

Opory ruchu pociągu w procesie projektowania pojazdu

Obliczenia oporów ruchu w procesie projektowania pojazdów szynowych, zwłaszcza dla większych prędkości jazdy, nabierają dużej wagi. Pociąg jako bryła o dużej powierzchni omywanej przez powietrze przy wyższych prędkościach stawia o wiele większy opór niż inne pojazdy. Składowa aerodynamiczna oporu stanowi wówczas około 80% oporów całkowitych. Dlatego już podczas procesu projektowania należy tak kształtować lub dobierać podzespoły konstrukcyjne, aby były najbardziej korzystne pod względem aerodynamicznym. W artykule wykazano ten fakt.

1. Wprowadzenie

Wśród badaczy pojazdów szynowych powszechnie stosowany jest ogólny wzór 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 się pewną cechą fizyczną związaną ze zjawiskiem powstawania oporu. Można je interpretować w następujący sposób:

- A – wyraża opór toczenia i jest funkcją obciążenia osi zestawu kołowego. Badania poligonowe prowadzone na wielu pojazdach [6] wykazały, że wartość oporu może być wyrażona następującym wzorem:

$$A = \lambda \cdot \sqrt{\frac{10}{q}} \cdot Q \quad [\text{daN}] \quad (2)$$

gdzie:

q – obciążenie osi [T],

Q – ciężar pociągu [T],

λ - współczynnik mieszczący się w granicach 0,9 ÷ 1,4 w zależności od konstrukcji.

- BV – stanowi tę część oporów ruchu, która zależy od prędkości, ale nie jest oporem aerodynamicznym. Współczynnik „B” jest często dzielony na dwie części: „B1” wyrażający dodanie straty pędu i „B2” wyrażający straty w przekładniach oraz opory tarcia ślizgowego (tarcie obrzeży kół o głowki szyn). Wyniki badań [6] wykazały, że łączna wartość współczynnika „B” dla większości współczesnych pociągów mieści się w granicach od 0,009·Q do 0,011·Q.
- CV² wyraża opory aerodynamiczne pociągu. Współczynnik „C” zależy od własności aerodynamicznych pociągu wyrażonych współczynnikiem aerodynamicznym „C_x”, powierzchni odniesienia „S”,

którą przyjmuje się na ogół jako przekrój poprzeczny pojazdu i gęstości powietrza „ ρ ”, która jest funkcją temperatury i ciśnienia otaczającego powietrza. „C” jest wtedy wyrażony następującym wzorem:

$$C = C_x \cdot S \cdot \frac{\rho}{2} \quad (3)$$

2. Trakcyjne obliczenia oporów ruchu pojazdów szynowych

Określenie współczynników równania (1) dokonuje się najczęściej dwoma sposobami. Pierwszy sposób polega na pomiarze siły ciągu potrzebnej na pokonanie oporów przy stałej prędkości ruchu. Istotą tej metody jest utrzymanie prędkości na stałym poziomie i jednoczesnym pomiarze napięcia i prądu pobieranego przez lokomotywę. Pomiar prądu odbywa się na pantografie po uprzednim dokładnym określeniu strat na urządzeniach pomocniczych lub bezpośrednio na silniku. Natomiast drugi sposób odbywa się poprzez pomiar przyspieszenia (ujemnego) pociągu w czasie jego wybiegu z prędkości maksymalnej do zatrzymania. Dzięki prostym pomiarom prędkości w funkcji czasu można wyznaczyć zależność opóźnienia w funkcji czasu, co pozwala po prostych przekształceniach, otrzymać wartość oporów aerodynamicznych. Najczęściej stosowana jest druga metoda, ze względu na jej prostotę i zadawalającą dokładność. Pomiar przeprowadza się na odcinkach eksploatowanych linii. Zaleca się próby na odcinkach płaskich i poziomych. Wychodząc z równania ruchu pociągu

$$m \frac{dV}{dt} = R - P + Q \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

gdzie:

m = Q/g,

V – prędkość,

R – siła ciągu,

P – siła oporu,

Q – ciężar pociągu,

α - nachylenie torów,

Zależności oporów ruchu w funkcji prędkości dla poszczególnych składów pociągów [1]

Pociąg Skład	Ciężar Q [t]	Długość L [m]	Powierzchnia przekroju S [m ²]	Obwód przekroju p [m]	Zależność R(V)
TGV-001 M+8R+M	390	197,72	7,95	9,75	$R_1(V) = 382 + 3,900 \cdot V + 0,0623 \cdot V^2$
TGV-PSE M+8R+M	407	197,72	8,00	9,68	$R_2(V) = 250 + 3,256 \cdot V + 0,0572 \cdot V^2$
CORAIL BB22200+6R+BB22200	456	188	-	-	$R_3(V) = 462 + 3,900 \cdot V + 0,0906 \cdot V^2$
ICE (Experimental) M+8R+M	400	-	-	-	$R_4(V) = 456 + 2,380 \cdot V + 0,055 \cdot V^2$

można stwierdzić, że dla $R = 0$ i $\alpha = 0$ (jazda po odcinku prostym i poziomym)

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{P}{m} = (a + b \cdot V + c \cdot V^2) \quad (5)$$

gdzie:

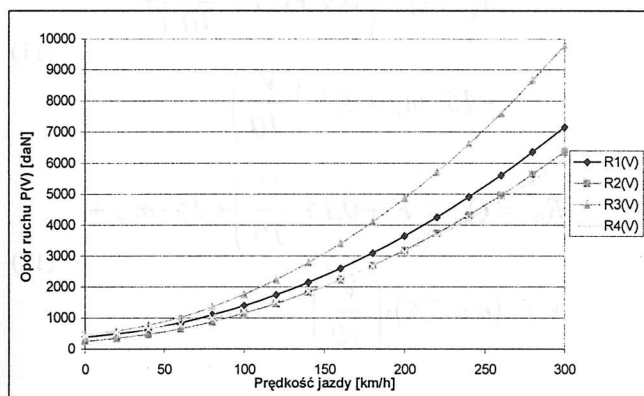
$$\begin{aligned} a &= A/m, \\ b &= B/m, \\ c &= C/m. \end{aligned}$$

Znając z pomiarów poligonowych zależność

$$\frac{dV}{dt} = f(V) \quad (6)$$

współczynniki a , b , c , oblicza się metodą regresji lub metodą identyfikacji. W efekcie czego uzyskujemy empiryczne zależności na obliczenie zależności oporów ruchu w funkcji prędkości jazdy. Metody te posiadają także pewną wadę. Wartości oporów nie są wyznaczone bezpośrednio, lecz poprzez ciąg obliczeń, które wprowadzają jednak pewne niedokładności. Pomimo tego otrzymane w ten sposób wyniki są zadowalające [6].

Przeprowadzając badania poligonowe pociągów uzyskano następujące zależności do obliczania oporów ruchu w funkcji prędkości jazdy $R(V)$:



Rys. 2.1 Wykres oporów ruchu pociągów w zależności od prędkości jazdy

Niestety, tak ustalone zależności $R(V)$ na podstawie badań poligonowych nie są przydatne w swojej postaci

konstruktorom podczas tworzenia pojazdów. Nie określają bowiem zależności składowej aerodynamicznej oporów ruchu 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.

Dlatego też podczas obliczania oporów ruchu nowoprojektowanych pojazdów, najistotniejszą część stanowić powinny obliczenia oporów aerodynamicznych. Obliczenia te mogą być przeprowadzane na podstawie wyników badań modeli w tunelach aerodynamicznych, wykorzystując uzyskane tam wyniki, uzupełnionych obliczeniami teoretycznymi bazującymi na rozwiązaniach równań Naviera-Stokesa lub w oparciu o bogatą bazę danych doświadczalnych uzyskanych z badań poligonowych.

3. Zależności stosowane w procesie projektowania

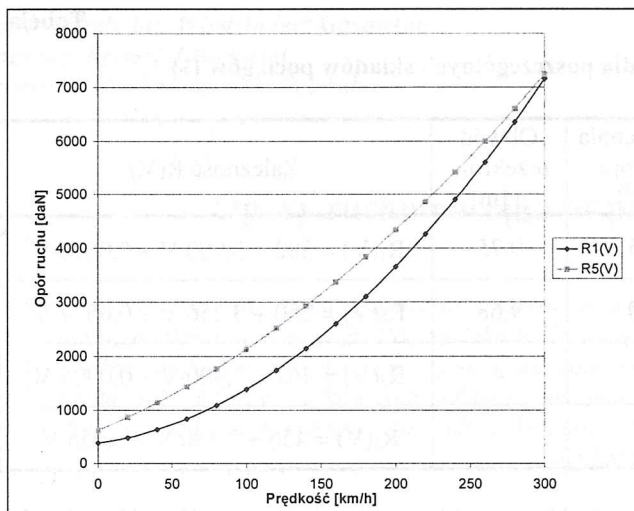
Dla uzyskania wstępnych obliczeń konstruktor może posłużyć się tylko wzorami wiążącymi opory aerodynamiczne z podstawowymi parametrami geometrycznymi pociągu. Na przykład dla japońskiego zespołu elektrycznego (7) o opływowych kształtach stosuje się wzór

$$\begin{aligned} R_5(V) &= (1,6 + 0,03 \cdot V) \cdot Q + \\ &+ \frac{\rho}{2} \cdot (0,46 + 0,0025 \cdot L) \cdot S \cdot \left(\frac{V}{3,6} \right)^2 \quad (7) \end{aligned}$$

Podstawiając do wzoru (7) parametry pociągu TGV-001 z tabeli 1 otrzymamy zależność

$$R_5(V) = 624 + 11,6 \cdot V + 0,0349 \cdot V^2 \quad (8)$$

Porównując wyniki obliczeń otrzymane z zależności empirycznej $R_1(V)$ i $R_5(V)$ dla tego samego pociągu (rys. 3.1) można stwierdzić, iż obliczenia wstępne wg wzoru (7) znacznie odbiegają od otrzymanych z badań poligonowych. Wartości oporów wg zależności (8) są zawyżone nawet o 44%.



Rys. 3.1 Porównanie wyników obliczeń oporów ruchu $R_1(V)$ i $R_5(V)$

W Polsce do obliczeń oporów ruchu dla poszczególnych pojazdów zalecane jest stosowanie wzorów ustalonych przez COB i RTK (tabela 2)

Tabela 2

Wzory do obliczenia oporów ruchu zalecane przez COBiRTK [4]

Rodzaj pojazdu	Opór ruchu
Lokomotywa	$R_L = Q_L \cdot \left(0,9 + 0,15 \cdot \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m_L + 3,5 \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2$
Wagon	$R_W = Q_W \cdot \left(K + 0,15 \cdot \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m_W + f \cdot (n + 2,5) \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2$
Pociąg	$R = R_L + R_W$
Zespół trakcyjny	$P = Q \cdot \left(0,65 + 0,15 \cdot \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m + (n + 2,7) \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2$

gdzie:

Q_L – ciężar lokomotywy [T],

Q_W – ciężar wagonów,

m_L i m_W – odpowiednio ilość osi lokomotyw i wagonów,

n – ilość wagonów,

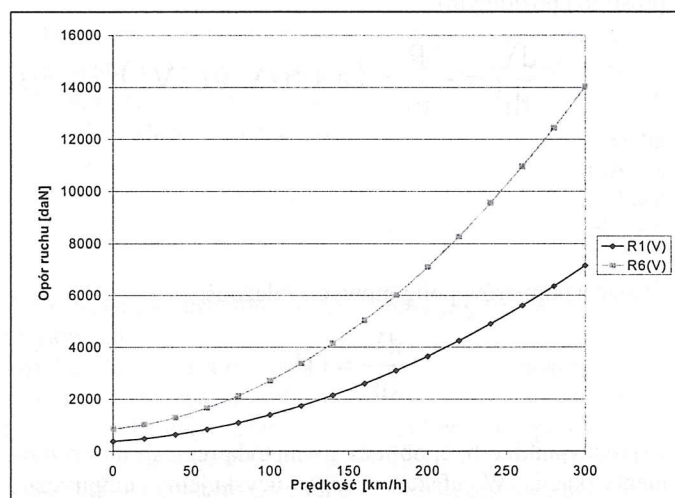
K – współczynnik rodzaju łożysk ($K = 0,65$ dla łożysk tocznych),

f – współczynnik rodzaju wagonu ($f = 0,8$ dla wagonu towarowego i $f = 1,0$ dla wagonu osobowego),

Obliczając opory ruchu dla zespołu trakcyjnego TGV-001 wg wzoru COBiRTK przy $Q = 390$, $n = 10$, $m = 40$ i porównując je z wynikami pomiarów poligonowych otrzymujemy

$$R_6 = Q \cdot \left(0,65 + 0,15 \cdot \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m + (n + 2,7) \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2 \quad (9)$$

$$R_6 = 853,5 + 5,85 \cdot V + 0,127 \cdot V^2 \quad (10)$$



Rys. 3.2 Porównanie wyników obliczeń wg wzoru COBiRTK i pomiarów poligonowych

Sprawdzając jeszcze wzory COBiRTK dla pociągu angielskiego, składającego się z lokomotywy serii 85 i 6-ciu wagonów, otrzymujemy

$$R_L = Q_L \cdot \left(0,9 + 0,15 \cdot \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m_L + 3,5 \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2 \quad (11)$$

$$R_W = Q_W \cdot \left(K + 0,15 \cdot \frac{V}{10} \right) + 15 \cdot m_W + f \cdot (n + 2,5) \cdot \left(\frac{V}{10} \right)^2 \quad (12)$$

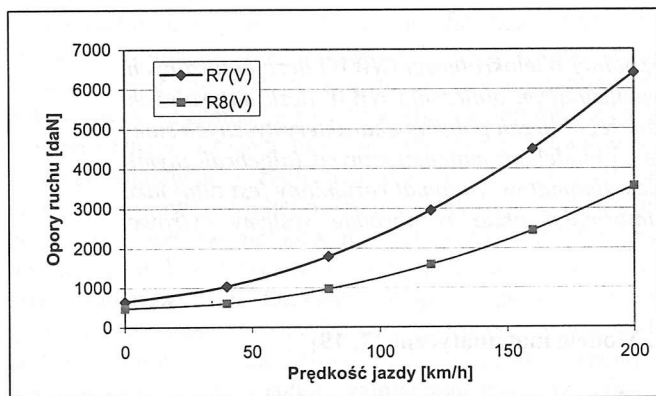
$$R_7(V) = R_L(V) + R_W(V) \quad (13)$$

gdzie: $Q_W = 240$, $Q_L = 80$, $n = 6$, $m_L = 4$, $f = 1,0$, $K = 0,65$

Wzór pochodzący z wyników badań poligonowych tego pociągu przedstawia się następująco:

$$R_g = 1,5 \cdot (Q_L + Q_W) + (5,5 + 0,55 \cdot (n - 2)) \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \quad (14)$$

$$R_g = 480 + 0,077 \cdot V^2 \quad (15)$$

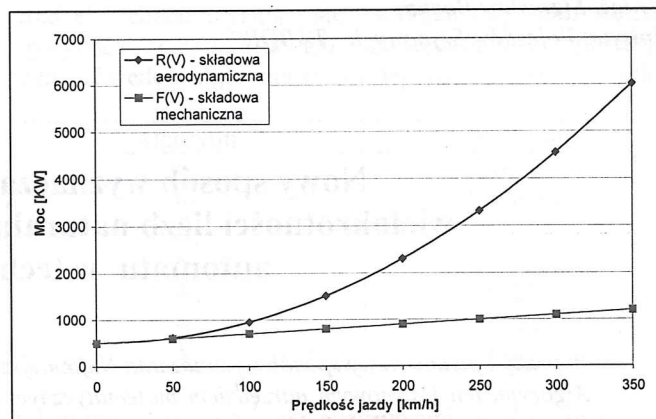


Rys. 3.3 Porównanie wyników obliczeń wg wzoru COBiRTK i pomiarów poligonowych

Jak widać z powyższych porównań wzory zalecane do stosowania przez COBiRTK dają prawie dwukrotnie zawyżone wartości oporów w porównaniu z poligonowymi wynikami pomiarów.

4. Podsumowanie

Analizując strukturę oporów ruchu nowoczesnych pojazdów szynowych można stwierdzić, że ich składowa mechaniczna waha się w wąskich granicach. Natomiast inaczej dzieje się ze składową aerodynamiczną. Wraz ze wzrostem prędkości właśnie ta druga składowa oporów staje się wartością dominującą (rys. 4.1). Współczynniki oporów ciśnienia i tarcia aerodynamicznego mogą zmieniać się znacznie dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych mimo podobnego składu pociągu.



Rys. 4.1 Moc niezbędna do pokonania oporów ruchu dla pociągu francuskiego [1]

Zespoły konstrukcyjne powinny brać pod uwagę obliczenia oporów aerodynamicznych korzystając z wyników przeprowadzonych badań modeli w tunelu aerodynamicznym, skorygowanych do warunków rzeczywistych, na podstawie danych z badań poligonowych. Opory te są funkcją parametrów geometrycznych pojazdów i ich zespołów konstrukcyjnych oraz składu pociągu. To pozwoli na dokładniejsze ustalenie udziału energii niezbędnej do pokonania oporów ruchu, optymalizacji konstrukcji pojazdu z punktu widzenia minimalnego zużycia energii, a co za tym idzie odpowiedniego doboru mocy silników trakcyjnych.

5. Literatura

- [1] Caille M.P.: „Tendances actuelles dans l'etude des problemes d'aerodynamique ferroviaire”, *L'Aerodynamique Automobile, S.I.A. n° 91107. J-F 1991*,
- [2] Gąsowski W.: „Aerodynamika pociągu”, ITE, Radom 1998,
- [3] Gąsowski W.: „Wpływ ukształtowania pojazdów szynowych na opór aerodynamiczny pociągu”, *Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 127/1998*,
- [4] Gąsowski W., Sobaś J., Pohl K.: „Układy mechaniczne elektrycznych pojazdów trakcyjnych”, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994,
- [5] Gąsowski W., Ruthendorf-Przeworski K., Witt A.: „Wpływ obciążeń wywołanych siłami aerodynamicznymi na układ zawieszenia pojazdów szynowych”, *Przegląd Mechaniczny, nr 5-6/1993 i 10/1993*,
- [6] Peters J.L.: “Bestimmung des aerodynamischen Widerstandes des ICE/V im Tunnel und auf freier Strecke durch Auslaufversuche”, *ETR 39 1990 H. 9 September*,
- [7] Tadanao M.: “Rolling stock for higt speed operation”, *Quarterly Report 625.2-185.4*,