Krzysztof ZBOIŃSKI Mirosław DUSZA

KOMPUTEROWE BADANIA WPŁYWU PRZECHYŁKI TORU NA STATECZNOŚĆ POJAZDU SZYNOWEGO W ŁUKU

Streszczenie. Referat jest częścią badań prowadzonych przez autorów, dotyczących dynamiki pojazdu szynowego poruszającego się po torze zakrzywionym z prędkościami przewyższającymi prędkość krytyczną [1, 5]. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych dla modelu 2osiowego pojazdu szynowego, poruszającego się po torze o stałym promieniu. Wykorzystano standardowe zarysy profili tocznych kół i szyn stosowane na kolejach europejskich. Prezentowane wyniki badań umożliwiają analizę wpływu przechyłki toru na stateczność poprzeczną pojazdu w luku.

COMPUTER RESEARCH OF TRACK CANT INFLUENCE ON RAILWAY VEHICLE STABILITY IN CURVED TRACK

Summary. The paper is a part of authors' investigations that refer to railway vehicle stability in curves for velocities higher then critical ones [1, 5]. The results of simulation performed for 2-axle railway vehicle model running in curved track of constant radius are presented. Standard wheel and rail profiles of European Railways were used. Results of simulation included in the paper enable to show track cant influence on railway vehicle lateral stability.

1. WSTĘP

Badania wpływu przechyłki toru na właściwości dynamiczne pojazdu szynowego są kolejnym etapem badań szeroko omawianych przez pierwszego z autorów w pracach [5, 6]. Istotę badań stanowi analiza drgań samowzbudnych generowanych w układzie pojazd szynowy – tor. Liczne publikacje dotyczące tej tematyki ograniczają zakres badań jedynie do toru prostego. Ogólnym celem wyznaczonym sobie przez autorów jest wykonanie badań symulacyjnych dla pojazdu poruszającego się po torze zakrzywionym w sposób analogiczny lub nawiązujący do tych dla toru prostego [1, 3, 4].

Uzasadnieniem takiego podejścia jest wykazanie w pracach [5, 7], że natura zjawiska powstawania i utrzymywania się drgań samowzbudnych (cykli granicznych) w torze zakrzywionym jest taka sama jak dla toru prostego.

M. Dusza, K. Zboiński

Podjęto próbę określenia warunków powstawania drgań samowzbudnych w torze zakrzywionym oraz czynników im sprzyjających. Badania obejmują również ocenę wpływu zmian wybranych parametrów elementów układu zawieszenia oraz kształtu toru na stateczność ruchu pojazdu. Badano wpływ takich parametrów, jak: prędkość pojazdu, tłumienie poprzeczne, promień łuku i przechyłka toru.

Ostatecznym wynikiem badań jest wyznaczenie sposobu narastania maksymalnych przemieszczeń poprzecznych i ich amplitudy dla drgań przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Linie opisujące te zależności tworzą rodzaj mapy stateczności ruchu pojazdu szynowego w torze o zadanym kształcie 8.

2. OBIEKT BADANY I METODA MODELOWANIA

Badania dotyczyły obiektu o strukturze podanej na rys. 1. Odpowiada ona wagonowi towarowemu HSFV1 British Rail.



Rys. 1. Struktura modelu obiektu Fig. 1. The model structure

Model ten uzupełniony jest o modele toru pionowo [2] i poprzecznie 7 podatnego. Uwzględniając więzy ma on łącznie 18 stopni swobody. Parametry pojazdu i toru podano w [5, 7].

Model matematyczny zbudowano zgodnie z metodyką uogólnionego modelowania dynamiki pojazdów szynowych przedstawioną w 7. W metodzie tej dynamika pojazdu opisywana jest względem ruchomych układów odniesienia związanych z linią środkową toru. Stąd dynamika pojazdu jest dynamiką ruchu względnego. Do jej opisu zastosowano tu formalizm Lagrange'a II rodzaju adaptowany do opisu w układach ruchomych o postaci

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_w}{\partial \dot{q}_p} \right) - \frac{\partial E_w}{\partial q_p} = Q_{Z\rho} + Q_{B\rho}, \qquad \rho = 1, \dots, k$$
(1)

gdzie: q_{o} - współrzędne uogólnione ruchu względnego;

296

 Q_{z_0} - uogólnione siły zewnętrzne;

 Q_{Bo} - uogólnione siły pozorne (siły bezwładności zadane od ruchu unoszenia);

k - liczba stopni swobody układu;

 E_w - energia kinetyczna ruchu względnego.

Równania (1) i sposób wyznaczania sił $Q_{B\rho}$ omówiono w [2, 6, 7]. Na nieliniowość równań składają się nieliniowości kinematyczne, siły pozorne, nieliniowa geometria kontaktu kolo – szyna 7 oraz nieliniowe styczne siły kontaktowe kolo – szyna 7.

3. METODA I ZAKRES BADAŃ



Fig. 3. Leading wheelset oscillations at critical velocity higher then the critical value

Badania pojazdu rozpoczynano od małych predkości (drgania miały wówczas charakter malejący - rys. 2) i od ruchu po torze prostym. Przyjęto przy tym zarys powierzchni tocznej koła S1002 i szyny UIC60. Każda symulacja realizowana była na odcinku drogi o długości 500 [m]. Ze wzgledu na twardy charakter pobudzenia cyklu granicznego [8, 9] oraz w celu skrócenia odcinka ustalania sie amplitudy drgań, na oba zestawy kołowe nalożone byly poprzeczne wymuszenia początkowe o relatywnie znacznej wartości 0.0045 m. Analizowano drgania przedniego zestawu kołowego.

Pierwszym zagadnieniem, które należało rozwiazać było wyznaczenie predkości krytycznej va badanego modelu. W tym celu w kolejnych symulacjach zwiększano prędkość ruchu pojazdu obserwując charakter drgań. Najmniejsza predkość, dla której drgania miały charakter ustalonych cykli granicznych przynajmniej w końcowej części badanego odcinka (rys. 3), przyjmowano jako wartość krytyczną v_n dla badanego modelu.

Następnie rozpoczynano badania symulacyjne dla łuku o stałym promieniu wykorzystując fakt że prędkość krytyczna pojazdu w łuku kołowym ma tę samą wartość co dla toru prostego [7]. Zakończeniem badań pojazdu na trasie danego typu było osiągnięcie przez pojazd prędkości wykolejenia 1. Była to taka wartość prędkości, przy której drgania miały charakter narastający oraz na długości badanego odcinka pojawiało się wykolejenie 8.

Symulacje przeprowadzono dla modelu z nominalnymi parametrami układu zawieszenia 7 oraz dla modelu pozbawionego tłumienia poprzecznego ($C_{zy} = 0$, patrz rys. 1).

Badania modelu w łuku kolowym obejmowały przeważnie dziewięć tras o promieniach R=600, 750, 900, 1200, 2000, 3000, 4000, 6000, 10000 m. Jeśli chodzi o przechyłki to rozważano dwa przypadki. W pierwszym dla każdej trasy przyjmowano stałe, tj. niezależne od prędkości wartości przechyłek toru wynoszące odpowiednio:

Tabela 1

Przechylki stale									
Promień luku R [m]	600	750	900	1200	2000	3000	4000	6000	10000
Przechyłka h [m]	0.16	0.16	0.16	0.16	0.155	0 1 1 0	0.077	0.051	0.031

Wartości tych przechyłek dobierano jako nominalne, tj. gwarantujące równowagę składowej siły odśrodkowej i składowej siły ciężkości działających w kierunku równoległym do płaszczyzny toru (rys. 4), dla ruchu obiektu o parametrach nominalnych z prędkością krytyczną. Przy czym jeśli przechyłka gwarantująca równowagę była większa od maksymalnej dopuszczalnej w praktyce kolejowej, to stosowano tę ostatnią. Faktycznie oznaczało to niedobór przechyłki dla łuków o promieniach R<1200 m. Zatem przechyłki w przypadku pierwszym mieszczą się w zakresie przechyłek stosowanych na kolejach w rzeczywistości.

W drugim przypadku przechylkę toru dobierano indywidualnie dla każdej prędkości i to tak, że była zawsze nominalna. Zgodna zatem była zawsze z warunkami równowagi określonymi na rys. 4.



Rys. 4. Schemat rozkładu sił działających na pojazd w łuku Fig. 4. Forces scheme in curved track Komputerowe badania ...

Analityczny warunek równowagi wynikający z rys. 4 wyrażony jest zależnością:

$$mg \cdot \sin \alpha = F_r \cdot \cos \alpha \dots \Rightarrow h = \frac{\nu^2 \cdot 2b}{\sqrt{g^2 \cdot R^2 + \nu^4}} [m]$$
 (2)

gdzie: v - prędkość ruchu pojazdu [m/s];

b - polowa szerokości toru [m] (w badaniach przyjęto *b* = 0.7175 [m]);

R - promień luku [m];

g - przyspieszenie ziemskie (9.81 [m/s²]).

Zakresy przechyłek stosowanych w przypadku drugim zestawiono w tabeli 2. Przy czym tu stosowano także wartości większe od maksymalnych stosowanych w praktyce kolejowej.

Tabela 2

Promień luku R [m]	Zakres badanych prędkości v [m/s]	Zakres stosowanych przechylek
600	39 ÷ 65	0.359 ÷ 0.837
750	39 ÷ 67	0.291 ÷ 0.747
900	39 ÷ 69	0.244 ÷ 0.681
1200	39 ÷ 69	0.184 ÷ 0.538
2000	39 ÷ 69	0.111 ÷ 0.338
3000	39 ÷ 69	0.074 ÷ 0.229
4000	39 ÷ 74	0.056 ÷ 0.198
6000	39 ÷ 74	0.037 ÷ 0.133
10000	39 ÷ 74	0.022 ÷ 0.080

Zakresy przechyłek nominalnych

Wyniki badań symulacyjnych dla prędkości powyżej v_n (w typie rys. 3) dla różnych wartości promieni R były podstawą wyznaczenia zbiorczych wykresów prezentujących maksymalne wartości przemieszczeń poprzecznych przedniego zestawu kołowego i amplitudy tych przemieszczeń w funkcji prędkości.

4. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań zestawiono w postaci czterech kompletów złożonych z par wykresów przedstawiających wartości bezwzględne maksymalnych przemieszczeń poprzecznych $|y_p|$ i amplitudy drgań tych przemieszczeń dla przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości pojazdu. Komplety te, to odpowiednio pary rysunków: rys. 5 i rys. 6, rys. 7 i rys. 8, rys. 9 i rys. 10 oraz rys. 11 i rys. 12. Odpowiadają one analizowanym przypadkom zdefiniowanym w podpisach pod rysunkami.

Poszczególne linie wykresów przedstawiają wyniki dla ruchu pojazdu po łuku o zadanym stałym promieniu.

M. Dusza, K. Zboiński



- Rys. 5. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości w luku o stałej przechyłce toru
- Fig. 5. Maximum lateral displacement of leading wheelset versus speed for constant track cant
- Rys. 6. Amplituda przemieszczeń poprzecznych przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości w łuku o stałej przechyłce toru
- Fig. 6. Amplitude of lateral displacement of leading wheelset versus speed for constant track cant



- Rys. 7. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości w łuku o nominalnej przechylce toru
- Fig. 7. Maximum lateral displacement of leading wheelset versus speed for nominal track cant



- Rys. 8. Amplituda przemieszczeń poprzecznych przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości w luku o nominalnej przechyłce toru
- Fig. 8. Amplitude of lateral displacement of leading wheelset versus speed for nominal track cant

Komputerowe badania ...



- Rys. 9. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości bez tłumienia poprzecznego (C_{zy}=0) w łuku o stałej przechyłce toru
- Fig. 9. Maximum lateral displacement of leading wheelset versus speed for vehicle without lateral damping (C₅,=0) and for constant track cant



- Rys. 10. Amplituda przemieszczeń poprzecznych przedniego zestawu kołowego pojazdu bez tłumienia poprzecznego ($C_{zy}=0$) w łuku o stałej przechylce toru
- Fig. 10. Amplitude of lateral displacement of leading wheelset versus speed for vehicle without lateral damping $(C_{zy}=0)$ and for constant track cant



- Rys. 11. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości bez tłumienia poprzecznego (C_{zy}=0) w łuku o nominalnej przechyłce toru Fig. 11. Maximum lateral displacement of
 - leading wheelset versus speed for vehicle without lateral damping $(C_{zy}=0)$ and for nominal track cant



- Rys. 12. Amplituda przemieszczeń poprzecznych przedniego zestawu kołowego w funkcji prędkości bez tłumienia poprzecznego (Czy=0) w łuku o nominalnej przechyłce toru
- Fig. 12. Amplitude of lateral displacement of leading wheelset versus speed for vehicle without lateral damping $(C_{zy}=0)$ and for nominal track cant

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Prędkość krytyczna modelu o nominalnych parametrach układu zawieszenia wyniosła 43 m/s. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne wystąpiły w łuku o promieniu 750 m i wyniosły 0.0063 m przy prędkości 52 m/s (rys. 5). Wraz ze zwiększaniem promienia luku wzrastała prędkość wykolejenia osiągając maksimum 65 m/s dla luku o promieniu 10000 m i toru prostego. Wartości maksymalnych przemieszczeń poprzecznych dla określonych prędkości maleją wraz ze wzrostem promienia luku, osiągając najmniejsze wartości dla toru prostego. Najmniejsze wartości amplitud przemieszczeń poprzecznych (rys. 6) występują w luku o promieniu 600 m przy prędkości krytycznej i wynoszą około 0.005 m. Wraz ze wzrostem promienia łuku amplituda drgań rośnie osiągając maksimum ok. 0.0095 m dla toru prostego. Linia toru prostego stanowi niejako graniczną wartość, do której dążą linie łuków kolowych. Badania modelu w torze o nominalnych przechyłkach dla każdej prędkości dały znacząco różne wyniki maksymalnych przemieszczeń poprzecznych (rys. 7). Najmniejsze przemieszczenia wystąpiły dla luku o promieniu 600 m, przy predkości krytycznej i wyniosły ok. 0.0040 m (poprzednio ok. 0.0055 m). Największe przemieszczenia odnotowano dla łuku o promieniu 900 m. Osiągnęły one wartość ok. 0.00476 m. Znacząco wzrosły wartości predkości wykolejenia, osiągając 60 m/s dla łuku o promieniu 600 m (poprzednio 47 m/s) oraz 63 m/s dla luku o promieniu 750 m (poprzednio 52 m/s). Linie przemieszczeń poprzecznych dla pozostałych łuków zbliżają się do linii toru prostego wraz ze wzrostem prędkości, osiągając jednakową prędkość wykolejenia 65 m/s. Wyjątek stanowi linia łuku o promieniu 10000 m, dla której wykolejenie odnotowano przy prędkości 67 m/s.

Linie amplitud przemieszczeń poprzecznych dla toru o przechyłce nominalnej nie różnią się w sposób istotny od linii amplitud przemieszczeń poprzecznych dla toru o stalej przechyłce. Zauważalne zmiany wynikają jedynie ze zwiększenia prędkości wykolejenia. Wartości amplitud pozostają na zbliżonym poziomie (por. rys. 8 z rys. 6).

Zmiana parametrów układu zawieszenia (tłumienie poprzeczne $C_{zy} = 0$, poprzednio $C_{zy} = 56$ kNs/m), spowodowała pewne zmiany własności modelu. W pierwszym przypadku (tor o stałej przechyłce) prędkość krytyczna zmniejszyła się do wartości 39 m/s (rys. 9) oraz zauważalny jest gwaltowny wzrost wartości maksymalnych przemieszczeń poprzecznych wraz ze wzrostem prędkości. Linie małych promieni (600, 750, 900 m) są bardzo strome. Największe przemieszczenia poprzeczne odnotowano dla łuku o promieniu 900 m i wyniosły one ok. 0.0072 m. Prędkości wykolejenia dla małych łuków (600, 750, 900 m) zmniejszyły się o około 1 ÷ 3 m/s w porównaniu z modelem nominalnym. Dla większych luków (1200 m i większe) prędkości wykolejenia wzrosły o kilka m/s, osiągając wartość 72 m/s dła

luku o promieniu 10000 m i toru prostego (poprzednio 65 m/s).

Linia amplitud (rys. 10) również znacznie zmieniły charakter i położenie w porównaniu z liniami dla modelu nominalnego (rys. 6). Charakterystyczną cechą jest przecięcie się wszystkich linii (oprócz linii dla łuku o promieniu 600 m) przy prędkości 45 m/s. Powyżej tej prędkości amplitudy drgań dla każdego łuku mają wartości większe od amplitud dla toru prostego. Maksymalne wartości amplitud odnotowano dla łuku o promieniu 1200 m i wyniosły one ok. 0.0118 m. Zwiększanie promienia łuku powoduje zmniejszenie wartości amplitud dla analogicznych prędkości, osiągając minimum dla toru prostego. Zauważmy, że w omawianym przypadku ze względu na obniżenie się prędkości krytycznej do 39 m/s, niedobór przechyłki występuje dopiero powyżej 43 (45) m/s. Drugi przypadek badania modelu ze zmienionymi parametrami układu zawieszenia ($C_{zy}=0$) obejmował symulacje dla ruchu po torze o przechyłce nominalnej. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne (rys. 11) dla poszczególnych łuków mają zbliżone wartości. Są one jednak większe od przemieszczeń dla modelu nominalnego (rys. 7), przy analogicznych prędkościach. Wzrosła również

Komputerowe badania ...

prędkość wykolejenia dla poszczególnych łuków osiągając 72 m/s dla łuków 6000 m, 10000 m i toru prostego (poprzednio 65 m/s).

Kształt i charakter linii amplitud (rys. 12) jest zbliżony do linii amplitud modelu nominalnego (rys. 8). Zauważalny jest wzrost wartości amplitud przy analogicznych prędkościach o ok. 1 ÷ 2.5 mm. Podobnie jak dla modelu nominalnego linia amplitud toru prostego stanowi graniczną wartość, do której dążą linie amplitud łuków.

6. WNIOSKI

Wartość przechyłki toru w sposób istotny wpływa na poprzeczną stateczność ruchu pojazdu szynowego w luku. Szczególnie znaczące różnice pomiędzy przypadkami toru o stałej wartości przechyłki i o przechyłce nominalnej dla każdej prędkości można zaobserwować w maksymalnych przemieszczeniach poprzecznych zestawu kolowego. Wartości tych przemieszczeń dla łuków kołowych o przechyłkach nominalnych zbliżają się do wartości dla toru prostego. Znacząco zwiększają się także wartości prędkości wykolejenia w tym przypadku. Dla większych promieni łuków o przechyłkach nominalnych prędkości wykolejenia są porównywalne z prędkością wykolejenia dla toru prostego.

Wpływ wartości parametrów zawieszenia na stateczność pojazdu w luku jest istotniejszy dla przypadku przechyłek o stałej wartości (w praktyce dla braku równowagi) niż dla przechyłek nominalnych dla każdej prędkości (w praktyce dla spełnionego warunku równowagi).

Literatura

- Chengrong H., Feisheng Z.: The numerical bifurcation method of nonlinear lateral stability analysis of locomotive, Proc. of 13th IAVSD Symposium, suppl. to Vehicle System Dynamics, vol. 23, str. 234-245, Chengdu, Chiny, 1993.
- Kisilowski J., red.: Dynamika układu mechanicznego pojazdu szynowy tor, PWN, Warszawa 1991.
- True H., Jensen Ch.: Parameter study of hunting and chaos in railway vehicle dynamics, Proceedings of 13th IAVSD Symposium, suppl. to Vehicle System Dynamics, vol. 23, str. 508-521, Chengdu, Chiny 1993.
- 4. True H.: Railway vehicle chaos and asymmetric hunting, Proc. of 12th IAVSD Symposium, suppl. to Vehicle System Dynamics, vol. 20, str. 625-637, Lyon 1991.
- 5. Zboiński K.: Dynamical investigation of railway vehicles on a curved track, European Journal of Mechanics, Part A Solids, vol. 17, no. 6, str. 1001-1020, 1998.
- Zboiński K.: Importance of imaginary forces and kinematic type nonlinearities for description of railway vehicle dynamics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part F, Jurnal of Rail and Rapid Transit, vol.213, F3, str. 199-210, 1999.
- Zboiński K.: Metodyka modelowania dynamiki pojazdów szynowych z uwzględnieniem zadanego ruchu unoszenia i jej zastosowania, Prace Naukowe Transport, z 43, Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2000.
- Zboiński K., Dusza M.: Analysis and method of the analysis of non-linear lateral stability of railway vehicles in curved track, Proc. of 18th IAVSD Symposium, Kanagawa 2003.
- Zboiński K., Dusza M.: Symulacyjne badania dynamiki pojazdów szynowych w torze zakrzywionym, XV Konferencja Pojazdy Szynowe, t. 2, s. 343-352, Szklarska Poręba 2002.

Recenzent: Prof. dr hab. Aleksander Sładkowski

Abstract

The article is a contribution into the problem of stability in curves. Authors analyze influence of track cant and car suspension's lateral damping on vehicle lateral stability. At first the nominal car [7] was tested with constant and nominal superelevations. Main differences in both cases are observed in maximum lateral displacement of the leading wheelset (compare Fig. 5 to Fig. 7). In the case of nominal superelevations shape of the lines for circular curves is similar to the line for straight track. Also values of displacements are closer to values for straight track. In that case the derailment velocity significantly increased for curved track. Amplitudes of the lateral displacement for nominal track cant are similar to the amplitudes for constant track cant (compare Fig. 6 to Fig. 8).

Next the lateral damping was changed to zero. Critical velocity decreased to 39m/s. Lateral displacement increased and shape of lines changed for constant track cant (compare Fig. 9 to Fig.5). Also amplitude lines for constant track cant (Fig. 10) are quite different than amplitude lines for nominal model (Fig. 6).

The influence of the damping change is much smaller in case of nominal superelevations (compare Fig. 7 with Fig. 11 and Fig. 8 with Fig. 12).