

Zagadnienia teoretyczne dynamiki pociągów z przechylnym nadwoziem

Pociągi z przechylnym nadwoziem mają długą i bogatą historię, począwszy od studiów teoretycznych, przez pierwsze jazdy doświadczalne do eksploatacji handlowej. Technologia przechylnego nadwozia została opracowana przez kolej i była nierozdzielnie związana z rozwojem technologii produkcji taboru kolejowego, jak i zmianami organizacyjnymi w technologii produkcji.

Podstawowymi kryteriami, jakie należy brać pod uwagę przy określaniu prędkości przejazdu przez łuk, są:

- komfort pasażera i niedomiar przechyłki,
- wytrzymałość poprzeczna toru,
- wykolejenie,
- przewrócenie pojazdu.

Ostatnie dwa kryteria są najważniejsze dla bezpieczeństwa jazdy pociągów, pierwsze dwa określają parametry eksploatacji pociągów z przechylnym nadwoziem.

Analiza procesów dynamicznych, zachodzących w chwili przejazdu pociągu z przechylnym nadwoziem przez łuk, może być przeprowadzona quasi-statycznie, przy przyjęciu następujących założeń:

- łuk toru jest idealnym łukiem okręgu,
- pociąg jest pociągiem „idealnym”.

Przy przeprowadzaniu analizy tego typu pomija się wszystkie niedoskonałości toru, systemu współpracy pociąg – tor, takie jak nierówności ułożenia toru, odchylenia wartości przechyłek, nieregularność sztywności toru, płaskie miejsca zestawów kołowych itp., które mogą powodować zwiększenie wartości sił koło – szyna i wywoływać losowo zmienne przyspieszenia oddziałujące na nadwozie, obok sił quasi-statycznych i przyspieszeń o stałych wartościach. W odniesieniu do pociągów z przechylnym nadwoziem, przyjęto założenia odnoszące się do wszystkich eksploatowanych systemów dla pociągów:

- 1) z pasywnym systemem przechyłu nadwozia, których środek ciężkości jest umieszczony poniżej płaszczyzny zawieszenia usprężynowania drugiego stopnia;

- 2) z aktywnym systemem przechyłu nadwozia, których środek ciężkości jest umieszczony powyżej płaszczyzny zawieszenia usprężynowania drugiego stopnia; pociągi tego typu można podzielić na dwie kategorie z uwagi na umieszczenie ich mechanizmu przechyłu:

- powyżej usprężynowania drugiego stopnia,
- poniżej usprężynowania drugiego stopnia.

Przedstawiona analiza rozpatruje zasadniczo nierównoważone przyspieszenie boczne, wytwarzane na dwóch poziomach:

- toru, inaczej mówiąc między kołem i szyną,
- pasażera, inaczej mówiąc wewnątrz pudła pojazdu powyżej usprężynowania pierwszego i drugiego stopnia (wpływ usprężynowania jest uwzględniony we współczynniku podatności przechyłu).

Boczne przyspieszenie odśrodkowe

W czasie przejazdu pociągu przez łuk bez przechyłki, nadwozie wagonu jest poddane działaniu dwóm rodzajom przyspieszeń, przyłożonych do środka ciężkości nadwozia, mianowicie działaniu:

- przyspieszenia grawitacji ziemskiej g , skierowanego pionowo o zwrocie w dół,
- bocznego przyspieszenia odśrodkowego, skierowanego poziomo o zwrocie na zewnątrz krzywej toru jazdy.

Przyspieszenie to można opisać zależnością:

$$a_e = \frac{V^2}{3,6^2 R} = \frac{V^2}{13 R}$$

gdzie:

- a_e – boczne przyspieszenie odśrodkowe [m/s^2],
- V – prędkość pociągu [km/h],
- R – promień łuku [m].

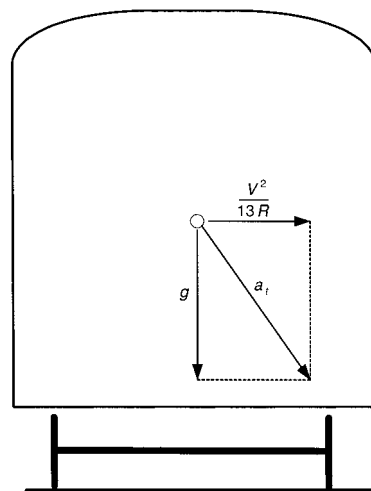
Sytuację tę przedstawiono na rysunku 1.

Całkowite przyspieszenie a_t działające na pojazd jest sumą wektorową tych dwóch przyspieszeń: g i a_e . Pomijając oddziaływanie usprężynowania pojazdu można stwierdzić, że na pasażera oddziałuje przyspieszenie a_t . Boczne przyspieszenie na poziomie główki szyny a_v [m/s^2] jest równe odpowiednio:

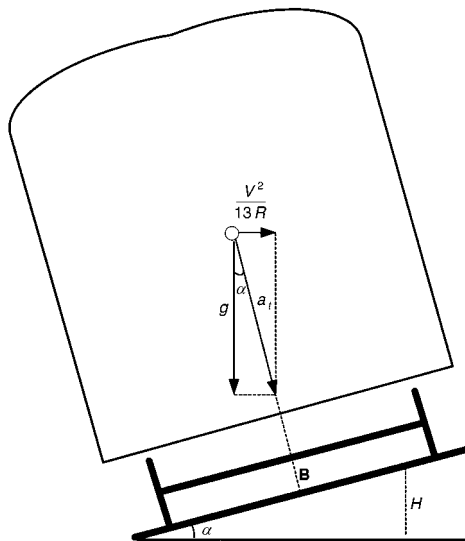
$$a_e = \frac{V^2}{13 R}$$

Przechyłka teoretyczna

Z teoretycznego punktu widzenia wartość przechyłki H_T wytwarza składową przyspieszenia działającą do wewnątrz krzywej toru jazdy, kompensującą przyspieszenie odśrodkowe. Wartość teoretyczną przechyłki określa się dla przypadku, gdy kąt przechylenia toru jest taki, że płaszczyzna toru jest prostopadła do wektora całkowitego przyspieszenia oddziałującego na nadwozie pojazdu a_t (rys. 2).



Rys. 1. Przyspieszenia działające na pojazd podczas przejazdu przez łuk



Rys. 2. Przyspieszenia działające na pojazd podczas jazdy po łuku o przechyłce teoretycznej

gdzie:

H – przechyłka toru [mm],

B – rozstaw okręgów tocznych zestawów kołowych, dla toru szerokości 1435 mm wartość B przyjmuje się 1500 mm.

Ogólnie rzecz biorąc przechyłka maksymalna wynosi 160 mm, maksymalny kąt przechyłu – 6° (0,105 rad), co potwierdza przyjęcie uproszczenia o równości wartości argumentu funkcji i wartości funkcji tg i \sin dla małych kątów.

Przyspieszenie boczne na poziomie główki szyny znajduje się w płaszczyźnie szyn (które w rozpatrywanym przypadku przechyłki teoretycznej H_T jest w pełni skompensowane i ma wartość równą zero), można opisać wyrażeniem:

$$a_v = \frac{V^2}{13R} - g \frac{H_T}{B} = 0 \quad [\text{m/s}^2]$$

Skąd wynika, że:

$$H_T = \frac{V^2}{13R} \cdot \frac{B}{g} \quad [\text{mm}]$$

W rozważaniach teoretycznych, pomijających wpływ usprężynowania nadwozia, można stwierdzić, że pasażer będzie odczuwał nieznaczne zwiększenie masy swojego ciała w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny toru, lecz nie będzie odczuwał żadnej siły poprzecznej w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny toru.

Niezerównoważone przyspieszenie boczne na poziomie główki szyny

Rzeczywista wartość przechyłki toru H różni się od wartości teoretycznej H_T , powodując wystąpienie wartości niezerównoważonego przyspieszenia boczno na poziomie główki szyny a_v , działającego w płaszczyźnie toru o wartości:

$$a_v = \frac{V^2}{13R} - g \frac{H}{B} \neq 0 \quad [\text{m/s}^2]$$

Kąt teoretycznego przechylenia toru α jest zdefiniowany wyrażeniem:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V^2}{13Rg}$$

Dla małych kątów przyjmuje się, że:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha = \alpha$$

przy czym miara kąta α wyrażona jest w radianach.

Po uproszczeniu można otrzymać:

$$\operatorname{tg} \alpha \cong \sin \alpha = \frac{H}{B}$$

Niedomiary przechyłki

Gdy niezerównoważone przyspieszenie boczne na poziomie główki szyny a_v przyjmuje wartość dodatnią (inaczej mówiąc jest skierowane na zewnątrz krzywej toru jazdy), niedomiary przechyłki J [mm] określa się jako różnicę między wartością teoretyczną przechyłki H_T i rzeczywistą przechyłką H :

$$J = H_T - H \quad [\text{mm}]$$

W tych warunkach koła pojazdu mają tendencję do wywierania nacisku skierowanego na zewnątrz krzywej toru jazdy, działającego na szynę zewnętrzną.

Zależność między wartością niezerównoważonego przyspieszenia boczno na poziomie główki szyny a_v a niedomiarem przechyłki J wyraża się następująco:

$$a_v = g \frac{J}{B}$$

Najczęściej używana jest zależność:

$$V = K \sqrt{R}$$

która określa zależność między największą prędkością dopuszczalną V podczas przejazdu przez łuk o promieniu R ; wartość współczynnika K określa się ze wzoru:

$$K = 3,6 \sqrt{a_v + g \frac{H}{B}}$$

Stąd na przykład, jeżeli $a_v = 0,65 \text{ m/s}^2$, $H = 160 \text{ mm}$, a $B = 1500 \text{ mm}$, to $K \cong 4,7$. W konsekwencji otrzymuje się:

$$V = 4,7 \sqrt{R}$$

gdzie:

R określone jest w [m], a V w [km/h]. W tym przypadku niedomiary przechyłki $J \cong 100 \text{ mm}$.

Nadmiary przechyłki

W przypadku przeciwnym do opisanego powyżej, gdy niezerównoważone przyspieszenie boczne na poziomie główki szyny a_v przyjmuje wartość ujemną (inaczej mówiąc jest skierowane do wewnątrz krzywej toru jazdy), nadmiary przechyłki E [mm] określa się jako różnicę między wartością teoretyczną przechyłki H_T i wartością rzeczywistą przechyłki H :

$$E = H - H_T \quad [\text{mm}]$$

W tych warunkach koła pojazdu mają tendencję do wywierania nacisku skierowanego do wewnątrz krzywej toru jazdy, działającego na szynę wewnętrzną.

Zależność między wartością niezerównoważonego przyspieszenia boczno na poziomie główki szyny a_v a nadmiarem przechyłki E wyraża się następująco:

$$-a_v = g \frac{E}{B}$$

Jeżeli na przykład pociąg znajduje się na krzywej o przechyłce $H = 160 \text{ mm}$ i $B = 1500 \text{ mm}$, wówczas nadmiary przechyłki wyniesie $E = 160 \text{ mm}$, wartość niezerównoważonego przyspieszenia boczno na poziomie główki szyny

będzie ujemna i wyniesie $a_v = -1,05 \text{ m/s}^2$, oddziałującego do wewnątrz krzywej toru jazdy.

Wytrzymałość poprzeczna toru

Jest oczywiste, że podczas jazdy pociągu po łuku siły poprzeczne generowane przez tabor nie mogą przekraczać wartości dopuszczalnych wytrzymałości poprzecznej toru.

Zależność matematyczna, opisująca to wymaganie przyjmuje postać:

$$\left[\frac{PV}{1000} + \frac{P}{g} \left(\frac{V^2}{R} - \frac{H}{B} g \right) \right] \leq K \left(1 + \frac{P}{3} \right)$$

gdzie:

P – nacisk zestawu kołowego na szynę,

V – prędkość pojazdu [m/s],

R – promień łuku toru [m],

B – rozstaw szyn [m],

K – stała zależna od wzmocnienia toru,

H – przechyłka toru [mm].

Biorąc pod uwagę zależność opisującą prędkość maksymalną można uzyskać równanie postaci:

$$\left(\frac{PV}{1000} + \frac{PJ}{B} \right) \leq K \left(1 + \frac{P}{3} \right)$$

Na podstawie tej zależności można wyznaczyć wartość prędkości dopuszczalnej; zależność ta dla rozstawu szyn 1435 mm przyjmuje postać:

$$V = \left(500 + \frac{2250}{P} - J \right) \frac{1}{1,5}$$

W praktyce zależność ta jest stosowana przez koleje SNCF zarówno do pociągów TGV o nacisku 16 t/oś, jak i dla pociągów konwencjonalnych o nacisku 20 t/oś. Zależność między naciskiem na oś i dopuszczalnym niedomiarem przechyłki z uwagi na wytrzymałość poprzeczną toru przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Zależność między naciskiem na oś i dopuszczalnym niedomiarem przechyłki z uwagi na wytrzymałość poprzeczną toru stosowana na kolejach SNCF

Nacisk na oś P [t]	Prędkość [km/h]			
	150	200	250	300
Niedomiąg przechyłki [mm]				
14	435	360	285	210
16	415	340	265	190
20	387	312	237	162

Analiza oddziaływania na pasażera

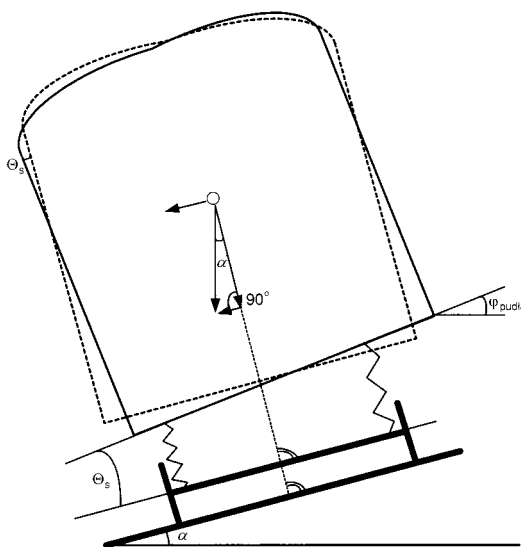
Analiza oddziaływania na poziomie pasażera lub na poziomie pudła pojazdu rozpatruje wpływ usprężynowania pojazdu i fakt, że pojazd jest pojazdem o konstrukcji konwencjonalnej lub jest pojazdem z przechylnym nadwoziem o pasywnym lub aktywnym systemie przechyłu. Wzór wynikowy będzie uwzględniał wpływ charakterystyki usprężynowania

pojazdu, określoną przez współczynnik podatności przechyłu dla przechylnego nadwozia.

Współczynnik podatności przechyłu

Współczynnik podatności przechyłu pojazdu jest bardzo przydatny podczas analizy zachowania usprężynowania podczas przejazdu pociągi przez łuki.

Do przedstawienia idei współczynnika podatności przechyłu należy rozpatrzyć pojazd położony stacjonarnie pośrodku łuku, co przedstawiono na rysunku 3. Z uwagi na przechyłkę toru, pojazd przyjmuje położenie równowagi, określone przez ruch obrotowy i ruch pojazdu w kierunku wewnętrznym do krzywej toru jazdy.



Rys. 3. Przechylenie nadwozia podczas jazdy po łuku

Współczynnik podatności przechyłu S jest określony jako stała proporcjonalna do kąta przechylenia nadwozia Θ_s odniesiona do kąta nachylenia toru α :

$$S = \frac{\Theta_s}{\alpha}$$

Współczynnik podatności przechyłu przyjmuje wartości dodatnie dla pociągów konwencjonalnych bez przechylnego nadwozia i dla pociągów z przechylnym nadwoziem, wyposażonych w aktywny system przechyłu. Dla pociągów z przechylnym nadwoziem wyposażonych w pasywny system przechyłu wartość tego współczynnika jest ujemna.

Wartość współczynnika S może zmieniać się od 0 dla pojazdu o idealnym systemie usprężynowania do ok. 0,4 dla pojazdów o bardzo elastycznym usprężynowaniu. Dla pociągów z przechylnym nadwoziem wyposażonych w pasywny system przechyłu o elastycznym usprężynowaniu wartość tego współczynnika może być równa $-0,4$.

Całkowity kąt przechyłu nadwozia względem poziomu można określić jako:

$$\Phi_{\text{nadw}} = \alpha + \Theta_s = \alpha + S\alpha = (1+S)\alpha$$

Współczynnik S odnosi się do całego systemu usprężynowania nadwozia, które zazwyczaj składa się z dwóch stop-

ni: usprężynowania pierwszego i drugiego stopnia. W niektórych przypadkach należy rozpatrywać współczynnik podatności przechyłu dla każdego stopnia usprężynowania indywidualnie, jako S_1 dla usprężynowania pierwszego stopnia i S_2 dla usprężynowania drugiego stopnia.

Zależność między całkowitym współczynnikiem podatności przechyłu pojazdu S i wartościami dla poszczególnych stopni usprężynowania S_1 i S_2 można przedstawić jako:

$$(1 + S) = (1 + S_1)(1 + S_2)$$

Nieźródnoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera w pojeździe konwencjonalnym

Nieźródnoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera a_p w pojeździe konwencjonalnym jest tym przyspieszeniem, które pasażer odczuwa bezpośrednio jako przyspieszenie poprzeczne. Oddziałuje ono w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny podłogi pojazdu i jest skierowane w kierunku zewnętrznym do krzywej toru jazdy. Współczynnik podatności przechyłu jest szczególnie przydatny w wyznaczeniu wartości a_p jako funkcji nieźródnoważonego przyspieszenia bocznego na poziomie główki szyny a_v , poprzez zastosowanie poniższej zależności w przypadku pociągu konwencjonalnego bez przechyłu nadwozia:

$$a_p = (1 + S) \cdot a_v$$

Jeżeli wartość współczynnika podatności przechyłu pojazdu S jest dodatnia, to nieźródnoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera a_p przyjmie wartość większą niż nieźródnoważone przyspieszenie boczne na poziomie główki szyny a_v . W rzeczywistości pojazd doznaje skutków działania siły odśrodkowej (bezwładności), która działa w kierunku zewnętrznym do krzywej toru jazdy z odkształceniem swojego usprężynowania. Takie przechylone położenie nadwozia pojazdu przeciwdziała skutkom przechyłu toru, zaś a_p jest większe od a_v .

Na przykład dla $S = 0,3$, przy $a_v = 0,65 \text{ m/s}^2$, nadwyżka nieźródnoważonego przyspieszenia bocznego przyjmie wartość $a_p \cong 0,85 \text{ m/s}^2$.

Zależność ta może być także wyrażona jako funkcja współczynników podatności przechyłu poszczególnych stopni usprężynowania, to znaczy:

$$a_p = (1 + S_1)(1 + S_2) \cdot a_v$$

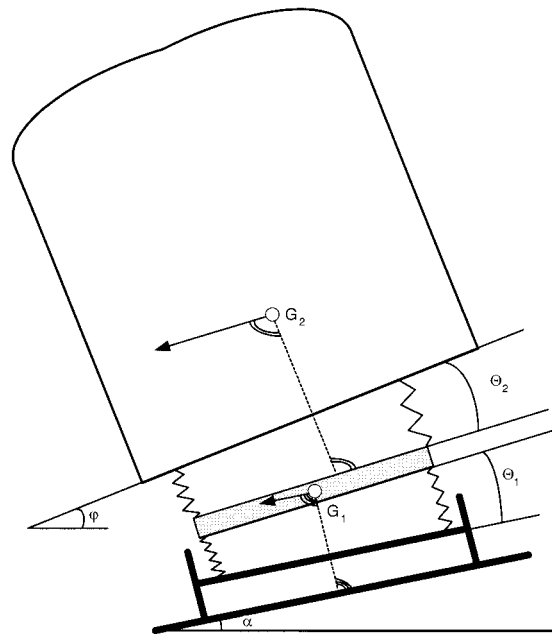
Nieźródnoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera w pojeździe z pasywnym systemem przechyłu nadwozia

W pojeździe z pasywnym systemem przechyłu nadwozia wartość nieźródnoważonego przyspieszenia bocznego na poziomie pasażera a_p jest taka sama jak w poprzednim przypadku, to znaczy:

$$a_p = (1 + S) \cdot a_v$$

Jednak z uwagi na fakt, że całkowity współczynnik podatności przechyłu pojazdu S przyjmuje wartość ujemną, wartość a_p jest większa od a_v , przeciwnie do przypadku pojazdu konwencjonalnego. W rzeczywistości pojazd doznaje skutków oddziaływania siły bezwładności, która w tym przypadku działa w kierunku wewnętrznym do krzywej toru jazdy, zwiększając oddziaływanie przechyłki toru.

Jeżeli na przykład $S = -0,35$, przy $a_v = 1,0 \text{ m/s}^2$, wówczas nadwyżka nieźródnoważonego przyspieszenia bocznego przyjmie wartość $a_p \cong 0,65 \text{ m/s}^2$ (rys. 4).



Rys. 4. Przechylenie nadwozia pojazdu z pasywnym systemem przechyłu podczas jazdy po łuku

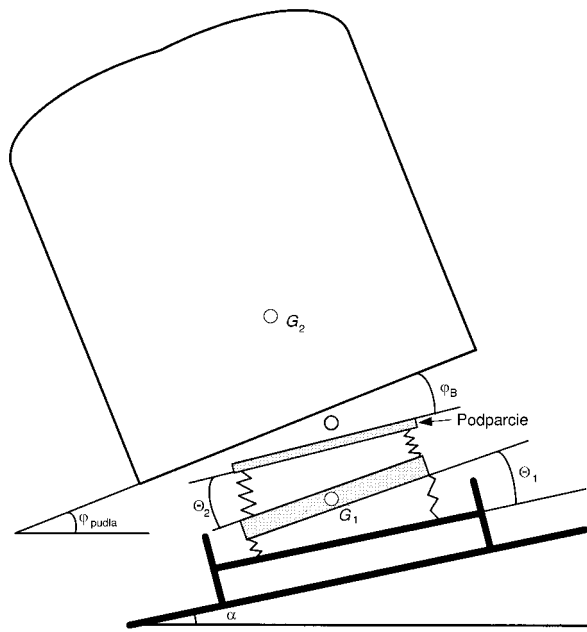
Nieźródnoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera w pojeździe z aktywnym systemem przechyłu nadwozia, umieszczonym powyżej usprężynowania drugiego stopnia

Rozpatrując przypadek pojazdu wyposażonego w dwustopniowe usprężynowanie i aktywny system przechyłu nadwozia, umieszczonym między nadwoziem pojazdu i ruchomym podparciem usprężynowania drugiego stopnia, mechanizm przechyli nadwozie o kąt φ_B (rys. 5). Wartość przyspieszenia a_p można przedstawić jako:

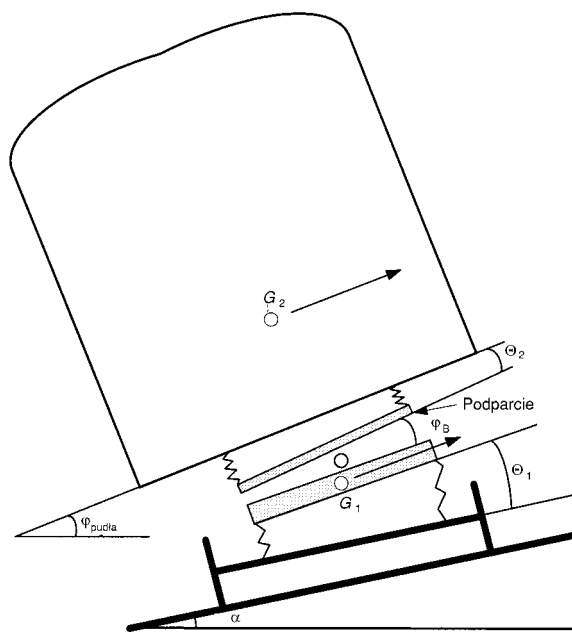
$$\begin{aligned} a_p &= (1 + S_1)(1 + S_2) \cdot a_v - g \cdot \text{tg } \varphi_B = \\ &= (1 + S) \cdot a_v - g \cdot \text{tg } \varphi_B \end{aligned}$$

Z wyrażenia tego wynika, że przyspieszenie odczuwane przez pasażera w pociągu z przechylnym nadwoziem jest równe przyspieszeniu jak w pociągu konwencjonalnym, pomniejszonemu o wartość $g \cdot \text{tg } \varphi_B$.

Przykładowo dla wartości $S = 0,30$, przy $a_v = 1,6 \text{ m/s}^2$ i kącie $\varphi_B = 8^\circ$ nadwyżka nieźródnoważonego przyspieszenia bocznego przyjmie wartość $a_p \cong 0,70 \text{ m/s}^2$.



Rys. 5. Przechylenie nadwozia pojazdu z aktywnym systemem o środku obrotu powyżej usprężynowania drugiego stopnia przechyłu podczas jazdy po łuku



Rys. 6. Przechylenie nadwozia pojazdu z aktywnym systemem o środku obrotu poniżej usprężynowania drugiego stopnia przechyłu podczas jazdy po łuku

Niezerównoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera w pojeździe z aktywnym systemem przechyłu nadwozia, umieszczonym poniżej usprężynowania drugiego stopnia

Rozpatrując przypadek pojazdu wyposażonego w dwustopniowe usprężynowanie i aktywny system przechyłu nadwozia, umieszczonym pomiędzy ruchomym podparciem usprężynowania drugiego stopnia i ramą wózka – czyli poniżej usprężynowania drugiego stopnia, mechanizm przechyli nadwozie o kąt φ_B (rys. 6). Wartość przyspieszenia a_p będzie opisana innym wyrażeniem, bowiem mechanizm przechyłu jest umieszczony w innym miejscu:

$$\begin{aligned} a_p &= (1 + S_1)(1 + S_2) \cdot a_v - (1 + S_2) \cdot g \cdot \operatorname{tg} \varphi_B = \\ &= (1 + S) \cdot a_v - (1 + S_2) \cdot g \cdot \operatorname{tg} \varphi_B \end{aligned}$$

Z tego wyrażenia wynika, że przyspieszenie odczuwane przez pasażera w pociągu z przechylnym nadwoziem jest równe przyspieszeniu jak w pociągu konwencjonalnym, pomniejszonemu o wartość $(1 + S_2) \cdot g \cdot \operatorname{tg} \varphi_B$. Wartość ta jest wniesiona przez kąt przechyłu φ_B i wzmocniona przez oddziaływanie mechanizmu przechyłu, umieszczonego poniżej usprężynowania drugiego stopnia.

Porównanie wyrażen dla obu rozwiązań umieszczenia systemu przechyłu uwidacznia, jak umieszczenie systemu przechyłu poniżej usprężynowania drugiego stopnia wpływa na efektywność, bowiem zmniejsza odkształcenie usprężynowania drugiego stopnia.

Na przykład dla wartości $S = 0,30$; $S_2 = 0,20$; $S_1 = 0,08$, przy $a_v = 1,6 \text{ m/s}^2$ i kącie $\varphi_B = 8^\circ$ nadwyżka niezerównoważonego przyspieszenia bocznego przyjmie wartość $a_p \cong 0,43 \text{ m/s}^2$.

Dopuszczalne wartości bocznego niezerównoważonego przyspieszenia, oddziałującego na pasażera są określane przez zarząd kolejowy. W przypadku kolei francuskich (SNCF) wartości dopuszczalne przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Dopuszczalne wartości bocznego niezerównoważonego przyspieszenia oddziałującego na pasażera określone przez SNCF

Poziom komfortu	Wartość przyspieszenia oddziałującego na pasażera		Szybkość zmienności przyspieszenia działającego na pasażera [m/s ³]
	siedzącego	stojącego	
	[m/s ²]		
Bardzo dobry	1,0	0,85	0,30
Dobry	1,2	1,00	0,45
Dopuszczalny	1,4	1,20	0,70
Wyjątkowo dopuszczalny	1,5	1,40	0,85

Uwagi końcowe

Wyrażenia opisujące niezerównoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera a_p w pojeździe z aktywnym systemem przechyłu nadwozia, będące jednocześnie oceną komfortu pasażera, przedstawiają zależności:

□ dla pociągów konwencjonalnych lub z pasywnym systemem przechyłu nadwozia:

$$a_p = (1 + S) \frac{V^2}{13R} - g \frac{H}{B} = (1 + S) \cdot g \cdot a_v$$

□ dla pociągów z aktywnym systemem przechyłu nadwozia umieszczonym powyżej usprężynowania drugiego stopnia:

$$a_p = (1 + S) \frac{V^2}{13R} - g \frac{H}{B} - g \cdot \operatorname{tg} \varphi_B$$

□ dla pociągów z aktywnym systemem przechyłu nadwozia, umieszczonym poniżej usprężynowania drugiego stopnia:

$$a_p = (1 + S) \frac{V^2}{13R} - g \frac{H}{B} - (1 + S) \cdot g \cdot \operatorname{tg} \varphi_B$$

Wyrażenia te ilustrują wszystkie aspekty, odnoszące się do stanu równowagi quasi-statycznej pojazdu na poziomie pasażera podczas jazdy po łuku, mianowicie:

- prędkość V ,
- geometrię łuku – promień R , przechyłkę H i rozstaw zestawów kołowych B ,
- charakterystyki usprężynowania – współczynniki podatności przechyłu S_1 i S_2 ,
- kąt przechyłu φ_B dla aktywnego systemu przechyłu nadwozia,
- niezrównoważone przyspieszenie boczne na poziomie pasażera a_p .

Wyrażenie opisujące niezrównoważone przyspieszenie boczne na poziomie toru a_v , które jest miarą sił bocznych na styku koło – szyna, jest takie same dla wszystkich typów rozpatrywanych pojazdów, niezależnie czy są wyposa-

żone czy nie w system przechyłu nadwozia. Jest ono opisane zależnością:

$$a_v = \frac{V^2}{13R} - g \frac{H}{B}$$

Wyrażenie to określa wszystkie aspekty, odnoszące się do stanu równowagi quasi-statycznej pojazdu na poziomie główki szyny podczas jazdy po łuku, a mianowicie:

- prędkość V ,
- geometrię łuku – promień R , przechyłkę H i rozstaw okręgów tocnych zestawów kołowych B ,
- niezrównoważone przyspieszenie boczne na poziomie toru a_v .

Z przedstawionych rozważań wynika, że stan równowagi quasi-statycznej pojazdu na poziomie główki szyny podczas przejazdu przez łuk jest niezależny od wyposażenia pojazdu w system przechyłu nadwozia, natomiast jest uzależniony od charakterystyki usprężynowania pojazdu.

Zarządy kolejowe eksploatujące pociągi z przechylnym nadwoziem nie mają dotychczas ujednoczonych kryteriów utrzymania infrastruktury drogi kolejowej. Niemniej jednak

Wymagania zarządów kolejowych w odniesieniu do infrastruktury kolejowej

Zagadnienie	Jednostki i wymagania	Wymagania		
		BV/SJ	CD	CFF/SBB
Odporność na boczne przesunięcie		maksymalny niedobór przechyłki 245 mm (wyjątkowo 280 mm)		
Kryterium Prud'homme'a	$\Sigma Y < \alpha(10+2Q/3)$	$\alpha < 0,85$ (w przyszłości $\alpha < 1,00$)	$\alpha = 1,00$	$\alpha = 0,85$
Konstrukcja toru	szyna	BV 50 i UIC 60	UIC 60	UIC 54/60
	podkłady	betonowe	betonowe	wszystkie rodzaje
	mocowanie	Pandrol, Reifliant	Pandrol Reifliant, K	K, Ack, W
Wzmocnienie poprzeczne		nie stosowane	kotwiczenie podkładów na łukach o promieniach < 300 m wzmocnienie profilu podsypki na łukach o promieniach < 600 m	w zależności od toru
Postępowanie w okresie stabilizacji toru	ograniczenie prędkości i/lub inne środki	ograniczenie prędkości i/lub stabilizacja dynamiczna	$v < 50$ km/h w okresie zagęszczania	zwolnienia do 100 000 t
Naprężenia w szynach		brak ograniczeń	brak ograniczeń (z uwagi na zmniejszony nacisk osi)	UIC 518
Naprężenia w przytwierdzeniach szynowych		brak ograniczeń	brak ograniczeń (z uwagi na zmniejszony nacisk osi)	$Y/Q < 0,6$ (średnio)
Inne kryteria naprężeń			brak ograniczeń (z uwagi na zmniejszony nacisk osi)	
Minimalny promień dla niedoboru przechyłki	[m]	290	260	280
Przechyłka maksymalna	[mm]	150	150	150 (wyjątkowo 180)

jest wiele zagadnień, na które zwróciły uwagę wszystkie zarządy kolejowe, eksploatujące ten typ taboru. Operatorzy potwierdzają, że stosują te same kryteria ograniczenia prędkości zarówno w odniesieniu do pociągów konwencjonalnych, jak i z przechylnym nadwoziem. Stosowane jest kryterium Prud'homme'a w odniesieniu do przesunięcia poprzecznego z uwzględnieniem rodzaju podtorza, podkładów drewnianych etc.

W kryterium Prud'homme'a:

$$\Sigma Y = \alpha \left(10 + \frac{P}{3} \right)$$

gdzie:

ΣY – całkowite siły poprzeczne oddziałujące na tor [kN],

P – nacisk na oś [kN].

Współczynnik α przyjmuje wartości z przedziału od 0,85 do 1,00. Zestawienie wymagań zarządów kolejowych przedstawiono w tabelicy 3. W ramach harmonizacji wymagań planowane jest przyjęcie przez UIC wartości $\alpha = 1,0$ zwłaszcza w odniesieniu do pociągów pasażerskich. Zarządy

kolejowe nie stosują dodatkowych środków zwiększających odporność toru na przesunięcia poprzeczne, spowodowane eksploatacją pociągów z przechylnym nadwoziem. Należy jednak pamiętać, że ograniczenia prędkości są nakładane przed zakończeniem procesu stabilizacji toru (lub przeprowadzeniem przyspieszonej stabilizacji metodami mechanicznymi). Zarządy kolejowe przyjmują jako obciążenie liniowe toru wartość 50 kg/m, z wyjątkiem kolei hiszpańskich (RENFE), które dopuszczają wartość 45 kg/m. Minimalny promień łuku zawiera się w przedziale od 290 m do 500 m, maksymalna dopuszczalna przechyłka – od 150 mm do 170 mm.

W rozważaniach teoretycznych układ toru, normy geometrii i tolerancji są w zasadzie takie same jak dla pociągów konwencjonalnych. W praktyce jednak, z uwagi na fakt, że pociągi z przechylnym nadwoziem poruszają się z prędkościami od 20% do 30% większymi od pociągów klasycznych, wymagania minimalne w odniesieniu do geometrii toru są zaostrzone. Na kontynencie europejskim skrajnia pojazdu jest w zasadzie ujednoczona i zgodna z wymaganiami zawartymi w karcie UIC 505-1 OR, tylko kraje skandynawskie (Szwecja, Finlandia i Norwegia) opracowały własne

Tabela 3

Zarząd kolejowy					
DB AG	FS	RENFE	SNCF	SZ	VR
Czynniki wpływające na ograniczenie prędkości					
kryterium Prud'homme'a					
$\alpha = 1,00$	$\alpha = 1,00$	$\alpha = 1,00$	$\alpha = 1,00$	$\alpha = 1,00$	$\alpha = 0,85$
typowe	UNI 50 i UIC 60	R 45 i UIC 54/60	50-60	S49 i UIC 60	UIC 54/60
zgodne z DS 820	drewniane i betonowe	drewniane i betonowe	betonowe	drewniane i betonowe	betonowe
zgodne z DS 820	Pandrol, K	wszystkie rodzaje	Pandrol Reifliant	Vossloch SKL2/P	Pandrol, Vossloch SKL2
zgodne z DS 820	nie stosowane środki zaradcze	wzmocnienie podsypki	nie stosowane środki zaradcze		wzmocnienie podsypki
jak zwykle	30–80 km/h	ograniczenia prędkości stabilizacja dynamiczna	nie stosowane środki zaradcze		ograniczenia prędkości stabilizacja dynamiczna
jak zwykle	nie stosowane środki zaradcze	UIC 518	nie stosowane środki zaradcze		$R > 300$ m, $Y < 60$ kN $R > 1000$ m, $Y < 55$ kN
jak zwykle	nie stosowane środki zaradcze	brak ograniczeń	nie stosowane środki zaradcze	$Y < 60-70$ kN $Q < 145$ kN (statycznie)	
jak zwykle	nie stosowane środki zaradcze			$Y < 110$ kN $Q < 170$ kN (dynamicznie)	
Parametry ułożenia toru					
300	300/350	250	340	260	500
180	160	160	160	150	160

Zagadnienie	Jednostki i wymagania			
		BV/SJ	CD	CFF/SBB
Zasady ustalenia przechyłki	standardowe kryteria	$H = CV^2/R$ $C = 4,2$	$H = 6,5 V^2/R$ dla $V < 125$ km/h $H = 10 200/R$ dla $V > 125$ km/h	—
Krzywe przejściowe	maksymalny gradient przechyłki	wymagany dla 70 mm/s	2,5 mm dla $V < 80$ km/h 167/V dla $V > 80$ km/h	2 mm/m
	przechyłka w łuku	nie	nie	tak
	krzywa teoretyczna	liniowa	parabola 3. stopnia	klotoida
	długość (wzór)	$L > 4 VH$	$L > 8 VH/1000$	$L > 7,7 VH/1000$ (wyjątkowo 6,7)
	długość minimalna zmiany z uwagi na typ taboru	20 m krzywa przejściowa zwiększona o 20%	$L > 8 VH/1000$ $L > 2,2 VJH/10^3$ (H-13) dla $J < 3 H_d$; $L > 2,2 VJH/10^3$ dla $J < 3,5 H_d$	—
Geometria i tolerancje		jak zwykle	UIC 518	UIC 518
Jakość toru		jak zwykle	UIC 518	jak zwykle
Skrajnia		wymagania SJ	UIC 505-1	UIC 505-1
Ograniczenia prędkości na łukach szczególnych		ograniczenia na zwrotnicach położonych w łuku	$J < 100$ mm dla zwrotnic, $J < 130$ mm dla innych punktów specjalnych	ograniczenie przyspieszenia nierównoważonego a_{nc} na zwrotnicach położonych w łuku i innych słabych punktach
Zmiany w sieci jezdnej		zwiększona wytrzymałość mechaniczna	nie	nie
Zmiany w sygnalizacji kolejowej		zwiększony odstęp między sygnałami ostrzegawczymi ATP i semaforami	AVV	wykresy prędkości w łukach
Specjalne znaczniki wykrywania łuków		nie	nie	w zasadzie nie
Systemy srk		ATP	AVV, LS90, Zub262, INDUSI80, LZB80, Radio	Signum Zub121
Procedury o badań i odbioru linii			w trakcie opracowywania	UIC 518 kat. R lub C
Ochrona przed wykołaceniem		typowa	UIC 518 $Y/Q < 0,8$	UIC 518 $Y/Q < 0,8$
Ochrona przed przewróceniem		dla wiatru bocznego 25 m/s maksymalny niedobór przechyłki 280 mm	w trakcie określania	dla wiatru bocznego 25 m/s maksymalny niedobór przechyłki 280 mm
Istotność kryteriów (w przypadku dużego niedoboru przechyłki)	przesunięcie boczne toru (Prud'homme)		1	1
	przewrócenie		3	2
	wykołacenie		2	3
Tolerancje zużycia zestawów kołowych, obrzeży i innych elementów jezdnych	dopuszczalne wartości maksymalne i rodzaj kontroli	jak dla taboru konwencjonalnego	jak dla taboru konwencjonalnego	jak dla taboru konwencjonalnego
Tolerancje zużycia szyn	dopuszczalne wartości maksymalne i rodzaj kontroli	próby nieniszczące	pionowe 18 mm, w połączeniu: pionowe 14 mm i boczne 18 mm; pomiary wagonem diagnostycznym	jak dla toru konwencjonalnego

Zarząd kolejowy

DB AG	FS	RENFE	SNCF	SZ	VR
przechylka wymagana dla warunków przyspieszenia	$H = 9,1 V^2/R$	$H = C/R$	$H = 7,1 V^2/R$ dla $V < 120$ km/h $H = 6,1 V^2/R$ dla $V < 160$ km/h	$H = 8 V^2/R$	
min 1:6 V_{nt} (1:4 V_{nt} w łukach)	2,5 mm/m	2,5 mm/m	2,1 mm/m	2,5 mm/m	2,1 mm/m
tak	nie	nie	nie	tak	tak
klotoida-s	parabola 3. stopnia	klotoida	krzywa 3. stopnia	parabola 3. stopnia	klotoida
	wymagane dla warunków spokojności	$L > 8 VH$	nie		$L = 3,4 VH/1000$ $H > 69$ mm
				20 m	60 m
—	nie	nie	nie	—	—
jak zwykle	jak zwykle	UIC 518	jak dla pociągów konwencjonalnych, zmniejszone o 1 mm	wymagania SZ	jak zwykle
wymagania DB AG	jak dla kategorii C ($a = 1,0$ m/s ²)	jak zwykle	jak dla pociągów konwencjonalnych, zmniejszone o 1 mm		jak zwykle
UIC 505-1	UIC 505-1	wymagania RENFE	UIC 505-1	UIC 505-1	wymagania VR
nominalna prędkość na łukach z krzywą przejściową i innych słabych punktach	nie	$a_{nc} < 0,65$ m/s ² na krzywej odwrotnej toru	nie	w trakcie ustalania	tak
nie	nie	nie	nie	pełne napięcie mechaniczne sieci dla $v > 120$ km/h	nie
nie	nie	nie	tak	nie	nie
nie	nie	nie	nie	nie	nie
Zub100	RS4, 5 lub 9	typowy	KVB	Indusi i radio	ATP
wymagania DB AG	w trakcie opracowywania	wymagania RENFE	w trakcie opracowywania		zwyczajna kontrola geometryczna
UIC 518	UIC 518	UIC 518 $Y/Q < 0,8$	UIC 518 $Y/Q < 0,8$	$Y/Q < 0,8$	$Y/Q < 0,8$ $Q < 160$ kN
nie	maksymalne przyspieszenie jest znacznie niższe	brak standardu, stosowane kryterium amerykańskie	kontrola prędkości		nie
1	1	1	1		1
	2	3 (dla toru 1668 mm)	3		
	3	2	2		
obręcze: grubość 26 mm, wysokość 36 mm, niewyważenie 0,7–0,9 mm. Zależy od V_{max}	jak dla taboru konwencjonalnego	obręcze: grubość 26 mm, wysokość 36 mm, $Q_2 = 6,5$ mm, spr. w lokomotywowni	w trakcie określania		jak dla taboru konwencjonalnego
jak dla toru konwencjonalnego	45° zużycia co odpowiada 14 mm, pomiary wagonem diagnost. i ręczne	boczne 10 mm, całkowite 24 mm (pionowe + ½ boczne), pomiar ręczny	jak dla toru konwencjonalnego	17,2 mm	$H = 14$ mm

wartości skrajni. Wszystkie eksploatowane pociągi z przechylnym nadwoziem są zasilane z sieci jezdnej, takiej samej jak dla pociągów konwencjonalnych. Tylko w niektórych przypadkach wymagana jest większa wytrzymałość na siły rozciągające, co wynika z wyższych prędkości jazdy pociągów z przechylnym nadwoziem na sieci kolejowej. Nie są wymagane zmiany w systemie sterowania ruchem kolejowym, bowiem wymagania dla systemów sterowania ruchem kolejowym są uwarunkowane prędkością jazdy. W europejskich zarządach kolejowych nie stosuje się specjalnych sygnalizatorów kształtu łuku toru na liniach obsługiwanych przez pociągi z przechylnym nadwoziem. Tylko zarządy kolei włoskich (FS) i francuskich (SNCF) podjęły działania nad opracowaniem procedur i wymagań technicznych dla tych linii.

□

Literatura

- [1] Lopez Pita A.: *Tilting Trains and Line Construction. Options, alternatives and complements*. GIF. Madrid 1999.
- [2] *First Report on Tilting Train Technology. The State of the Art*. UIC. Paris 1998.
- [3] Artykuły z czasopism: *Revue Generale Chemins de Fer*, *Glaesers Annalen*, *Eisenbahntechnische Praxis*, *Eisenbahntechnische Rundschau*, *ETR*, *Railway Gazette International*, *Rail Engineering International*, *Modern Railways*, *IRJ*, *Elektrische Bahnen*, *La Vie du Rail*, *Rail International*, *ZEV-Glas. Ann.*, *Schienenfahrzeuge*, *European Railway Review*, *Eisenbahningenieur*, *Technika Transportu Szynowego*, *Przegląd Kolejowy* z lat 1980–2000.
- [4] Materiały informacyjne DB AG, SBB/CFF, CP, VR, SJ, FS, SNCF, BR, RENFE, CD, SZ, UIC, ERR1 z ostatniego dziesięciolecia.

Autor

dr inż. Janusz Biliński – Siemens Technika Transportowa

IX Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej

SEMTRAK '2000

Zakopane, 28–30 września 2000 r.

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej organizuje kolejną, IX Ogólnopolską Konferencję Naukową, która tradycyjnie będzie spotkaniem naukowców ze wszystkich liczących się w kraju ośrodków zajmujących się tematyką trakcji elektrycznej, przedstawicieli Dyrekcji Kolejowych Przewozów Towarowych CARGO, praktyków z PKP i znanych firm związanych z transportem szynowym.

Tematyka konferencji:

- Zasilanie i podstacje trakcji elektrycznej
- Trakcyjne napędy przekształtnikowe z silnikami prądu stałego i przemiennego
- Nowoczesne układy sterowania ruchem i systemami trakcji
- Kompatybilność elektryczna w transporcie szynowym
- Zagrożenia infrastruktury prądami błędzącymi
- Zastosowanie silników liniowych w transporcie
- Zintegrowane systemy kolejowo-tramwajowe

Szczegółowych informacji o konferencji (wysokość i terminy opłat, wymagania odnośnie formy ewentualnego referatu itp.) udziela Zakład Trakcji i Sterowania Ruchem Politechniki Krakowskiej.

Zakład Trakcji i Sterowania Ruchem
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Politechnika Krakowska
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
tel. (0-12) 633 03 33, w. 2615 lub 2506
fax (0-12) 633 49 15 lub 633 84 51
e-mail: pezajac@cyf-kr.edu.pl
www.pk.edu.pl/semtrak2000