krajów Grupy Wyszehradzkiej oraz stopnia ich istotności w kontekście zróżnicowania regionalnego.

Pełna oferta wydawnicza:

www.inw-spatium.pl