

Obliczanie długości krzywej przejściowej dla taboru z wychylnym pudłem

Wiele krajów ma duże doświadczenia w eksploatacji taboru z wychylnym pudłem. Polska, chcąc dołączyć do tych krajów, od pewnego czasu prowadzi studia i przygotowuje projekty modernizacji linii kolejowych, żeby umożliwić jazdę tego typu taboru. Powstało wiele prac, traktujących o kinematyce jazdy po odcinkach krzywoliniowych pociągu z wychylnym pudłem, jednak większość z nich podchodzi do zagadnienia w sposób czysto teoretyczny. Artykuł ten ma na celu przedstawienie praktycznego sposobu obliczania długości krzywej przejściowej, z punktu widzenia projektanta.

Obliczając parametry układu krzywa przejściowa – łuk, najczęściej mamy do czynienia z sytuacją, gdzie należy zapewnić, na projektowanym układzie, bezpieczny ruch pociągów towarowych oraz pasażerskich z taborem klasycznym i z wychylnym pudłem. W literaturze często podawane są wzory na wyliczanie prędkości maksymalnej na łuku typu

$$v_{\max} = 4.52\sqrt{R}, \quad (1)$$

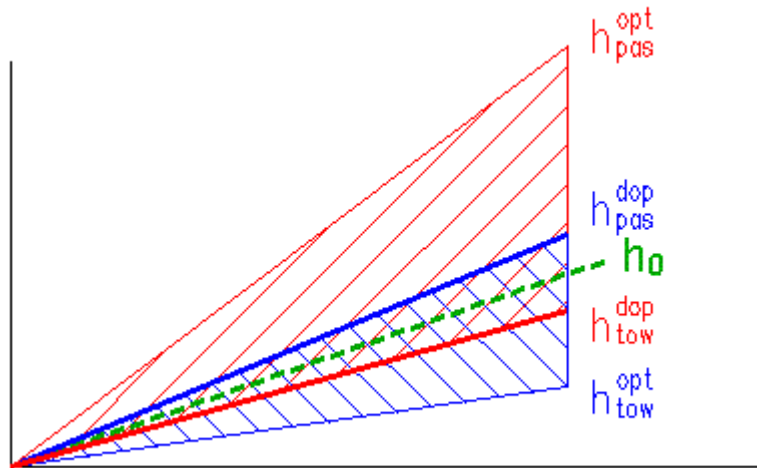
dla taboru klasycznego oraz

$$v_{\max} = 6.19\sqrt{R}, \quad (2)$$

dla taboru z wychylnym pudłem. Wzory te nie mają zbyt dużego praktycznego zastosowania, ponieważ nie uwzględniają możliwości jazdy po łuku pociągów towarowych. Poza tym, w istniejących układach, założenie maksymalnej przechyłki pociąga za sobą konieczność wydłużenia krzywych przejściowych, a zatem wymusza także przesunięcie łuku w planie. Oczywiście pociąga to za sobą także zmianę promienia łuku. Dlatego te wzory nie decydują o możliwej maksymalnej prędkości potencjalnej na łuku kołowym. O maksymalnej prędkości na istniejącym łuku decyduje zatem długość łuku i długości krzywych przejściowych. Bezkrytyczne stosowanie tych wzorów może doprowadzić do błędnych wyników.

Projektując układ krzywa przejściowa – łuk, dla trzech rodzajów pociągów jw., powinno się najpierw obliczyć przechyłkę dla taboru klasycznego, ze znanej nierówności:

$$\frac{11.8v_{\max}^2}{R} - 153a_{dop} \leq h \leq \frac{11.8v_t^2}{R} + 153a_t. \quad (3)$$



Rys.1. Idea doboru przechyłki

Przyjęta przechyłka h_0 powinna spełniać nierówność (3), ale nie musi być tak dobrana, by znajdować się możliwie blisko środka tego przedziału. Na rysunku 1 pokazano ideę doboru przechyłki h_0 , którą symbolizuje linia przerywana. Górna ciągła linia symbolizuje optymalną przechyłkę dla pociągów pasażerskich, a dolna linia ciągła dla pociągów towarowych. Te linie są odpowiednio przesunięte, uwzględniając dopuszczalne przyspieszenia boczne (linie ciągłe grube). Linia przerywana powinna znaleźć się pomiędzy tym liniami, przy czym górnym ograniczeniem powinna być linia symbolizująca dopuszczalną przechyłkę dla pociągów towarowych. Jeśli jest znane planowane obciążenie linii pociągami towarowymi i pasażerskimi, można tę przechyłkę zoptymalizować tak, żeby oba toki szynowe zużywały się w jednakowym stopniu. Dla takiego układu (R, v_{\max}, v_t, h_0) można wyliczyć potrzebną długość krzywej przejściowej ze wzorów:

$$l_1 \geq \frac{a_0 v_{\max}}{3.6 \psi_{dop}}, \text{ gdzie} \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{v_{\max}^2}{12.96R} - \frac{h_0}{153}, \quad (5)$$

$$l_2 \geq \frac{h_0 v_{\max}}{3.6 f_{dop}} \text{ lub } l_2 \geq \frac{h_0 v_{\max}}{100} \quad (l_2 \geq \frac{h_0 v_{\max}}{125}) \text{ dla warunków trudnych} \quad (6)$$

gdzie a_0 – rzeczywiste przyspieszenie boczne na łuku przy prędkości v_{\max} . Przyjęta długość krzywej przejściowej powinna spełniać wszystkie te warunki:

$$l^{klas} \geq \text{Max}(l_1, l_2). \quad (7)$$

Tak zaprojektowany układ należy sprawdzić pod względem możliwości prowadzenia pociągów z wychylnym pudłem z prędkością v_{wych} . Pojawiające się w takim układzie parametry kinematyczne, przedstawia rys.2. W analizie założono, że przyspieszenie obrotu nadwozia $c_0=0$. Dla wygody analizy przyjęto parametr:

$$\xi = \frac{x}{l}, \quad (8)$$

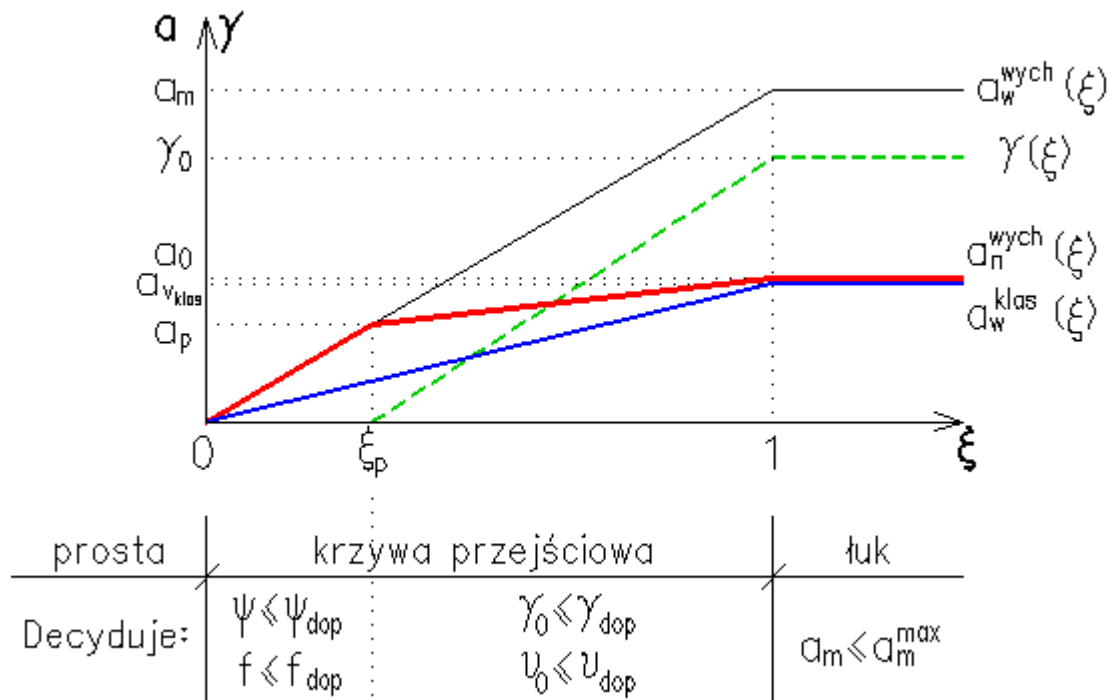
gdzie:

x – bieżące miejsce na krzywej przejściowej,

l – długość krzywej przejściowej.

Parametr ξ , jak widać, jest bezwymiarowy i przyjmuje wartości z zakresu $\langle 0,1 \rangle$. Z wykresu widać także, że

$$\xi_p = \frac{a_p}{a_m}. \quad (9)$$



Rys.2. Parametry kinematyczne na układzie krzywa przejściowa - łuk

Na odcinku $(0, \xi_p)$ występuje ruch pociągu bez wychylenia pudła. Przechył następuje po osiągnięciu pewnej, określonej z góry, wartości przyspieszenia bocznego a_p . Od tego miejsca zaczyna być niezerowa różnica między przyspieszeniem, jakiego doznaje wózek wagonu (czarna linia na wykresie), a przyspieszeniem, jakiego doznaje nadwozie (czerwona linia). Różnica ta stale powiększa się na odcinku $(\xi_p, 1)$, natomiast dla $\xi > 1$ (łuk), ma stałą wartość $\Delta a = a_m - a_0$. To zmniejszenie przyspieszenia bocznego nadwozia realizowane jest przez wychył pudła, który dla małych kątów ($\gamma_0 = 0-8^\circ$), z wystarczającą dokładnością można obliczyć ze wzoru:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta a}{g} = \frac{a_m - a_0}{g} \leq \gamma_{dop}. \quad (10)$$

Maksymalny kąt przechyłu zależy od konstrukcji wagonu i zazwyczaj wynosi 8°. Prędkość obrotu pudła jest stała, gdyż założono $c_0=0$, i można ją obliczyć z jednego z dwóch wzorów:

$$v_0 = \frac{\gamma_0 \psi_0}{a_m a_p} \leq v_{dop}, \quad (11)$$

$$v_0 = \frac{\gamma_0 v_{wyvh}}{3.6(1 - \xi_p)l} \leq v_{dop}. \quad (12)$$

Wygodniejszy jest drugi wzór, z którego można wyliczyć minimalną potrzebną długość krzywej przejściowej:

$$l^v \geq \frac{\gamma_0 v_{wych}}{3.6(1 - \xi_p)v_{dop}}. \quad (13)$$

Kolejnymi warunkami są równania dla odcinka $(0, \xi_p)$:

$$\psi_0 \geq \frac{a_m v_{wych}}{3.6l} \leq \psi_{dop}, \quad (14)$$

$$f \geq \frac{h_0 v_{wych}}{3.6l} \leq f_{dop}. \quad (15)$$

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$l^v \geq \frac{a_m v_{wych}}{3.6\psi_{dop}}, \quad (16)$$

$$l^f \geq \frac{h_0 v_{wych}}{3.6f_{dop}}. \quad (17)$$

Pozostaje jeszcze sprawdzić dla $\xi > 1$, czy $a_m \leq a_m^{\max}$.
Ostatecznie należy przyjąć długość krzywej przejściowej:

$$l \geq \text{Max}(l^{klas}, l^v, l^f, l^y, l^v, l^a). \quad (18)$$

Przykład obliczeniowy:

Zaprojektować układ krzywa przejściowa – łuk dla możliwości prowadzenia ruchu pociągów towarowych oraz pasażerskich z taboru klasycznym i z wychylnym pudłem. W obliczeniach przyjąć następujące dane: $R=1400\text{m}$, $v_t=120\text{km/h}$, $a_t=0.2\text{m/s}^2$, $v_{\text{klas}}=v_{\text{max}}=160\text{km/h}$, $a_{\text{pas}}=0.6\text{m/s}^2$, $v_{\text{wych}}=200\text{km/h}$, $f_{\text{dop}}=28\text{mm/s}$, $\Psi_{\text{dop}}=0.5\text{m/s}^3$.

Przechyłkę i boczne przyspieszenia obliczono w autorskim programie RaiLab (rys.3 i 4). Program wylicza, dla zadanych parametrów kinematycznych, optymalną przechyłkę oraz wymaganą długość krzywej przejściowej. Na rysunku 4 pokazany jest przebieg zmienności przyspieszenia bocznego w zależności od prędkości. Można także uzyskać wykresy dla przyrostu przyspieszenia, prędkości podnoszenia koła, niedoboru przechyłki i prędkości przyrostu niedoboru przechyłki. Program pozwala na wyliczenie potrzebnej długości krzywej przejściowej dla taboru z wychylnym nadwoziem, ale w tym przykładzie wykonamy obliczenia „krok po kroku”.

RaiLab - Wspomaganie projektowania linii kolejowych

Plik Przechyłka Plan Profil Przekrój Inne narzędzia

Dane podstawowe

Vmax= 160 km/h R= 1400 m Vt= 120 km/h

Dop. niezrówn. przysp. odśrodkowe adop, m/s²

- 0.8; łuki i pojedyncze krzywe przejściowe dla torów, po których odbywa się ruch z $v < 160\text{km/h}$; Instrukcja D-1 przyjmuje 0.6 m/s²
- 0.6; łuki i pojedyncze krzywe przejściowe dla torów, po których odbywa się ruch z $v \geq 160\text{km/h}$
- 0.65; tory zwrotne rozjazdów zwyczajnych, tory boczne na stacjach ($v \leq 40\text{km/h}$)
- 0.5; łuki o promieniach $200\text{m} < R \leq 250\text{m}$
- 0.45; łuki o promieniach $R \leq 200\text{m}$, poszerzenia międzytorzy w trudnych warunkach terenowych
- 0.3; poszerzenia międzytorzy w dogodnych warunkach terenowych
- 0.0; optymalna przechyłka
- inne 0.72 Niedomiar h= 110 mm

Dop. niezrówn. przysp. dośrodk. at, m/s²

- 0.6; obciążenie przewozami T=<0,5)
- 0.5; obciążenie przewozami T=<5,10)
- 0.4; obciążenie przewozami T=<10,15)
- 0.3; obciążenie przewozami T=<15,20)
- 0.2; obciążenie przewozami T=<20,-)
- 0.0; optymalna przechyłka
- inne 0.52 Nadmiar h= 80 mm

Optymalizacja

zmiern rozkład vmax(geom)

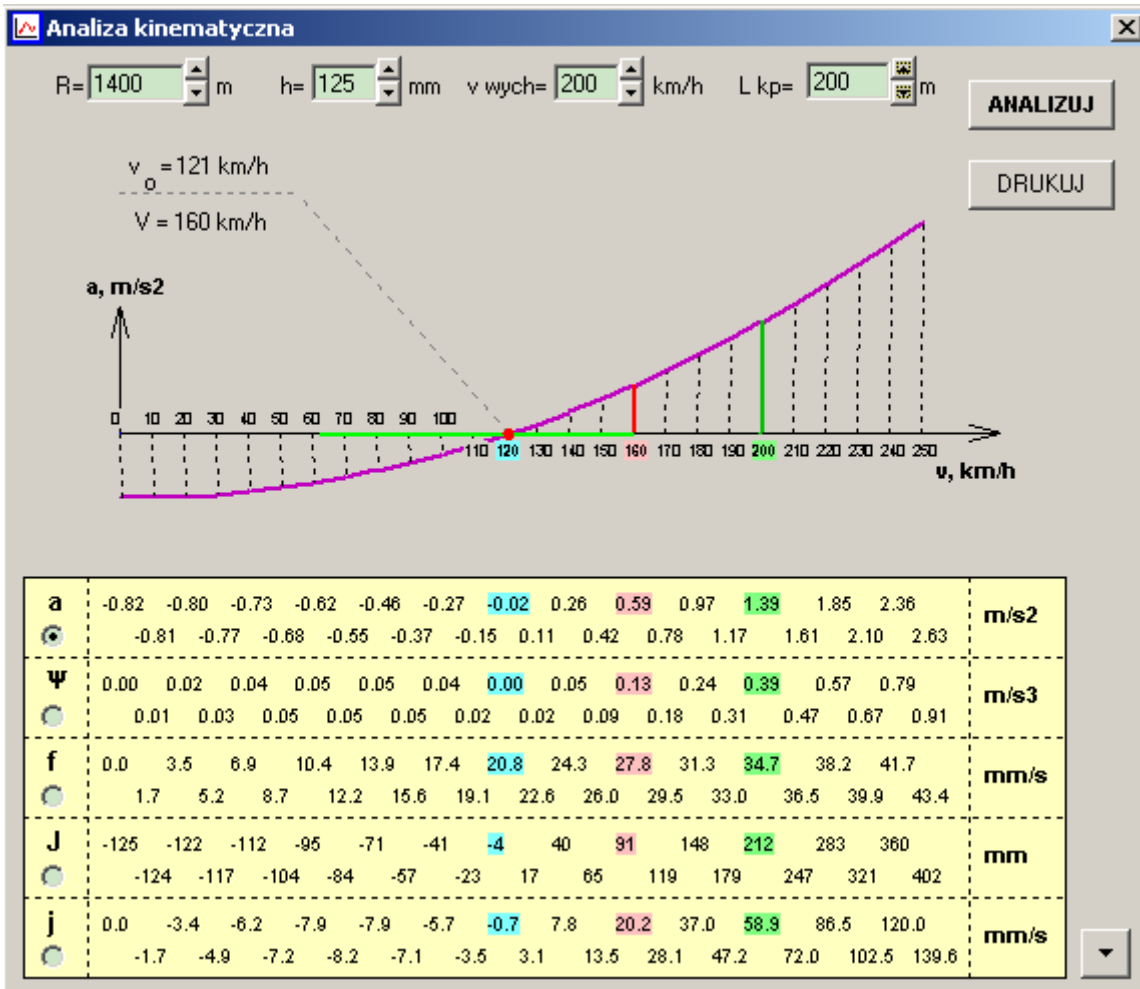
50 %; udział w ruchu pociągów towarowych

Wyniki obliczeń przechyłki

Przyjęta przechyłka powinna spełniać nierówność: hp= 124 mm <h< ht= 152 mm hp(opt)= 216 mm

Zoptymalizowana przechyłka: 138 mm → 125 mm ht(opt)= 121 mm

Rys.3. Obliczenie wymaganej przechyłki w programie RaiLab



Rys.4. Parametry kinematyczne na analizowanym łuku (wydruk z programu RaiLab)

Z obliczeń w programie RaiLab wynika, że $h_0=125\text{mm}$, $a_m=a_{200}=1.39\text{m/s}^2$, $a_{160}=0.59\text{m/s}^2$. Dodatkowo zakładamy, że nadwozie zaczyna się wychylać po osiągnięciu przyspieszenia bocznego, działającego na wózek $a_p=0.60\text{m/s}^2$ i kąt przechyłu ma być taki, żeby na łuku wózek doznawał przyspieszenia $a_0=0.60\text{m/s}^2$ (przypadek najbardziej niekorzystny). Właściwie, teoretycznie rzecz biorąc, można uzyskać bardziej niekorzystny przypadek, tj. gdy pudło zacznie się wychylać przy wartości przyspieszenia bocznego większej od wartości, jaką chcemy osiągnąć na łuku. W praktyce jednak się takiego przypadku nie bierze pod uwagę.

Dla wychylnego pudła przyjęto: $v_{\text{dop}}=2^\circ/\text{s}$, $\gamma_{\text{dop}}=8^\circ$, $f_{\text{dop}}=35\text{mm/s}$, $\Psi_{\text{dop}}=0.5\text{m/s}^3$, $a_m^{\text{max}}=1.8\text{m/s}^2$. Należy pamiętać, żeby przy projektowaniu rozważyć najbardziej niekorzystny przypadek, czyli gdy $a_p=a_0$. Oznacza to włączenie przechylenia pudła w najpóźniejszym momencie. Poszczególne wyliczenia dla krzywej przejściowej są następujące:

$$\xi_p = \frac{0.6}{1.39} = 0.432$$

$$l^v \geq \frac{1.39 \cdot 200}{3.6 \cdot 0.5} = 154.4m ,$$

$$l^f \geq \frac{125 \cdot 200}{3.6 \cdot 35} = 198.4m ,$$

$$\gamma_0 = \frac{1.39 - 0.60}{9.81} = 0.081rad = 4.616^\circ < 8^\circ ,$$

(czyli nie trzeba korygować danych początkowych),

$$l^v \geq \frac{4.616 \cdot 200}{3.6 \cdot (1 - 0.432) \cdot 2} = 225.7m ,$$

$$a_m = 1.38m / s^2 < 1.8m / s^2 ,$$

$$l^{klas} = 200m .$$

$$l \geq \text{Max}(200, 154.4, 198.4, 225.7)$$

Przyjęto zatem długość krzywej przejściowej $l=226m$.

W tym przykładzie długość krzywej przejściowej potrzebnej dla pociągu z wychylnym pudłem wyszła większa niż dla taboru klasycznego. Wystarczy jednak pozwolić na zwiększenie prędkości obrotu pudła do 2.3°/s, by okazało się, że długość wcześniejsza wystarcza. Wiele zarządów kolejowych dopuszcza 2.5 lub 3°/s, więc nie jest to wartość przekraczająca granice bezpieczeństwa, czy komfortu jazdy.

Robert Wojtczak

Literatura:

[1] J. Biliński „Zagadnienia teoretyczne dynamiki pociągów z przechylnym nadwoziem”, TTS 6/200

[2] J. Biliński „Pociągi z przechylnym pudłem – rozwój konstrukcji”, TTS 7-8/200

[3] W. Koc „Graniczne prędkości jazdy taboru z wychylnymi nadwoziami na łukach linii kolejowych”, Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 100

kontakt z autorem:

robert.wojtczak@wp.pl

railab@op.pl

www.railab2008.republika.pl