

Witold GROLL
Tadeusz WOLFRAM

O NIEKTÓRYCH CZYNNIKACH WPLYWAJĄCYCH NA DOPUSZCZALNĄ PRĘDKOŚĆ JAZDY POCIĄGU PASAŻERSKIEGO W ŁUKU

Streszczenie. W referacie omówiono czynniki mające wpływ na dopuszczalną prędkość jazdy w łuku, jak: przyśpieszenie odśrodkowe działające na pasażera, przyśpieszenie odśrodkowe w płaszczyźnie toru, szybkości zmiany tych przyśpieszeń, prędkość wzniosu koła podczas jazdy po krzywej przejściowej, oraz prędkość przechyłu nadwozia.

SOME FACTORS INFLUENCING ON PERMISSIBLE SPEED OF PASSENGER TRAIN IN CURVE

Summary. Factors influencing permissible speed of passenger train in curve such as noncompensated lateral acceleration to which the passenger are subjected, noncompensated lateral acceleration in the track plane, jerk, vertical speed of wheel lift and car body roll speed are described in this paper.

1. UWAGI WSTĘPNE

O dopuszczalnej prędkości jazdy pociągu pasażerskiego w łuku decydują dwa główne czynniki:

- siły między kołem a szyną

$$\{Q, Y\} = f(M_z, a_{rt}, [\text{konstr.}]) \quad (1)$$

gdzie:

M_z – masa w odniesieniu do zestawu kół,
 a_{rt} – przyśpieszenie odśrodkowe w płaszczyźnie toru,
[konstr.] – rodzaj konstrukcji części bieżowej,

- wymuszenia oddziałujące na pasażera.

Pierwszy z wymienionych czynników został określony przez sformułowanie granicznych wartości następujących wielkości [1]:

$$Y/Q \leq 0,8 \quad \text{dla} \quad R \geq 300 \text{ m}, \quad (2)$$

$$(\Sigma Y)_{2m} \leq \alpha (10 + P_0/3), \quad (3)$$

gdzie:

P_0 — nacisk zestawów kół,

$\alpha = 1$ dla zespołów trakcyjnych i wagonów pasażerskich, siły wyrażone są w kN.

$Q_{gr} \leq 160$ kN	gdy $V \geq 300$ km/h
170 kN	$V = 250 \div 300$ km/h
180 kN	$V = 200 \div 250$ km/h
190 kN	$V = 160 \div 200$ km/h
200 kN	$V \leq 160$ km/h.

Drugi czynnik obejmuje wymuszenie dynamiczne w postaci a_{rp} — przyspieszenia odśrodkowego działającego na pasażera, oraz wymuszenie kinematyczne związane z odchyleniem od pionu głównej osi postaci człowieka wskutek przechyłki toru oraz dodatkowo — w niektórych przypadkach — wskutek przechyłu nadwozia. Wielkość tych wymuszeń i ich przebieg w czasie decydują o samopoczuciu pasażera, w niekorzystnych sytuacjach powodując pewne zakłócenia funkcjonowania jego organizmu, utratę równowagi, a nawet objawy choroby morskiej. Skutki wymienionych wymuszeń są trudne do jednoznacznego ujęcia ilościowego, ponieważ zależą od indywidualnych cech organizmu ludzkiego. Tym można tłumaczyć stosunkowo małą liczbę publikacji na ten temat.

Niemniej jednak z dostępnych informacji wynika, że problem może nastęrczać pewnych trudności w eksploatacji pociągów z wagonami o przechylnych nadwoziach. Z drugiej strony ma on istotne znaczenie dla możliwości zwiększenia prędkości jazdy pociągów w łuku w przypadku taboru konwencjonalnego.

Zaznaczyć należy, że podczas jazdy pociągu w łuku na pasażera oddziałują również drgania związane z głównym ruchem pojazdu w torze. Nakładają się one na wspomniane uprzednio wymuszenia i w ten sposób łącznie decydują o poziomie komfortu jazdy.

W dalszej części referatu przedstawione będą zagadnienia związane ze wspomnianym wymuszeniem dynamicznym i kinematycznym.

2. PRZYŚPIESZENIE ODSRODKOWE ODDZIAŁYWAJĄCE NA PASAŻERA

Komfort jazdy pasażerów jest złożonym odczuciem, wywieranym na pasażera przez ruchy pudła pojazdu szynowego, transmitowane na cały organizm człowieka poprzez podłogę, siedzisko i oparcie fotela.

Odczucie to może być klasyfikowane jako:

- odczucie średnie: bazujące na drganiach o ciągłej ekspozycji występujących w dłuższym okresie czasu (przynajmniej kilka minut),
- odczucie chwilowe: nagła zmiana średniego odczucia, wynikająca z krótkotrwałych impulsów przyspieszenia (zmiana wartości średniego przyspieszenia poprzecznego, kołysanie przy znacznej prędkości, poprzeczne szarpnięcia z możliwymi oscylacjami).

Oba typy odczuć brane są pod uwagę w obliczeniach komfortu średniego. Drugi typ odczuć jest brany pod uwagę w przypadku komfortu chwilowego w krzywych przejściowych i łukach.

Prace związane z metodami określenia średniego komfortu są prowadzone wspólnie przez koleje europejskie od wielu lat [2]. Na podstawie tych prac przygotowano Kartę UIC 513, w której znaleźć można metody obliczeń wskaźników komfortu jazdy (N_{MV} , N_{VA}) na podstawie pomiaru odpowiednich przyspieszeń. Prace dotyczące komfortu chwilowego prowadzone były tylko przez koleje brytyjskie [2, 6], a więc można stwierdzić, że w chwili obecnej doświadczenia większości kolei europejskich w metodach obliczania wskaźników komfortu chwiło-

wego nie są wystarczające. Określenie takiego wskaźnika ma bardzo istotne znaczenie przy najmniej z dwu powodów:

- służyć on może do określenia możliwości zwiększenia prędkości jazdy konwencjonalnego taboru w łukach i krzywych przejściowych,
- pozwoli na określenie możliwości stosowania taboru z wychylnym pudłem w miejsce taboru konwencjonalnego.

W roku 1997 wprowadzono normę europejską [3] dotyczącą oceny komfortu podróży. W części nieobowiązkowej tej normy określono metody oceny komfortu jazdy w krzywych przejściowych. Jako ocenę procentowej ilości osób niezadowolonych przyjęto wskaźnik P_{CT} definiowany jako:

$$P_{CT} = (A \ddot{y} + B \ddot{y} - C) + D \vartheta^{1.1}, \quad (4)$$

gdzie:

\ddot{y} — maksymalna wielkość przyspieszenia poprzecznego pudła pojazdu uśredniana dla 1 sekundy (z przesunięciem $1/10$ sekundy), w odstępie czasu pomiędzy początkiem krzywej przejściowej i jej końcem — +1,6 sekundy,

\ddot{y} — maksymalna pochodna przyspieszenia poprzecznego, pomiędzy dwoma punktami oddalonymi od siebie o 1 sekundę,

ϑ — maksymalna bezwzględna prędkość kołysania pudła, uśredniona dla 1 sekundy z przesunięciem $1/10$ sekundy.

Z uwagi na specyficzną metodykę badań przyjętych do określenia wskaźnika P_{CT} (jazdy z przyspieszeniami odśrodkowymi w płaszczyźnie toru a_{rt} — do $1,8 \text{ m/s}^2$) w CNTK przeprowadzono badania komfortu jazdy w łukach i krzywych przejściowych [4] mające na celu:

- weryfikację metody podanej w ww. normie do warunków PKP (jazdy z przyspieszeniami odśrodkowymi w płaszczyźnie toru a_{rt} — do $1,0 \text{ m/s}^2$).
- określenie innych parametrów wpływających na odczucie komfortu.

Przeprowadzone na PKP badania pozwoliły na stwierdzenie, że komfort w krzywych przejściowych zależy w sposób bezpośredni od dwu czynników:

- maksymalnej wartości przyspieszenia poprzecznego,
- prędkości kołysania pudła.

Dodatkowo przeprowadzone badania wykazały, że dla linii o dużej ilości łuków i krzywych przejściowych wpływ na średni komfort mają również takie parametry, jak:

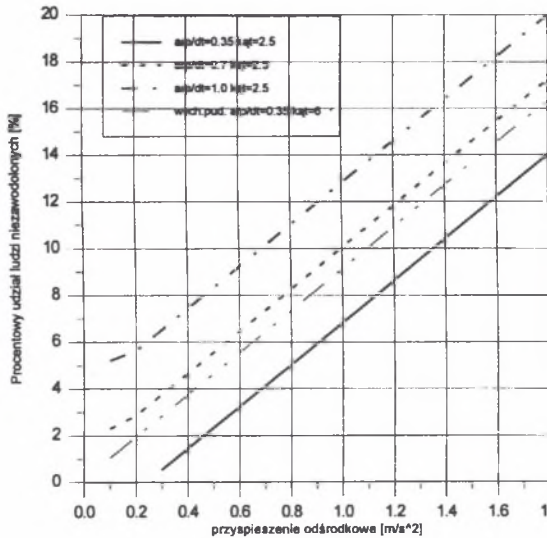
- prędkość kołysania pudła,
- prędkość zmiany poprzecznego przyspieszenia.

Na podstawie danych pomiarowych oszacowano maksymalne wartości parametrów oddziałujących na pasażera (dla taboru konwencjonalnego). Na rysunku 1 przedstawiono ich wpływ na ocenę komfortu podróży podstawiając do wzoru na wartość wskaźnika P_{CT} odpowiednie wartości przyspieszeń zarejestrowane podczas badań. Dla porównania przedstawiono także wykres dla taboru z przechylnym nadwoziem. Analiza wyników pozwala na stwierdzenie, że prędkość zmiany przyspieszenia odśrodkowego nie ma zasadniczego wpływu na odczucie komfortu podróży.

Przeprowadzone badania wykazały że dla przyspieszenia odśrodkowego a_{rp} — do $1,2 \text{ m/s}^2$ pasażerowie nie odczuwali dyskomfortu (maksymalna ocena wynosiła 4 w pięciostopniowej skali odczucia). Potwierdzają to również dane opracowania UIC [5].

Przeprowadzone metodą regresji analizy pozwoliły na wyprowadzenie formuły opisującej komfort w krzywych przejściowych według następującej zależności:

$$\text{Komfort} = 0,39 N_{VA} + 1,27 a_{rp} + 0,35 \vartheta - 0,07. \quad (5)$$



Rys. 1
Fig.1

Porównanie badań na taborze z przechylnym nadwoziem i taborze konwencjonalnym wskazuje, że dla taboru z przechylnym nadwoziem na odczucie komfortu decydujący wpływ ma prędkość obrotu pudła, natomiast dla taboru konwencjonalnego przyspieszenie odśrodkowe.

3. PRZYŚPIESZENIA W PŁASZCZYŹNIE TORU, SZYBKOŚĆ ZMIANY PRZYŚPIESZEŃ, PRĘDKOŚĆ WZNIOSU KOŁA

Dopuszczalna wartość przyspieszenia w płaszczyźnie toru określona jest dwoma czynnikami:

- granicznym oddziaływaniem na tor — wg zależności jak w rozdz. 1,
- przyspieszeniem, jakiemu może być poddany pasażer.

Między masą przypadającą na zestaw kół a dopuszczalnym przyspieszeniem istnieje niewątpliwie pewna współzależność, jest ona jednak trudna do ogólnego ustalenia, ponieważ istotnym czynnikiem w tym względzie jest konstrukcja układu biegowego pojazdu.

W przypadku pociągu kolei FS – ETR 450, który wykazuje masę 12,5 t przypadającą na zestaw kół, dopuszcza się następujące przyspieszenia odśrodkowe w płaszczyźnie toru a_{rt} :

- 1,7 m/s² — dla R 250 ÷ 300 m,
- 1,8 m/s² — dla R 300 ÷ 400 m,
- 2,0 m/s² — dla R 400 ÷ 500 m.

W przypadku nowoczesnych lokomotyw elektrycznych, np. SBB-460, ÖBB-1044, RENFE-S252, DB-101 — przy masie przypadającej na zestaw kół sięgającej 21,5 t dopuszczalne przyspieszenia kształtują się na poziomie 1,5 ÷ 1,6 m/s².

Dla pojazdów z przechylnym nadwoziem spełniony jest i drugi warunek, ponieważ zgodnie z zależnością:

$$\mathbf{a}_{rp} = \mathbf{a}_{rt} - \mathbf{g} \sin \gamma, \quad (6)$$

przy rzeczywistym kącie przechyłu nadwozia — $\gamma = 6,5^\circ$ ($8^\circ - 1,5^\circ$ przechyłu przeciwnego) przyspieszenie oddziałujące na pasażera wynosi — $0,8 \text{ m/s}^2$.

Dla pojazdów konwencjonalnych, przy założeniu że przyspieszenie, jakiemu poddany jest pasażer, wynosi $1,2 \text{ m/s}^2$ — przyspieszenie w płaszczyźnie toru nie może przekroczyć 1 m/s^2 , ponieważ:

$$\mathbf{a}_{rp} = \mathbf{a}_{rt} (1 + k) \quad (7)$$

gdzie dla nowoczesnych wózków $k \approx 0,2$.

W przypadku przyjmowanych przez PKP $\mathbf{a}_{rt} = 0,6 \text{ m/s}^2$; \mathbf{a}_{rp} nie przekroczy wartości — $0,72 \text{ m/s}^2$.

Istotnym czynnikiem w przebiegu opisywanych zjawisk zarówno ze względu na wielkość oddziaływania pojazdu na tor, jak i samopoczucie pasażera jest szybkość zmiany przyspieszeń. W przypadku pojazdu z przechylnym nadwoziem zmianę przyspieszenia działającego na pasażera określa zależność:

$$\dot{\mathbf{a}}_{rp} = \dot{\mathbf{a}}_{rt} - \mathbf{g} \dot{\sin} \gamma. \quad (8)$$

Przy zazwyczaj przyjmowanych w tym przypadku wartościach $\dot{\mathbf{a}}_{rt} = 0,5 \div 0,6 \text{ m/s}^3$, $\dot{\mathbf{a}}_{rp}$ — nie przekracza $0,3 \text{ m/s}^3$, którą to wartość uznaje się za dopuszczalną [5, 6, 7].

Dla pojazdu konwencjonalnego przyjmuje się, że szybkość przyrostu przyspieszenia $\dot{\mathbf{a}}_{rp}$ powinna się zawierać w granicach $0,5 \div 0,8 \text{ m/s}^3$ [5], a tym samym wartość $\dot{\mathbf{a}}_{rt}$ — w granicach $0,4 \div 0,7 \text{ m/s}^3$. W przypadku nowszych konstrukcji $\dot{\mathbf{a}}_{rt}$ przyjmuje się równe $0,6 \text{ m/s}^3$ [5], w przypadku pojazdów z przechylnym nadwoziem, jak i konwencjonalnych.

Trzecim czynnikiem istotnym dla oceny zjawisk jazdy pociągu w łuku jest prędkość wzniosu koła w czasie jazdy przez krzywą przejściową. Czynnikiem ten decyduje o wielkości nadwyżki dynamicznej siły pionowej między kołem a szyną, jak również współdecyduje o prędkości obrotu postaci pasażera. W nawiązaniu do tej ostatniej sprawy trzeba nadmienić, że w przypadku pojazdu z przechylnym nadwoziem obrót postaci pasażera następuje o kąt $\sim 16^\circ$. Zbyt duża prędkość obrotu może wywoływać objawy choroby morskiej, zwłaszcza w przypadku występujących często przeciwluków. W związku z tym przyjmuje się, że średnia prędkość obrotowa przechyłu nadwozia nie powinna przekraczać $4^\circ/\text{s}$ [7], a prędkość wzniosu koła wynosi 40 mm/s . Wykres na rys. 2 pokazuje na współzależność między parametrami: \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{a}}_{rt}$, $\dot{\mathbf{a}}_{rp}$, $\dot{\gamma}$ i czasem przejazdu przez krzywą przejściową — t , przy $\mathbf{a}_{rt} = 1,8 \text{ m/s}^2$. Przyjęcie $\mathbf{u} = 40 \div 50 \text{ mm/s}$ — zapewnia utrzymanie innych parametrów w dopuszczalnych granicach.

Podobną zależność dla pojazdu konwencjonalnego przedstawia wykres na rys. 3. W tym przypadku wartość graniczna \mathbf{u} wynosi 50 mm/s [5]. Szybkość wzrostu przyspieszeń \mathbf{a}_{rt} i \mathbf{a}_{rp} jest w granicach wspomnianej wartości \mathbf{u} daleka od wartości dopuszczalnych. Nadmienić należy, że dotychczas ta wartość w opracowaniach krajowych przyjmowana jest jako $30 \div 35 \text{ mm/s}$, a zatem znacznie poniżej wartości uwzględnianych dla nowoczesnego taboru kolei Europy Zachodniej.

Parametr \mathbf{u} ma zasadniczy wpływ na długość krzywej przejściowej l_p lub ograniczenie prędkości jazdy w łuku przy zbyt krótkiej krzywej przejściowej [8].

Przykładowo można przytoczyć, że:

pojazd konwencjonalny

pojazd z przechylnym nadwoziem

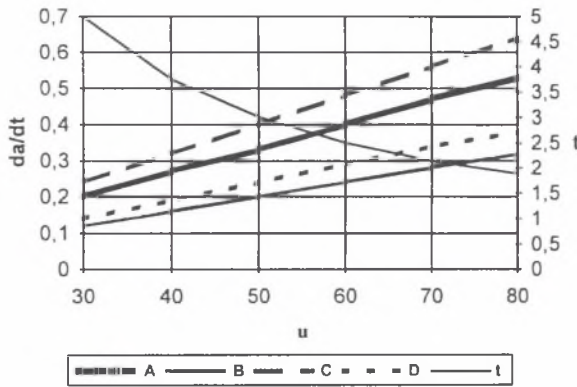
dla $u = 30$ mm/s $l_p = 6,29 \sqrt{R}$

$l_p = 8,61 \sqrt{R}$

dla $u = 40$ mm/s $l_p = 3,77 \sqrt{R}$

$l_p = 6,46 \sqrt{R}$

gdzie: R — promień łuku.

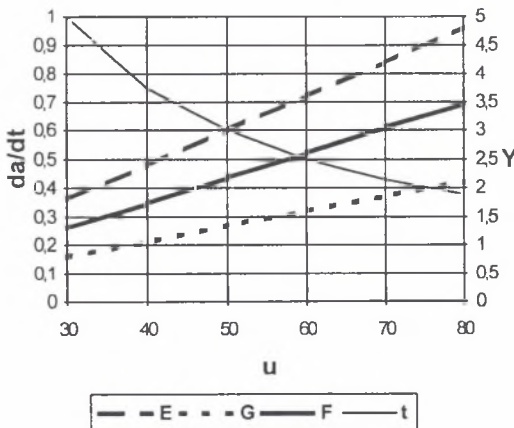


Rys.2
Fig.2

A — \dot{a}_{rt1} [m/s³];
C — \dot{a}_{rp1} [m/s³];
dla $a_{rt1} = 1$ m/s²

B — \dot{a}_{rt2} [m/s³];
D — \dot{a}_{rp2} [m/s³];
dla $a_{rt2} = 0,6$ m/s²

t [s]; **u** [mm/s];
 $h = 150$ mm



Rys.3
Fig.3

E — \dot{a}_{rt} [m/s³];
G — \dot{a}_{rp} [m/s³];
F — $\dot{\gamma}$ [°/s]

u [mm/s];
Y — $\dot{\gamma}$ [°/s] lub — t [s]
 $h = 150$ mm
 $\gamma_m = 6,5^0$
 $a_{rt} = 1,8$ m/s²

4. UWAGI KOŃCOWE

1. Na możliwą do osiągnięcia prędkość pociągu w łuku wpływa nie tylko dopuszczalne przyspieszenie odśrodkowe w płaszczyźnie toru oraz oddziaływające na pasażera, ale również szybkość zmian tych przyspieszeń, prędkość obrotu nadwozia, a zwłaszcza prędkość wzniosu koła podczas jazdy po krzywej przejściowej.

Czynniki te mogą mieć znaczny wpływ na zakres modernizacji krzywych przejściowych, a tym samym na koszty modernizacji linii.

2. Zwiększenie dopuszczalnej wartości przyspieszenia oddziaływającego na pasażera stwarza możliwość powiększenia prędkości jazdy pociągu w łuku pociągu z wagonami konwencjonalnymi, bez potrzeby zasadniczej modernizacji profilu linii w płaszczyźnie poziomej.

3. Różnice między wartościami wspomnianych parametrów, jakie przyjmowane są w analizach prowadzonych na PKP, a przyjmowanymi dla nowoczesnych pojazdów w innych zarządach kolejowych są znaczne, co wskazuje na potrzebę dodatkowych studiów, a nawet specjalnych badań w tym zakresie.

LITERATURA

1. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour, Karta UIC 518, 1997.
2. Effects of vibration on passengers and drivers. Application of the ISO and CEN standards concerned, Komitet ERRI B 207, Spr. 2, 1997
3. European Prestandard – Railway applications – Ride comfort for passengers – measurement and evaluation, Norma CEN, PENF 12299, 1996.
4. Groll W.: Comfort on curves and curve transitions, Praca CNTK 8602/21, 1996.
5. Die Zulassung von zugspezifischen höheren Bogengeschwindigkeiten. Sprawozdanie UIC – C7, 1991.
6. Bogies with steered or steering wheelsets, Komitet ORE B 176, Spr. 1, 1989.
7. Kottenhanh V.: NEITEC — Systeme im Vergleich, ETR nr 1/2, 1993.
8. Koc W.: Graniczne prędkości jazdy taboru z wychylnymi nadwoziami w łukach linii kolejowych, Problemy Kolejnictwa, z. 124, 1997.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jerzy Madej

Abstract

Factors influencing permissible speed of passenger train in curve such as noncompensated lateral acceleration to which the passenger are subjected, noncompensated lateral acceleration in the track plane, jerk, vertical speed of wheel lift and car body roll speed are described in this paper.

Results of CNTK measurements as well as relevant data for newly built rolling stock on different railways are presented. Correlation of those data is shown on diagrams. Special attention was given to the differences between values adopted by PKP for the new rolling stock and those established by other railways and resulting necessity of special analysis that respect.