

Janusz Biliński, Maciej Błaziejewski, Marta Malczewska, Marta Szczepiórkowska

Opory ruchu pojazdów szynowych na łukach

Artykuł przedstawia zależności empiryczne, opisujące opory ruchu na łukach dla pojazdów trakcyjnych. W przybliżeniu opory te są liniowo proporcjonalne do nacisku pojazdu na tor i odwrotnie proporcjonalne do promienia krzywizny. W artykule przedstawiono szereg wzorów, opartych na równaniu Röckla, opisujących opór ruchu pojazdu na łuku. 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: tabor kolejowy, opory ruchu pojazdu, droga po łuku.

Opory ruchu pojazdów szynowych w czasie przejazdu przez łuki są integralną częścią całkowitych oporów ruchu pojazdów szynowych. W tym artykule przedstawiono zależności empiryczne, opisujące opory ruchu pojazdów trakcyjnych na łukach. Wzory uwzględniają parametry łuków torów, takie jak: promień łuku, długość łuku jak również parametry związane z infrastrukturą i konstrukcją pojazdu: szerokość toru czy rozstaw osi pojazdu. Podczas ruchu pojazdu trakcyjnego na łuku występują dodatkowe opory tarcia między obrzeżami kół a szyną oraz siły odśrodkowe, oddziałujące na zestawy kołowe. Wartość oporów ruchu na łukach związana jest również z konstrukcją wózka pojazdu. Wózki obrotowe (skretne) charakteryzują się lepszym wpisywaniem się w łuki o małych promieniach, zminimalizowaniem sił poprzecznych, a tym samym zmniejszonym zużyciem kół i szyn niż w przypadku rozwiązań wykorzystujących wózki bez radialnego prowadzenia osi.

Ze względu na konieczność minimalizowania wpływu sił odśrodkowych podczas budowy infrastruktury kolejowej stosuje się poprzeczne pochylenie toru na łuku zwane przechyłką, które należy uwzględnić podczas wykonywania obliczeń symulacyjnych.

Należy podkreślić, że każda z wymienionych cech ma wpływ na wartość oporów ruchu pojazdu i powinna zostać uwzględniona w trakcie symulacji przejazdu na trasie o zadanym profilu poziomym i pionowym. Analiza oporów ruchu na łukach występujących na trasie przejazdu znacząco wpływa na wzrost dokładności obliczeń oporów ruchu pojazdów, a w konsekwencji na wyznaczenie wartości zużycia energii.

♦ **Opory ruchu po łuku na podstawie Röckla wg [2]:**

$$f_{rad} = \frac{k_1}{R - k_2} \quad (1)$$

gdzie:

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN],

k_1, k_2 – współczynniki zależne od szerokości torów i promienia łuku [m],

R – promień łuku [m].

Wartości współczynników k_1, k_2 zależnie od promienia łuku i szerokości toru:

- dla torów o normalnej szerokości i $R > 350$ m,
- $k_1 = 650, k_2 = 55,$
- dla torów o normalnej szerokości i $R \approx 350$ m,
- $k_1 = 530, k_2 = 35,$
- dla torów o normalnej szerokości i $R < 350$ m,
- $k_1 = 500, k_2 = 30,$
- dla torów o szerokości 1 m,
- $k_1 = 400, k_2 = 20,$
- dla torów o szerokości 0,75 m,
- $k_1 = 350, k_2 = 10,$
- dla torów o szerokości 0,6 m,
- $k_1 = 200, k_2 = 5.$

♦ **Opory ruchu po łuku poziomym, na podstawie Röckla wg [3]:**

$$f_{rad} = \frac{690}{R} \quad (2)$$

♦ **Opory ruchu po łuku poziomym, na podstawie Röckla dla wartości granicznych promienia łuku i uproszczeniu wzoru dla toru o szerokości 1435 mm wg [1]:**

$$f_{rad} = \frac{7000}{R - 20} \quad (3)$$

♦ **Opory ruchu po łuku na kolejach francuskich SNCF wg [6]:**

$$f_{rad} = \frac{800}{R} \quad (4)$$

We wzorach (2)–(4):

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN],

R – promień łuku [m].

♦ **Opory ruchu po łuku poziomym, na podstawie Röckla dla pociągów o długości większej niż długość łuku wg [1]:**

$$f_{rad} = \frac{7000 \cdot l_{\text{łuku}}}{R \cdot l_{\text{poc}}} \quad (5)$$

gdzie:

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN],

$l_{\text{łuku}}, l_{\text{poc}}$ – długość odpowiednio łuku i pociągu [m],

R – promień łuku [m].

♦ **Opory ruchu po łuku na podstawie Protopapadakisa wg [2]:**

$$f_{rad} = \mu \cdot \frac{1,44 \cdot s_{\text{toru}} + 0,47 \cdot l_{\text{osi}}}{R} \quad (6)$$

gdzie:

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN],

μ – współczynnik tarcia między szyną a kołem [N/kN], zalecana wartość:

- w okresie letnim $\mu = 216$ N/kN,
- w okresie zimowym $\mu = 162$ N/kN,

s_{toru} – szerokość toru mierzona od osi toru do osi szyn [m] (wzór daje prawidłowe wyniki dla rozstawu osi w zakresie: $2s_{toru} = 1,5$; $2s_{toru} = 1,06$; $2s_{toru} = 0,8$; $2s_{toru} = 0,65$),

l_{osi} – rozstaw osi [m],
 R – promień łuku [m].

- ♦ **Opory ruchu po łuku na podstawie Карачана wg [8]:**

$$f_{rad} = \alpha \cdot \frac{100 \cdot (2 \cdot l_{osi} + s_{toru})}{R} \cdot g \quad (7)$$

gdzie:

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/t],

α – współczynnik dla szyn [-], zależny od pogody, zalecana wartość:

- w okresie letnim $\alpha = 1$,
- w okresie zimowym $\alpha = 0,75$,

s_{toru} – szerokość toru [m],

l_{osi} – odległość między osiami w pojeździe lub wózku [m],

R – promień łuku [m],

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

- ♦ **Opory ruchu po łuku z uwzględnieniem przechyłki toru na podstawie Асmaxооа wg [8]:**

$$f_{rad} = \frac{200}{R} + 1,5 \cdot \left| \frac{v^2}{R} - \frac{h}{s_{toru}} \cdot g \right| \quad (8)$$

gdzie:

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [kG/t],

R – promień łuku [m],

v – prędkość jazdy [m/s],

h – przechyłka toru [mm],

s_{toru} – szerokość między okręgami obrotu kół [mm]:

- dla rozstawu 1520 mm $s_{toru} = 1600$ mm,

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

- ♦ **Opory ruchu na łukach o małym promieniu (mniejszym od 100 m), zwykle występujących na liniach tramwajowych wg [3]:**

$$F_{rad} = \frac{350 \cdot s_{toru}}{R} \cdot m_{poj} \cdot g \quad (9)$$

gdzie:

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

s_{toru} – nominalna szerokość toru [m],

R – promień łuku [m],

m_{poj} – masa pojazdu [t],

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

- ♦ **Opory ruchu na łukach linii tramwajowych wg [1]:**

$$f_{rad} = \frac{450}{R} \quad (10)$$

gdzie:

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN],

R – promień łuku [m].

- ♦ **Opory ruchu na łukach dla linii tramwajowych z szynami rowkowymi wg Hamelinka i Adlera na podstawie [7]:**

$$f_{rad} = \frac{0,158 \cdot l_{osi} + 0,033 \cdot (s_{toru} + 0,050)}{R} \quad (11)$$

- ♦ **Opory ruchu na łukach dla prac manewrowych pociągów na kolejach szwajcarskich SBB na podstawie [7]:**

$$f_{rad} = 0,107 \cdot \frac{1 + l_{osi}}{R} \quad (12)$$

We wzorach (11)–(12):

f_{rad} – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN],

l_{osi} – odległość między osiami w pojeździe lub wózku [m],

s_{toru} – szerokość toru [m],

R – promień łuku [m].

- ♦ **Opory ruchu na łukach wagonów ramowych ze sztywnymi prowadnikami na torze 1435 mm na podstawie Franka wg [4]:**

$$F_{rad} = \frac{m_{wag} \cdot g}{R} \cdot (180 - c_{poc} \cdot \frac{l_{osi}}{R}) \quad (13)$$

- ♦ **Opory ruchu na łukach kolei wąskotorowych na podstawie Hillera wg [4]:**

$$F_{rad} = m_{wag} \cdot g \cdot \frac{153 \cdot s_{toru} + 100 \cdot l_{osi}}{R} \quad (14)$$

- ♦ **Opory ruchu po łuku na podstawie Langroda wg [4]:**

$$F_{rad} = m_{wag} \cdot g \cdot \frac{500 \cdot s_{toru}}{R} \quad (15)$$

We wzorach (13)–(15):

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

m_{wag} – masa wagonu [t],

R – promień łuku [m],

l_{osi} – rozstaw skrajnych osi w sztywnej ramie [m],

c_{poc} – współczynnik zależny od rodzaju pociągu [-]:

- dla pociągów towarowych $c_{poc tow} = 2000$,
- dla pociągów pasażerskich $c_{poc pas} = 1000$,

s_{toru} – szerokość toru [m],

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

- ♦ **Wartość pochylenia odpowiadającego oporowi ruchu po łuku poziomym podstawie Rozporządzenia MTiGM wg [5]:**

Wartość pochylenia odpowiadającego oporowi ruchu po łuku poziomym określa się według wzorów:

$$i_R = \frac{690}{R} \quad (16)$$

lub

$$i_R = \frac{12 \sum \alpha}{\sum l_R} \quad (17)$$

We wzorach (16)–(17):

i_R – wartość pochylenia podłużnego torów [‰],

$\sum \alpha$ – suma kątów środkowych przy kilku łukach poziomych położonych obok siebie [°],

$\sum l_R$ – suma długości odcinków toru w łukach poziomych; jeżeli łuki są oddzielone wstawkami prostymi lub krzywymi przejściowymi

wymi, ich długość należy dodać do sumarycznej długości odcinków w łukach [m],
 R – promień łuku poziomego [m].

♦ **Opory ruchu na łukach kolei wąskotorowych na podstawie rozporządzenia MTiGM wg [5]:**

Dodatkowy opór w łuku określa się według wzoru:

$$i_k = \frac{690}{R} \quad (18)$$

Na łukach położonych blisko siebie dodatkowy opór określa się według wzoru:

$$i_k = \frac{12 \sum \alpha}{l} \quad (19)$$

We wzorach (18)–(19):

i_k , – dodatkowy opór w łuku [‰],

α – suma arytmetyczna kątów środkowych wszystkich łuków na danym odcinku [°],

l – długość odcinka [m],

R – promień łuku [m].

Dla składu pociągu, przejeżdżającego przez łuki, opór dodatkowy oblicza się jako sumę oporów częściowych, pochodzących od łuków cząstkowych, uwzględniając typ wagonów i pojazdów trakcyjnych tworzących skład pociągu.

Podsumowanie

Podczas projektowania pojazdów istotne jest uzyskanie jak najmniejszego zużycia energii podczas przejazdu, stąd wymagana jest dokładna analiza profilu trasy przejazdu oraz dążenie do minimalizacji oporów ruchu. Dokładność wyliczeń zużycia energii zależy od dokładności z jaką wyznaczone zostaną opory ruchu pojazdu. Wynikające z obliczeń przybliżenia mogą zostać zmniejszone poprzez uwzględnienie dokładnych informacji dotyczących infrastruktury: występowania wzniesień, łuków oraz tuneli.

Artykuł w sposób przeglądowy przedstawia wzory opisujące opory ruchu występujące na łukach zależnie od konstrukcji i typu pojazdu, długości łuku i jego promienia. Pozwala to porównanie wyniki uzyskane na podstawie różnych wzorów i dobór odpowiedniej zależności do rozpatrywanego problemu.

Dodatkowo przedstawiona została zależność umożliwiająca przeliczenie oporów ruchu na łuku na wartość równoważną pochyleń toru, która może być pomocna przy przeprowadzaniu symulacji i analiz różnych tras przejazdów, gdyż pozwala na jednoczesną analizę wzniesień i zakrzywień toru. W tym przypadku wartość oporów ruchu na łuku o wartości 1 N/10 t odpowiada nachyleniu toru o wartości 1‰.

Oprócz dokładnej analizy należy również zwrócić uwagę na konieczność minimalizowania oporów ruchu pojazdów na łukach, które stanowią dodatkowy opór ruchu, związany z tarciem występującym między obrzeżami kół, a główką i zewnętrzną krawędzią szyny. Może on zostać zmniejszony przez zastosowanie smarownic obrzeży kół i szyn, odpowiednią konstrukcję wózków oraz profil trasy.

Literatura:

1. Kacprzak J. Teoria trakcji elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
2. Kałuża E. Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej. Skrypt uczelniany nr 1066, Politechnika Śląska, Gliwice 1982.
3. Karwowski K. (red.) Energetyka transportu zelektryfikowanego. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2018.
4. Madej J. Teoria ruchu pojazdów szynowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.
5. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Działy III i IV. (Dz. U. nr 151 poz. 987 z dnia 15 grudnia 1998 r.).
6. Steimel A. Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. Basics and Practical Experience, Oldenburg Industrieverlag München 2008.
7. Wende D. Fahrdynamic des Schienenverkehrs. B.G. Teubner. Wiesbaden 2003
8. Астахов П.Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава. Труды ЦНИИ МПС (ISSN 0372-3305). Выпуск. Москва, Транспорт, 1966.

Autorzy:

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

Resistance on curve of traction vehicle – empirical equations

The article presents empirical formulae, describing the drag resistance on curves of traction vehicles. Approximately these resistances are linearly proportional to the vehicle load on the track and inversely proportional to the radius of curvature.

It is presented a number of formulas, based on Röckl equation, describing the vehicle's resistance to motion on curve.

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: rolling stock, resistance of traction vehicles movement, resistance on track curvature.