

Mirosław Dusza
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Krzysztof Zboński
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

STATECZNOŚĆ RUCHU MODELU POJAZDU SZYNOWEGO W ASPEKCIE ISTNIENIA ROZWIĄZAŃ WIELOKROTNYCH

Streszczenie: Wyniki badań zamieszczone w artykule są kontynuacją prac prowadzonych przez autorów od kilku lat [1, 6-9]. Obserwacja wyników badań innych autorów zajmujących się zblizoną tematyką, np. [2, 3, 5], skłoniły do wykonania szczegółowych badań stateczności ruchu modelu pojazdu szynowego, mających na celu zidentyfikowanie istnienia rozwiązań wielokrotnych (współistniejących). Wykonano serie badań, w których poprzez wariantowanie wartości warunków początkowych określono symulacyjnie obszary występowania rozwiązań wielokrotnych.

Słowa kluczowe: dynamika pojazdów szynowych, stateczność, symulacje numeryczne

1. WSTĘP

Stateczność ruchu pojazdów szynowych jest stale rozwijającym się przedmiotem badań [2, 3, 5]. Bodźcem wymuszającym badania tego typu jest zwiększenie konkurencyjności transportu szynowego w odniesieniu do dynamicznie rozwijającego się transportu samochodowego i lotniczego. Znaczącym czynnikiem decydującym o wyborze przez klienta usługi transportowej jest czas, w którym można przebyć określony odcinek drogi. Czas „tracony” w środkach transportu uwarunkowany jest wieloma względami natury organizacyjnej, logistycznej i niewątpliwie prędkością ruchu. Zapewnienie jak największej bezpiecznej prędkości ruchu jest zadaniem konstruktorów pojazdów. Rozwój i doskonalenie metod poznawczych nabiera szczególnego znaczenia w perspektywie planowanego rozwoju kolei dużych prędkości. Wypracowanie odpowiednio wysokich standardów transportu kolejowego stanie się niewątpliwie alternatywą dla droższego i bardziej uciążliwego dla człowieka i środowiska naturalnego transportu indywidualnego. Wieloletnie badania stateczności ruchu prowadzone przez autorów [1, 7-9], bazują na tworzeniu i analizie wykresów bifurkacyjnych, stanowiących obraz dynamiki układu

mechanicznego pojazd szynowy – tor. Podobne metody badawcze wykorzystują również inni np. [2, 3, 5], jednak skupiają się oni na ruchu modeli pojazdów po torze prostym. Wynika to z ogólnie panującego przekonania o quasi-statycznym charakterze ruchu po łuku. Rozszerzenie bifurkacyjnej metody badań na trasy zakrzywione (będące łukami okręgu) stanowi oryginalny wkład autorów w dziedzinę badań stateczności.

W dotychczasowych pracach uwaga autorów skupiała się na doskonaleniu metody badawczej poprzez wykonanie dużej ilości badań [1, 7-9]. Pomijano natomiast kwestie szczegółowe, takie jak np. możliwość występowania rozwiązań wielokrotnych. W pracy niniejszej podjęto próbę identyfikacji możliwości występowania tego typu rozwiązań.

2. MODEL I METODA BADAŃ

Obiektem badawczym jest model numeryczny dyskretnego układu mechanicznego pojazd szynowy – tor. Jest to model pojazdu szynowego dwuosiowego z jednym stopniem usprężynowania o strukturze odpowiadającej wagonowi towarowemu HSFV1 kolei brytyjskich. Podatny pionowo i poprzecznie tor wraz z pojazdem tworzą układ o osiemnastu stopniach swobody. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu pominięto bliższą prezentację modelu, można ją znaleźć w [4 i 6]. Również opis metody badań został pominięty. Szczegółowe informacje o metodzie można znaleźć w [1, 7-9]. Należy jednak odnieść się tutaj do czynności, które wykonywano w czasie realizacji badań. Model należy do grupy układów o tzw. twardym charakterze pobudzenia. Oznacza to, że zmiana charakteru rozwiązań w warunkach sprzyjających transformacji energii ruchu roboczego pojazdu do układu drgającego, może nastąpić tylko przy zadaniu dostatecznie dużych wymuszeń początkowych. Na podstawie licznych badań stwierdzono, że wymuszenia początkowe (stanowiące przemieszczenia poprzeczne zestawów kołowych) o wartości $y_p(0)=0,0045\text{m}$, są wartością dostatecznie dużą dla każdej z badanych konfiguracji modelu. Taka właśnie wartość zadawana była w dotychczasowych badaniach. Efektem takiego podejścia była jedna wartość rozwiązań układu (przemieszczeń poprzecznych atakującego zestawu kołowego) dla ustalonych warunków ruchu w zakresie pod i nad krytycznych prędkości ruchu.

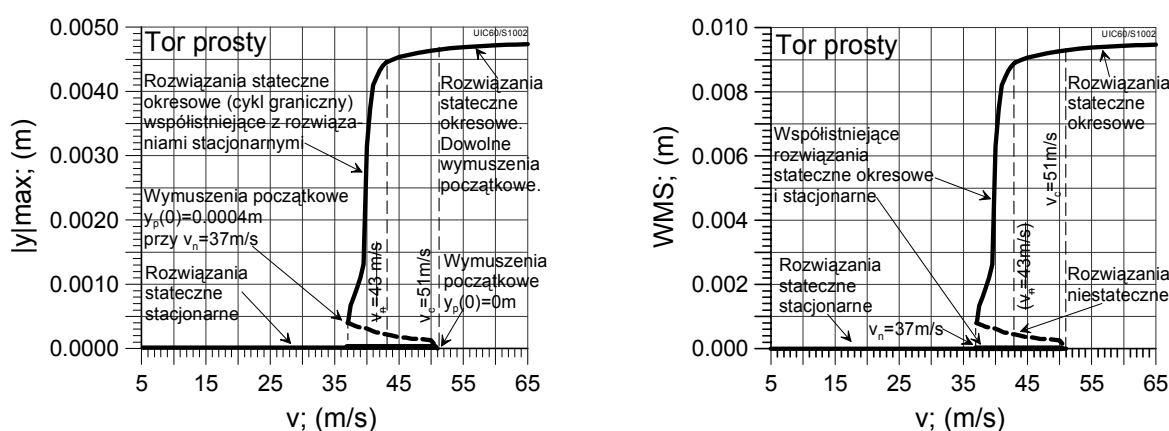
W badaniach, których wyniki zamieszczono w pracy, wariantowanie wartości wymuszeń początkowych jest sposobem na zidentyfikowanie istnienia rozwiązań wielokrotnych układu. Dla prędkości ruchu zwiększanych co $0,1\text{m/s}$, zwiększano wartości wymuszeń początkowych od zera do $0,006\text{m}$ z dokładnością do $0,00001\text{m}$. Graniczne wartości wymuszeń początkowych pozwoliły wyznaczyć położenie linii rozwiązań niestatecznych.

3. WYNIKI BADAŃ

Badania wykonano na modelu wyposażonym kolejno w trzy pary zarysów kół i szyn: S1002/UIC60, BR-P10/UIC60 i S1002/S49. Dla każdej konfiguracji zarysów prowadzono symulacje na torze prostym i na trasach zakrzywionych (będących łukami okręgu) o stałej wartości promienia i przechyłki toru.

3.1. Badania na torze prostym

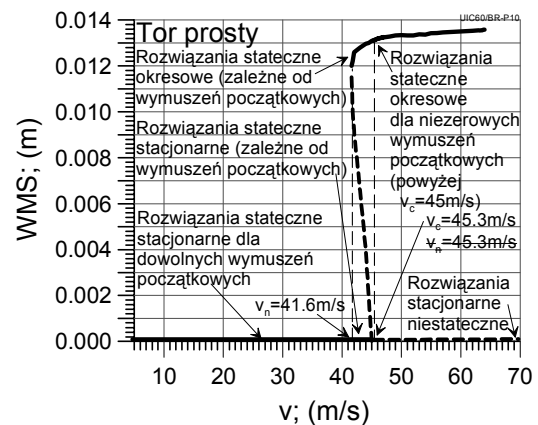
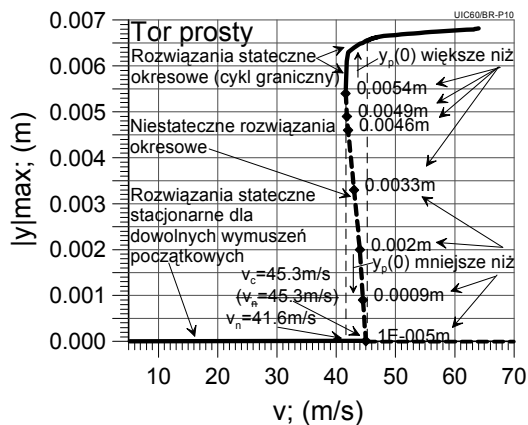
W pierwotnie wykonanych badaniach prędkość krytyczna modelu z zarysami kół i szyn S1002/UIC60 została zidentyfikowana przy 43m/s (rys. 3.1). Zwiększając wartości wymuszeń początkowych od zera do 0,006m, pierwsze rozwiązania stateczne okresowe pojawiły się przy prędkości 37m/s. Graniczna wartość wymuszeń początkowych, która decyduje o charakterze rozwiązań wynosi 0,0004m. To znaczy przy tej prędkości dla $y_p(0) < 0,0004m$ rozwiązania mają charakter stateczny stacjonarny, dla $y_p(0) \geq 0,0004m$ stateczny okresowy. A więc w tym przypadku należy przyjąć, że prędkość krytyczna wynosi 37m/s. Następnie dla kolejno zwiększanych prędkości ruchu znajdowano graniczne wartości wymuszeń początkowych, dla których następowała zmiana charakteru rozwiązań.



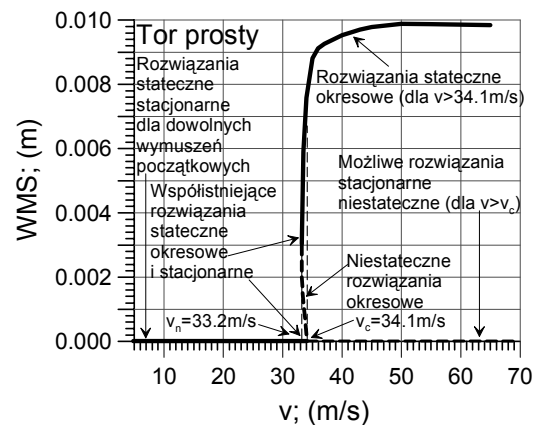
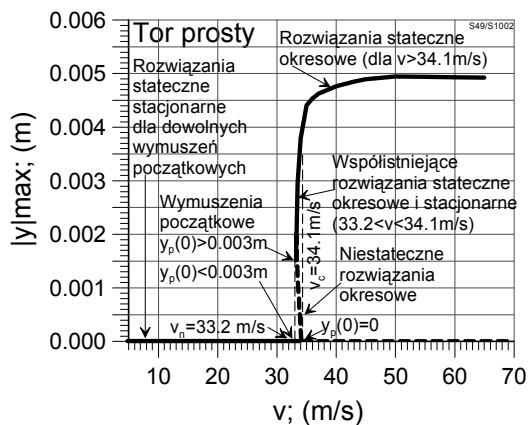
Rys. 3.1. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami kół S1002 i szyn UIC60 na torze prostym

W ten sposób powstała linia przerywana (gruba) na rys. 3.1, obrazująca rozwiązania okresowe niestateczne. Przy prędkości 51m/s linia rozwiązań niestatecznych łączy się z osiami odciętych wykresów stateczności, co oznacza, że przy tej prędkości dla dowolnie małych (różnych od zera) wymuszeń początkowych można zidentyfikować tylko rozwiązania stateczne okresowe. W zakresie prędkości od 37 do 51m/s występują rozwiązania wielokrotne: stateczne stacjonarne, stateczne okresowe (linie ciągłe) i niestateczne okresowe (linia przerywana).

Model z zarysami kół BR-P10 i szyn UIC60 charakteryzował się prędkością krytyczną 45,3m/s (wyznaczoną w poprzednich badaniach na torze prostym). Zmieniając wymuszenia początkowe od zera do 0,006m dla kolejno zwiększanych wartości prędkości ruchu, rozwiązania okresowe pojawiły się przy 41,6m/s (rys. 3.2). Minimalna wartość wymuszeń początkowych konieczna do zainicjowania rozwiązań okresowych przy tej prędkości wynosi 0,0054m. Wraz ze zwiększaniem prędkości ruchu, maleje graniczna wartość wymuszeń początkowych osiągając zero przy prędkości 45,3m/s. A więc w zakresie



Rys. 3.2. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami kół PR-P10 i szyn UIC60 na torze prostym



Rys. 3.3. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami kół S1002 i szyn S49 na torze prostym

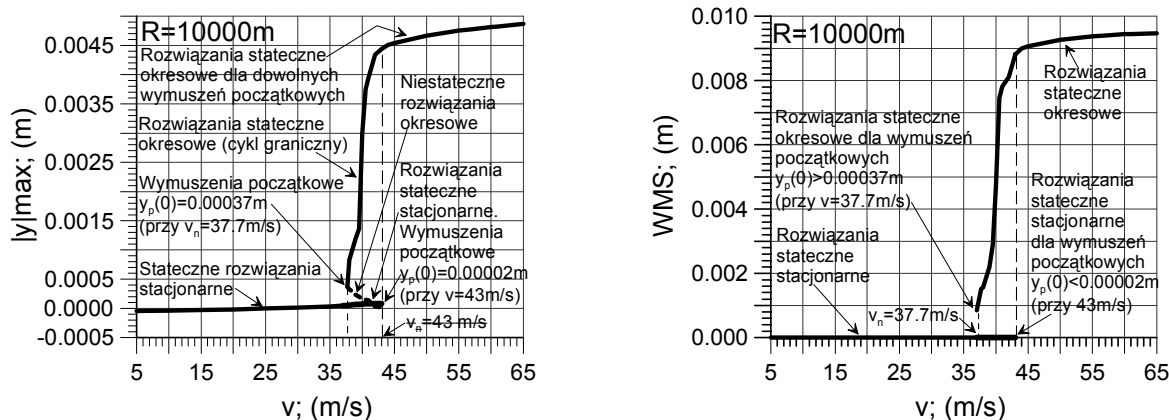
prędkości od 41,6 do 45,3m/s istnieje obszar rozwiązań wielokrotnych: statecznych stacjonarnych, statecznych okresowych i niestatecznych okresowych (linia przerywana).

W poprzednio wykonanych badaniach na modelu z zarysami kół S1002 i szyn S49, prędkość krytyczną zidentyfikowano przy 33,2m/s. Wartość ta okazała się słuszna również po wykonaniu badań szczegółowych. Graniczna wartość wymuszeń początkowych przy tej prędkości wynosi $y_p(0)=0,003m$ (rys. 3.3). Zwiększanie prędkości ruchu powoduje zmniejszanie granicznej wartości wymuszeń i przy prędkości 34,1m/s rozwiązania stateczne stacjonarne mogą istnieć tylko dla zerowych wymuszeń początkowych. A więc w zakresie prędkości od 33,2 do 34,1m/s występuje obszar rozwiązań wielokrotnych: statecznych stacjonarnych, statecznych okresowych i niestatecznych okresowych.

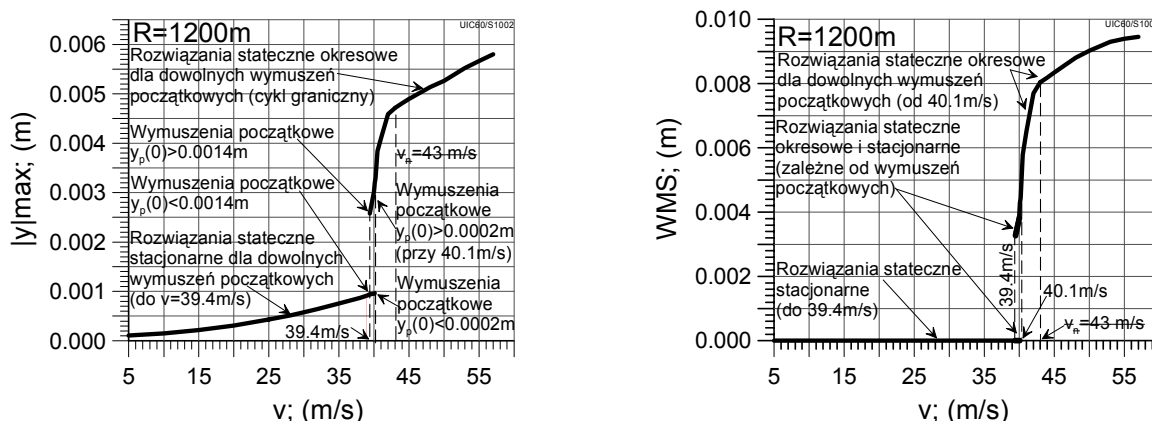
3.2. Badania na torze zakrzywionym

Analogicznie do badań na torze prostym wykonano badania na trasach zakrzywionych. Dla modelu z konfiguracją zarysów S1002/UIC60 na trasie o dużym promieniu 10000m, rozwiązania okresowe pojawiły się przy prędkości 37,7m/s (rys. 3.4). Graniczna wartość wymuszeń początkowych wynosi 0,00037m. Zwiększanie prędkości ruchu powoduje

zmniejszanie granicznej wartości wymuszeń początkowych aż do prędkości 43m/s, przy której $y_p(0)=0,00002m$. Dla prędkości większych od 43m/s, dla dowolnych wymuszeń początkowych istnieją już tylko rozwiązania stateczne okresowe.



Rys. 3.4. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami S1002/UIC60 na łuku o promieniu $R=10000m$



Rys. 3.5. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami S1002/UIC60 na łuku o promieniu $R=1200m$

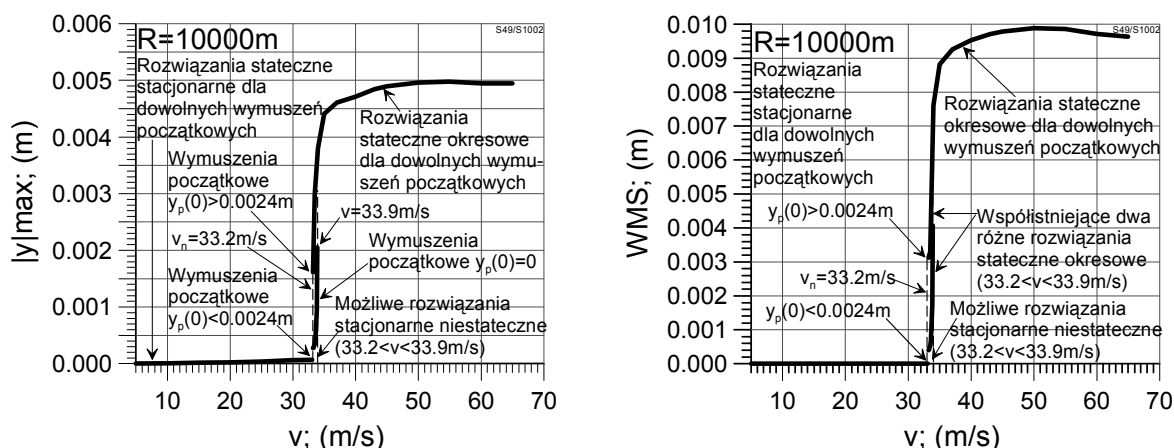
Na trasie o średnim promieniu łuku 1200m, rozwiązania stateczne okresowe pojawiły się przy prędkości 39,4m/s (rys. 3.5). Graniczna wartość wymuszeń początkowych wynosi 0,0014m. Wraz ze zwiększaniem prędkości graniczna wartość wymuszeń maleje osiągając 0,0002m przy prędkości 40,1m/s. A więc istnieje tutaj w zakresie prędkości 39,4÷40,1m/s obszar rozwiązań wielokrotnych. Dla prędkości większych od 40,1m/s istnieją tylko rozwiązania stateczne okresowe.

Na trasie o promieniu łuku 900m rozwiązania okresowe pojawiły się przy prędkości 39,8m/s. Graniczna wartość wymuszeń początkowych wynosi 0,0013m. Zmieniając wartości wymuszeń dla kolejno zwiększanych prędkości, nie udało się zidentyfikować obszaru istnienia rozwiązań wielokrotnych. Wyniki badań pominięto.

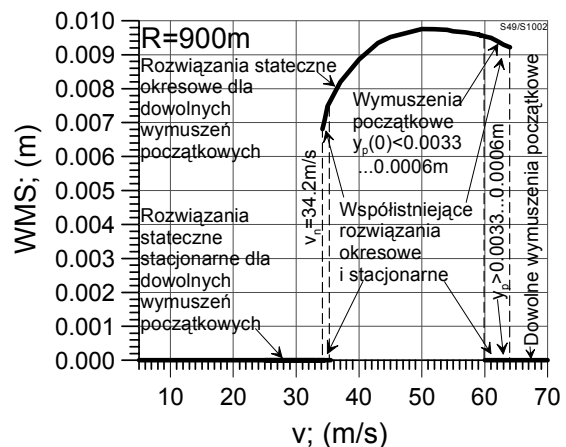
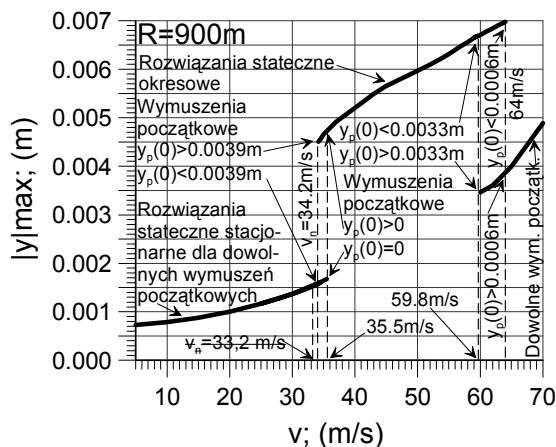
Na trasie o najmniejszym badanym promieniu łuku 600m, rozwiązania okresowe pojawiły się przy prędkości 42,7m/s. Graniczna wartość wymuszeń początkowych przy tej prędkości wynosi 0,0039m. Również na tej trasie nie udało się zidentyfikować obszaru istnienia rozwiązań wielokrotnych. Wyniki badań pominięto.

Model z zarysami kół BR-P10 i szyn UIC60 w symulacjach ruchu na trasach łukowych wykazywał cechy jednoznaczne. Prędkość krytyczna 45,3m/s, określona w poprzednich badaniach na torze prostym okazała się wartością słuszną na wszystkich trasach zakrzywionych. Zmieniając od 0 do 0,006m wartości wymuszeń początkowych nie udało się zidentyfikować obszarów rozwiązań wielokrotnych na trasach będących łukami.

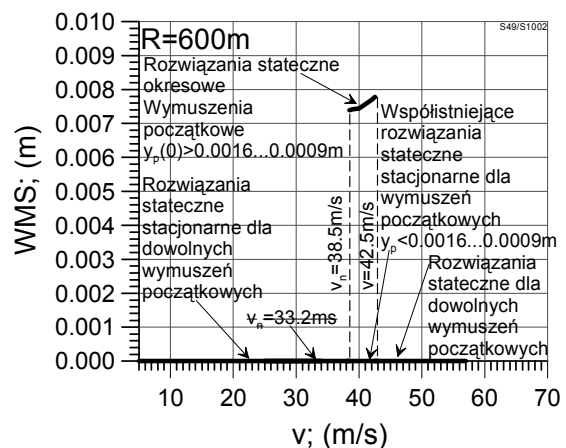
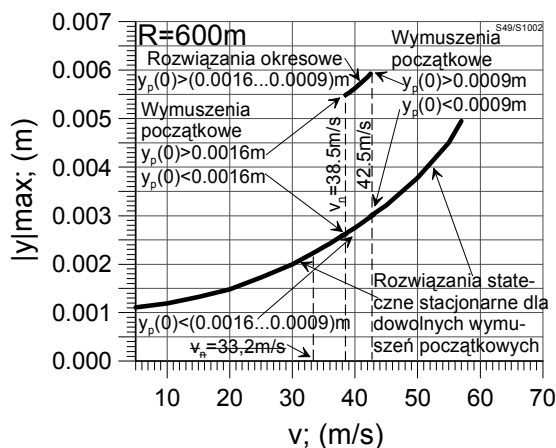
Model z zarysami kół S1002 i szyn S49 na trasie o dużym promieniu 10000m, również wykazywał cechy jednoznaczne, chociaż w tym przypadku udało się zidentyfikować obszar rozwiązań wielokrotnych w zakresie prędkości od 33,2 do 33,9m/s (rys. 3.6). Jest to dość „wąski” zakres prędkości, ale przypadek różniący się od pozostałych tym, że istnieją w nim dwa rozwiązania stateczne okresowe. Pierwsze (o większych wartościach) pojawiają się przy prędkości 33,2m/s, a graniczna wartość wymuszeń początkowych wynosi 0,0024m. Drugie (o mniejszych wartościach), również pojawiają się przy prędkości 33,2m/s i istnieją do 33,9m/s dla zerowych wymuszeń początkowych. Na podstawie wyników symulacji dla tej konfiguracji modelu, w tym dla innych tras, można przypuszczać, że w tym zakresie prędkości istnieją również rozwiązania niestateczne stacjonarne, stanowiące przedłużenie linii rozwiązań statecznych stacjonarnych. Na trasach o dużych i średnich promieniach łuków nie udało się zidentyfikować rozwiązań wielokrotnych. Natomiast na trasach o małych promieniach model cechował się zmianą charakteru rozwiązań dla prędkości większych od wartości krytycznej wyznaczonej na torze prostym. I tak na trasie o promieniu łuku 900m pierwsze rozwiązania okresowe pojawiają się przy prędkości 34,2m/s dla wymuszeń początkowych 0,0039m (rys. 3.7). Do prędkości 35,5m/s rozwiązania stateczne okresowe współistnieją z rozwiązaniami statecznymi stacjonarnymi przy malejących do zera wymuszeniach początkowych. Następnie do prędkości 59,8m/s istnieją wyłącznie rozwiązania stateczne okresowe. Przy 59,8m/s dla wymuszeń początkowych $y_p(0) > 0,0033m$ pojawiają się rozwiązania stateczne stacjonarne, które współistnieją z rozwiązaniami okresowymi do prędkości 64m/s przy malejących do 0,0006m wymuszeniach początkowych. Dla większych prędkości istnieją tylko rozwiązania stateczne stacjonarne. A więc na tej trasie istnieją dwa obszary rozwiązań wielokrotnych.



Rys. 3.6. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami S1002/S49 na łuku o promieniu $R=10000m$



Rys. 3.7. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami S1002/S49 na łuku o promieniu R=900m



Rys. 3.8. Wykresy stateczności ruchu modelu z zarysami S1002/S49 na łuku o promieniu R=600m

Na trasie o najmniejszym promieniu łuku 600m rozwiązania okresowe pojawiły się przy prędkości 38,5m/s dla wymuszeń początkowych 0,0016m (rys. 3.8). Rozwiązania okresowe istnieją do prędkości 42,5m/s przy malejących do 0,0009m wymuszeniach początkowych. W całym wskazanym przedziale prędkości współistnieją one z rozwiązaniami statecznymi stacjonarnymi.

4. WNIOSKI

Badany model pojazdu szynowego i metoda badań, umożliwiającą zidentyfikowanie obszarów rozwiązań wielokrotnych. Wraz ze wzrostem promienia łuku trasy, rosną zakresy prędkości, w których istnieją obszary rozwiązań wielokrotnych. Odstępstwem od tej zasady mogą być przypadki, gdy model wykazuje specyficzne własności na trasach o małych promieniach łuków (tutaj dla zarysów S1002/S49). Obserwując wyniki badań na torze prostym, gdzie występują największe zakresy prędkości, w których istnieją

rozwiązania wielokrotne można zauważyć, że niewielkie zmiany wymuszeń początkowych decydują o zmianie charakteru rozwiązań. Może to tłumaczyć fakt istnienia niewielkich lub braku zakresów prędkości ruchu, w których istnieją rozwiązania wielokrotne na trasach zakrzywionych. Ruch na takich trasach z prędkościami, dla których występuje niedobór przechyłki toru, może już stanowić dostatecznie duże wymuszenie początkowe uniemożliwiające zidentyfikowanie obszarów rozwiązań wielokrotnych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę MNiSW w latach 2009-2011 jako projekt badawczy nr N N509 403136.

Bibliografia

1. Dusza M., Zboiński K.: Badania stateczności ruchu pojazdu szynowego w torze zakrzywionym metodą symulacji komputerowej. *Kwartalnik naukowo – techniczny Pojazdy Szynowe* nr 2/2004, str. 28 ÷ 34.
2. Gasch R., Moelle D., Knothe K.: The effect of non-linearities on the limit-cycles of railway vehicles, *Proceedings of the 8th IAVSD-Symposium*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, Swets & Zeitlinger, pp. 207-224, Lisse, 1984.
3. Hoffmann M., True H.: The dynamics of European two-axle railway freight wagons with UIC standard suspension, *Vehicle System Dynamics*, Berkeley 2007, Vol. 46, Supplement, pp. 225-236, Taylor & Francis, UK, 2008.
4. Kisilowski J., red.: *Dynamika układu mechanicznego pojazdu szynowy – tor*, PWN, Warszawa 1991.
5. Moelle D., Gasch R.: Nonlinear bogie hunting, *Proceedings of the 7th IAVSD Symposium*, Cambridge University, UK, Swets & Zeitlinger, pp. 455-467, Lisse, 1982.
6. Zboiński K.: *Metodyka modelowania dynamiki pojazdów szynowych z uwzględnieniem zadanego ruchu unoszenia i jej zastosowania*, *Prace Naukowe Transport*, z 43, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.
7. Zboiński K., Dusza M.: Development of the method and analysis for non-linear lateral stability of railway vehicles in a curved track, *Proceedings of 19th IAVSD Symposium*, Milan 2005, supplement to *Vehicle System Dynamics* vol. 44, 2006, pp. 147-157.
8. Zboiński K., Dusza M.: Bifurcation approach to the influence of rolling radius modelling and rail inclination on the stability of railway vehicle in a curved track, *Proceedings of 20th IAVSD Symposium*, Berkeley 2007, supplement do *Vehicle System Dynamics*, vol. 46, 2008, pp. 1023-1037.
9. Zboiński K., Dusza M.: Self-exciting vibrations and Hopf's bifurcation in non-linear stability analysis of rail vehicles in curved track, *European Journal of Mechanics, Part A/Solids*, vol. 29, no. 2, pp. 190-203, 2010.

RAILWAY VEHICLE MODEL STABILITY ANALYSIS IN THE CONTEXT OF MULTIPLE SOLUTIONS EXISTENCE

Abstract: Results presented in the article are continuation of studies that have been carried out by the authors for few years [1, 7-9]. Inspection of results obtained by other authors which treat similar issues, e.g. [2, 3, 5], induced to make detailed research of railway vehicle stability in order to detect existence of multiple (coexisting) solutions. Several series of the studies were done with use of numerical simulation. Variation of initial conditions (wheelset's lateral displacements) was the major idea used while detecting multiple solutions.

Keywords: railway vehicle dynamics, stability, numerical simulation