

Włodzimierz GAŚOWSKI

ANALIZA WZORÓW DO OBLICZANIA OPORÓW RUCHU POCIĄGÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono wzory służące do obliczania oporów pociągów w trakcie ich projektowania oraz w procesie eksploatacji.

Przeprowadzono ich analizę i sformułowano propozycje ujednoczenia.

ANALYSIS OF FORMULAS SUITABLE FOR EVALUATION OF THE TRAIN MOTION DRAG

Summary. The paper presents formulas for evaluation of train motion drag at the the design and operation stage. Relevant analysis and proposals of their unification are presented as well.

1. WPROWADZENIE

Badania oporów ruchu pociągów do dziś nie zostały ujednoczone. Przeprowadzono je w różnych warunkach, często nawet nie opisanych. Aby można je było porównywać między sobą i racjonalnie wykorzystywać, powinny być one sprowadzone do wspólnego obszaru odniesienia. Jest to szczególnie istotne dla pociągów dużej prędkości, dla których opory aerodynamiczne wielokrotnie przewyższają pozostałe opory ruchu. Istnieje więc potrzeba stworzenia standardowych warunków badań.

Rozróżnia się dwa rodzaje obliczeń oporów ruchu pociągów, które służą dwóm odmiennym celom:

1. W procesie projektowania stanowią podstawę:

- optymalizacji konstrukcji pojazdu z punktu widzenia minimalnego zużycia energii,
- doboru mocy silników trakcyjnych,
- obliczeń osiągnięć pojazdu i charakterystyk trakcyjnych.

2. W czasie eksploatacji służą do:

- obliczenia przejazdów teoretycznych i zapotrzebowania energii.

Obliczenia oporów ruchu podczas eksploatacji opierają się na zastosowaniu wzorów empirycznych podających zależność oporu pociągu składającego się z pojazdów (lokomotywy, wagonów silnikowych i doczepnych) określonego typu od jego ciężaru i prędkości. Wzory te

wywodzą się z aproksymacji matematycznej krzywych pomiarowych wyrażających zależność siły oporu od prędkości pociągu. Najczęściej pomiary te są przeprowadzone metodą wybiegu. Na prostym i płaskim odcinku toru rozpędza się pociąg do jego prędkości maksymalnej, a następnie wyłącza się silniki trakcyjne i pozwala się pociągowi pędzić i toczyć się do zatrzymania, mierząc przez cały czas jego przyspieszenie i prędkość [2].

Pomimo że przy prędkościach przekraczających 250 km/godz. opory aerodynamiczne stanowią od 75 do 80% oporów ruchu pociągu, to jednak dążenie do poznania pozostałych elementów składowych oporów, w szczególności oporów toczenia, stanowi warunek dokładności i poprawności prowadzonych badań.

Wśród badaczy pojazdów szynowych powszechnie stosowany jest ogólny wzór - zwany często wzorem Davisa - wyrażający zależność oporów ruchu pociągu od jego prędkości:

$$R = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

Znaczenie fizyczne poszczególnych współczynników A, B i C nie jest do końca jednoznaczne. Niemniej badania wykazały, że każdy z tych współczynników charakteryzuje pewną główną cechę fizyczną związaną ze zjawiskiem powstawania oporu. I tak:

- A - wyraża opór toczenia i jest funkcją obciążenia osi zestawu kołowego,
- BV - stanowi tę część oporów ruchu, która zależy od prędkości, ale nie jest oporem aerodynamicznym.
- CV^2 - wyraża opory aerodynamiczne pociągu.

Wszystkie wzory przedstawiające opory ruchu pociągów - zarówno empiryczne, jak i teoretyczne - można sprowadzić do postaci (1).

2. WZORY EMPIRYCZNE

Z badań poligonowych różnych pociągów uzyskano następujące zależności oporów ruchu od prędkości:

$$V = 0.10...300 \quad \text{km/h}$$

1. Pociąg TGV 001 o składzie M+8R+M, masie: $Q = 390$ t, długości: $L = 197.72$ m, powierzchni przekroju: $S = 7.95$ m², obwodzie przekroju: $p = 9.75$ m [4]:

$$R_1(V) = 382 + 3,90V + 0,0623V^2$$

2. Pociąg TGV-PSE o składzie: M + 8R + M, masie: $Q = 407$ t, długości: $L = 200.12$ m, powierzchni przekroju: $S = 8.00$ m², obwodzie przekroju: $p = 9.68$ m [4]:

$$R_2(V) = 250 + 3,256V + 0,0572V^2$$

3. Pociąg "Corail", składający się z dwóch lokomotyw BB 22200 i 6 wagonów doczepnych o masie: $Q = 456$ t, i długości 188 m [4]:

$$R_3(V) = 462 + 3,90V + 0,0906V^2$$

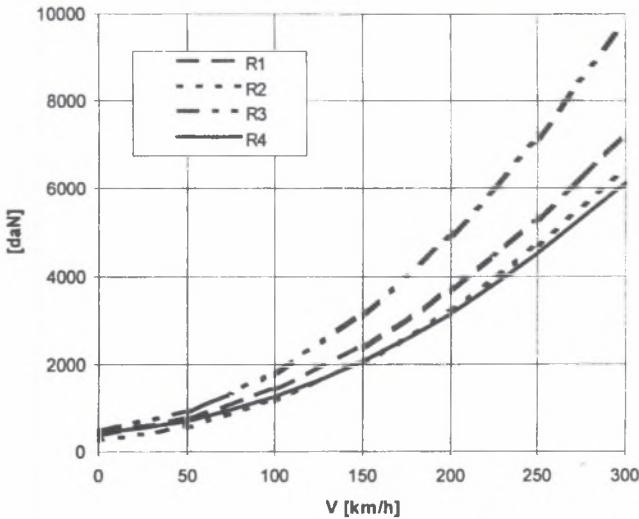
4. Pociąg ICE (InterCity Experimental) składający się z dwóch pojazdów trakcyjnych i n pojazdów doczepnych [5]:

$$R_4(V) = 1,14Q + (0,0025Q + 1,38) \cdot V + (0,019 + 0,0045n) \cdot V^2$$

dla: $Q = 400t$ i $n = 8$

$$R_4(V) = 456 + 2,38V + 0,055V^2$$

Zestawienie wyników badań dla tych czterech pociągów przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Zależność oporów ruchu od prędkości dla czterech różnych pociągów
Fig.1. Dependence of resistances to motion on the speed for four various trains

3. WZORY STOSOWANE PODCZAS PROJEKTOWANIA

Wyżej wymienione wzory empiryczne, oparte na pomiarach oporów ruchu pociągów, są mało przydatne w fazie projektowania pojazdów, nie określają bowiem zależności oporów od parametrów technicznych pojazdu. Jedynie w przypadku kiedy projektowany pojazd nie odbiega swoimi podstawowymi parametrami konstrukcyjnymi od istniejącego i przebadanego pojazdu, korzystanie z istniejących wzorów jest uzasadnione.

Najwięcej trudności w obliczeniach oporów ruchu pociągu sprawiają obliczenia oporów aerodynamicznych.

Analizując strukturę oporów ruchu nowoczesnych pojazdów, można zauważyć, że opory tarcia mechanicznego przypadające na jednostkę ciężaru pojazdu mieszczą się w wąskim zakresie wartości i wahają się w granicach od 1.5 do 1.7 kg/T. Zupełnie odmiennie rzecz się ma z oporami aerodynamicznymi. Współczynniki oporów ciśnienia i tarcia aerodynamicznego poszczególnych pociągów mogą się znacznie różnić.

Stąd w obliczeniach oporów szybkich pociągów najistotniejszą część stanowią obliczenia oporów aerodynamicznych [1, 3]. Obliczenia te mogą być wykonane na podstawie wyników badań modeli w tunelach aerodynamicznych, uzupełnionych obliczeniami teoretycznymi, opartymi na rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa lub w oparciu o bogatą bazę danych doświadczalnych uzyskanych z badań poligonowych.

Dla wstępnych obliczeń stosuje się często wzory wiążące opory aerodynamiczne z podstawowymi parametrami geometrycznymi pociągu. Np. w Japonii dla zespołu elektrycznego o opływowych kształtach stosuje się wzór:

$$R_5(V) = (1,6 + 0,03V) \cdot Q + \frac{\rho}{2} (0,46 + 0,0025L) \cdot S \left(\frac{V}{3,6} \right)^2$$

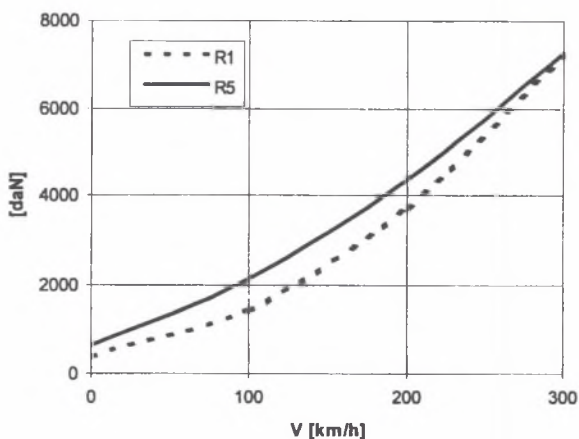
Licząc wg powyższego wzoru opory pociągu TGV 001 o składzie M+8R+M i parametrach:

$$Q = 390 \text{ t} \quad L = 197,7 \quad S = 7,9 \text{ m}^2 \quad \rho = 0,12 \text{ kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$$

otrzymamy:

$$R_5(V) = 624 + 11,6V + 0,0349V^2 \quad (2)$$

Porównanie wyników obliczeń wg powyższego wzoru z wynikami pomiarów oporów ruchu pociągu TGV-001 wg $R_1(v)$ przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Porównanie wyników obliczeń wg wzoru [2] i pomiarów oporów ruchu pociągu TGV-001

Fig.2. Comparison of the results calculated from Formula (2) and the measured resistances to motion for a Type TGV 001 train

Jak widać z wykresu, wyniki obliczeń wg wzoru (2) znacznie odbiegają od wyników pomiarów, szczególnie w zakresie mniejszych prędkości. Wzór daje zawyżone wartości oporów o około 50 % przy $V=100 \text{ km/h}$ i 20 % przy $V=200 \text{ km/h}$.

Wzory na opory ruchu zalecane do stosowania przez COBiRTK [2]:

- dla lokomotywy

$$R_L = Q_L \left(0,9 + 0,15 \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m_L + 3,5 \left(\frac{V}{10} \right)^2$$

- dla wagonu

$$R_w = \left(K + 0,15 \frac{V}{10} \right) \cdot Q_w + 15 \cdot m_w + f \cdot (n + 2,5) \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2$$

- dla pociągu

$$R(V) = R_L(V) + R_w(V) \quad (3)$$

- dla zespołu trakcyjnego

$$R = \left(0,65 + 0,15 \frac{V}{10} \right) Q + 15 \cdot m + (2,7 + n) \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2 \quad (4)$$

gdzie: Q_L - ciężar lokomotywy [T], Q_w - ciężar wagonów, m_L i m_w - odpowiednio liczba osi lokomotyw i wagonów, n - liczba wagonów, K - współczynnik rodzaju łożysk ($K = 0.65$ dla łożysk tocznych), f - współczynnik rodzaju wagonu ($f = 0.8$ dla wagonów towarowych i $f = 1.0$ dla wagonów osobowych).

Obliczmy opory dla zespołu trakcyjnego TGV 001 podstawiając jego dane do wzoru COBiRTK (4) i porównajmy z wynikami pomiarów. Wiedząc, że: $Q = 390$, $n = 10$, $m = 40$, otrzymamy:

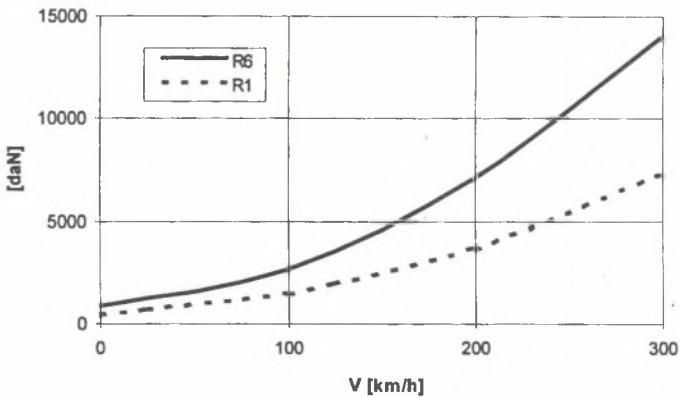
$$R_6(V) = 853,5 + 5,85 \cdot V + 0,127 \cdot V^2$$

Dla pociągu angielskiego, składającego się z lokomotywy serii 85 i 6 wagonów, wzór opracowany na podstawie wyników badań poligonowych przedstawia się następująco:

$$R_7(V) = 1,5(Q_L + Q_w) + (5,5 + 0,55(n - 2)) \frac{V^2}{100}$$

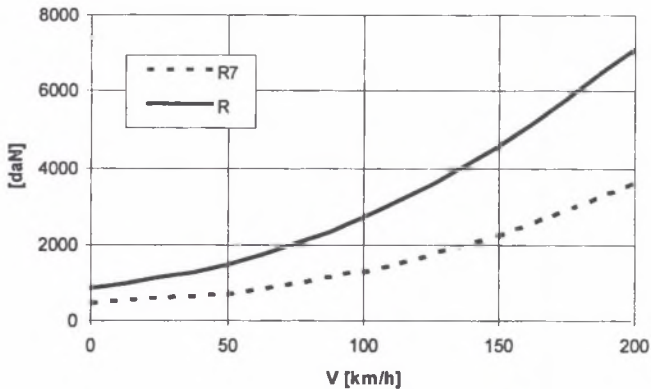
Po podstawieniu jego parametrów: $Q_w = 240$, $Q_L = 80$, $n = 6$, będzie:

$$R_7(V) = 480 + 0,077V^2$$



Rys.3. Porównanie wyników obliczeń wg wzoru COBiRTK i pomiarów poligonowych
Fig.3. Comparison of the results calculated from a COB i RTK formula and the field measurements

Opory obliczone według powyższego wzoru i wzoru COBiRTK (3) dla tego pociągu przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Porównanie wyników obliczeń oporów pociągu wg wzoru COBiRTK (3) i pomiarów poligonowych R₇(V)
Fig.4. Comparison of the resistances to motion, which were calculated to a COB i RTK formula (3), and the field measurements

Z zależności przedstawionych na rys.3 i 4 wynika, że zalecane przez COBiRTK wzory do obliczeń oporów ruchu pojazdów i pociągów zdecydowanie zawyżają wartości tych oporów w porównaniu z propozycjami kolei zachodnich. Były one ustalone w czasach, kiedy pojazdy i pociągi wyglądały inaczej niż obecne oraz wiedza i doświadczenia w zakresie ustalania oporów ruchu były skromniejsze.

Celowe więc jest ich powtórne wnikliwe przeanalizowanie i zaproponowanie przez obecne Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa nowych skorygowanych wzorów do obliczeń.

Stosowanie dotychczasowych wzorów może prowadzić do niepotrzebnego zawyżania mocy pojazdów trakcyjnych i w rezultacie do pogorszenia wskaźników ekonomicznych PKP.

4. ZAKOŃCZENIE

Analiza wykazała, że wartości oporów ruchu pociągów, obliczone według wzorów stosowanych przez oddzielne koleje, różnią się zasadniczo między sobą.

Dla lepszego wykorzystania wyników badań prowadzonych na świecie, byłoby celowe ustalić jednolite warunki badań oporów pojazdów szynowych. Jako parametry odniesienia można by przyjąć np. prędkość i kierunek wiatru, temperaturę i ciśnienie powietrza, jego lepkość i gęstość.

Stopień wpływu tych parametrów na wartości wyników badań oporów ruchu pociągu jest różny i zmienia się wraz z prędkością. Np. gęstość płynu zależy w ogólności od ciśnienia p i temperatury T . Podczas opływu pojazdu z prędkością 200-300 km/h ściśliwość, czyli zmiana gęstości powietrza wskutek zmiany ciśnienia i temperatury, jest niewielka. Przepływające powietrze może być z dostatecznym przybliżeniem traktowane jako nieściśliwe. Gęstość płynu ρ może być przyjęta jako stała. Dla powietrza w warunkach normalnych ($p = 1000$ hPa, $T = 237$ K) wynosi ona $\rho = 1,251$ kg/m³. Natomiast przy ustanowieniu rekordów prędkości ($V > 500$ km/h) nie można przyjmować, że gęstość powietrza jest stała.

Aerodynamika pociągów jest w znacznym stopniu dyscypliną empiryczną. Ten jej charakter wynika z faktu, że pole opływu pociągów odbywa się z oderwaniem strug. Takie zjawiska są bardzo trudne do teoretycznego opisanie. Ale i w tym zakresie rozwój numerycznej mechaniki płynów oraz komputerów dużej mocy spowoduje w najbliższych latach duży postęp.

Znajomość oporów ruchu pojazdu w warunkach standardowych pozwala obliczyć opory w warunkach rzeczywistych poprzez wprowadzenie współczynników korygujących lub dodanie przyrostów oporów zależnych od zmiany parametrów otoczenia.

LITERATURA

1. Gąsowski W.: Calculation of Motion Aerodynamic Drag of Rail Vehicles Incorporated in Draft of Cars. Archives of Transport, vol. 5, issue 1-4. Warsaw 1993.
2. Gąsowski W., Sobaś J., Pohl K.: Układy mechaniczne elektrycznych pojazdów trakcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
3. Gąsowski W.: Aerodynamika - podstawowy problem pociągów dużej prędkości. Materiały Międzynarodowej Konferencji „TRANSPORT'97”. Ostrawa-Katowice 1997.
4. Guiheu C.: La resistance a l'avancement des rames TGV-PSE. Bilan des etudes et des resultats des mesures. Revue Generale Des Chemins De Fer. Janvier 1982.
5. Pcters J.L.: Mesure de la trainee aerodynamique de l'ICE. Revue Generale Des Chemins De Fer. Janvier 1990.

Abstract

This paper presents two kinds of dependencies determining the train motion resistance, especially its aerodynamic drag. At the stage of operation two empirical formulas taking into account weight and speed of a train consisting of different cars are employed while determining its motion resistance. On the other hand, formulas enclosing dependence of resistance on train basic geometric data are used at the design stage.

A comparable analysis of both group of formulas has been carried out and a proposal of their unification within each group has been presented as well.