

Badania stateczności ruchu pojazdu szynowego w torze zakrzywionym metodą symulacji komputerowej

W artykule przedstawiono metodę badań symulacyjnych stateczności ruchu pojazdu szynowego i wybrane wyniki badań. Metoda pozwala na określenie istnienia i zakresu występowania statecznych cykli granicznych, których parametry są źródłem informacji niezbędnych do utworzenia tzw. mapy stateczności ruchu pojazdu, obejmującej łuki kołowe i tor prosty. Przykładowe wyniki badań uzyskane wymienioną metodą dotyczą próby określenia wpływu zużycia szyn i kół na stateczność ruchu pojazdu szynowego.

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego KBN nr 4 T12C 027 26.

1. Wstęp

Badania i próba opisu w układach technicznych zjawiska generowania się drgań samowzбудnych w pewnym zakresie parametrów, jest stosunkowo zwięźle prezentowana w literaturze. Dostępne publikacje dotyczą najczęściej konkretnych modeli obiektów technicznych, pracujących w ściśle określonym układzie oddziaływania czynników zewnętrznych. Bardziej kompleksowe podejście jest utrudnione ze względu na skomplikowany charakter zjawiska i związane z tym trudności jego identyfikacji.

Niniejsza praca prezentuje istotę metody badawczej i fragment szerszych badań prowadzonych przez autorów. Dotyczą one symulacji ruchu 2-osowego pojazdu szynowego. Dostępne publikacje z tej tematyki, np. [1, 3] dotyczą badań modeli pojazdów poruszających się po torze prostym. Przedstawiona metoda umożliwia rozszerzenie zakresu badań na łuki kołowe o stałej zadanej wartości promienia.

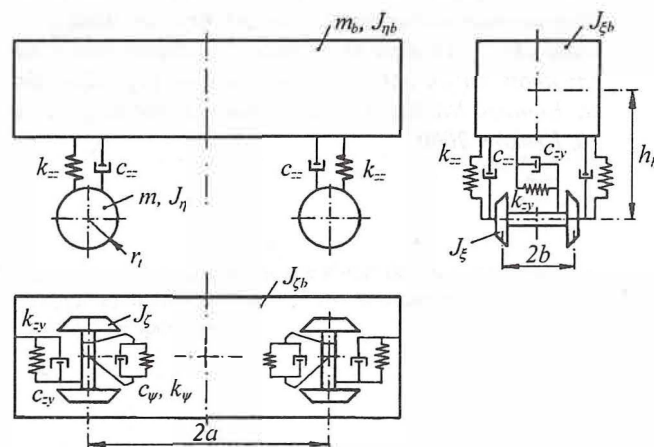
Istota metody polega na analizie wykresów drgań samowzбудnych (cykli granicznych), powstających w układzie na skutek przekroczenia wartości krytycznej parametru aktywnego, którym w badanym układzie jest prędkość ruchu modelu v . Parametry badanych cykli granicznych są źródłem informacji niezbędnych do określenia wartości charakterystycznych parametru aktywnego tj. prędkości krytycznej v_n i prędkości wykolejenia v_d [1, 8]. Oprócz tego możliwe jest określenie charakteru narastania przemieszczeń wybranych elementów modelu oraz wartości międzyszczytowych tych przemieszczeń. Dotychczas w badaniach autorów elementem wybranym był zawsze nabiegający zestaw kołowy, a przedmiotem obserwacji jego przemieszczenia poprzeczne.

Badany model wykorzystuje tablice parametrów kontaktowych utworzone dla profili kół i szyn stosowanych na kolejach europejskich. Przykładowe wyniki zamieszczone w pracy skupiają się na badaniu wpływu zużycia powierzchni toczeniowych kół i szyn na własności dynamiczne badanego modelu.

Pozytywna weryfikacja metody dla wybranego modelu pojazdu szynowego jest przesłanką do rozszerzenia zakresu jej zastosowania na inne modele pojazdów oraz badania dynamiki pojazdu w krzywych przejściowych i na trasach w zakresie prędkości od v_n do v_d .

2. Badany obiekt i metoda modelowania

Badania dotyczyły obiektu o strukturze podanej na rys. 1. Odpowiada ona wagonowi towarowemu HSFV1 British Rail. Model ten uzupełniony jest o modele toru pionowo [2] i poprzecznie [7] podatnego. Uwzględniając więzy układ ma łącznie 18 stopni swobody. Parametry pojazdu i toru podano w [5 i 7].



Rys. 1. Struktura modelu obiektu

Model matematyczny zbudowano zgodnie z metodą 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:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_w}{\partial \dot{q}_p} \right) - \frac{\partial E_w}{\partial q_p} = Q_{Zp} + Q_{Bp}, \quad p = 1, \dots, k, \quad (1)$$

Gdzie: q_p - współrzędne uogólnione ruchu względnego,

Q_{zP} - uogólnione siły zewnętrzne,

Q_{BP} - uogólnione siły pozorne (siły bezwładności zależne od ruchu unoszenia),

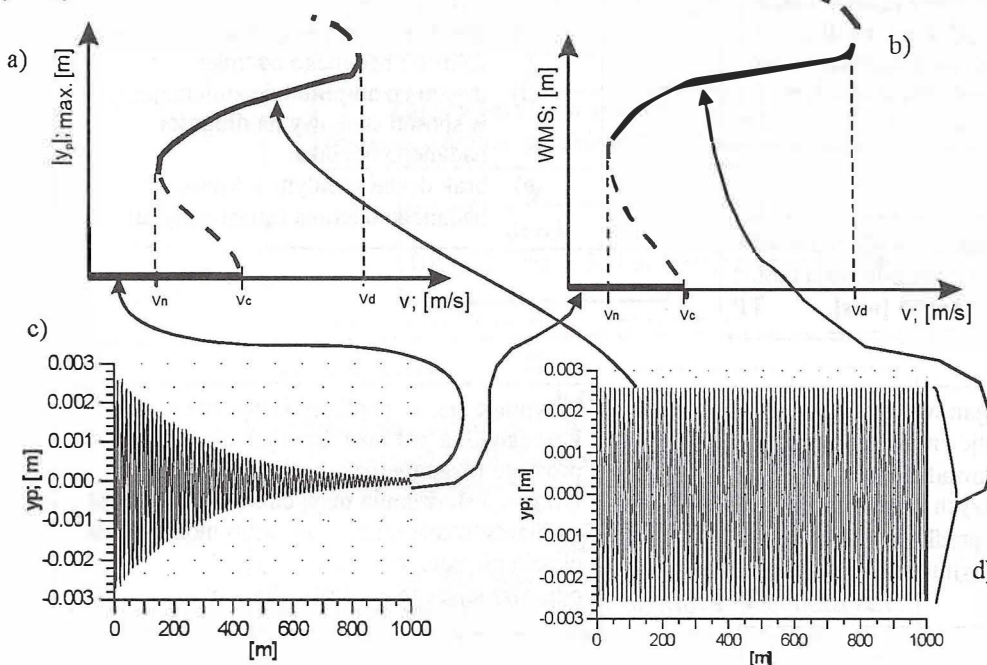
k - liczba stopni swobody,

E_w - energia kinetyczna ruchu względnego.

Równania (1) i sposób wyznaczania sił Q_{BP} 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 badań

Jak wspomniano badania dotyczą zasadniczo drgań nabiegającego zestawu kołowego. Pierwszym etapem badań jest określenie wartości prędkości krytycznej v_n . Prowadzone w tym celu symulacje ruchu rozpoczynają się od małych prędkości i toru prostego (drzania mają wówczas charakter gasnący – rys. 2c). Jest to przypadek stateczności asymptotycznej.



Rys. 2. Schemat poglądowy metody

Zdecydowana większość symulacji (z dotychczas przeprowadzonych) realizowana była na odcinku drogi o długości $l = 500$ m. Ze względu na twardy charakter pobudzenia cyklu granicznego [8 i 9] oraz w celu skrócenia odcinka ustalania się amplitudy drgań, na oba zestawy kołowe nałożone były poprzeczne wymuszenia początkowe o wartości 0,0045 m.

W szczególnych przypadkach, kiedy wyniki symulacji z odcinka o długości $l = 500$ m, nie pozwalają na jednoznaczne określenie zachowania modelu, można wydłużyć badany odcinek drogi. Wiąże się to jednak z wydłużeniem czasu obliczeń. Zwiększając w kolejnych symulacjach prędkość ruchu pojazdu, wydłuża się odcinek wygasania drgań oraz rośnie ich amplituda dla analogicznych odcinków drogi. Stan taki utrzymuje się do pewnej wartości prędkości, przy której amplituda drgań wykazuje stałą

wartość na dowolnie długim odcinku drogi (drzania mają charakter statecznych cykli granicznych). Najmniejsza prędkość, dla której drzania mają już charakter ustalony (cykl graniczny - Rys. 2d), przynajmniej w końcowej części badanego odcinka, przyjmowana jest jako wartość krytyczna v_n dla badanego modelu.

Kolejnym etapem badań jest określenie własności modelu poruszającego się z prędkością przekraczającą wartość krytyczną. Symulacje prowadzi się tu zwiększając kolejno prędkość, zarówno na torze prostym jak i łukach kołowych, korzystając z faktu, że prędkość krytyczna w łuku kołowym i torze prostym ma tę samą wartość [5, 7]. Zakończeniem badań na trasie danego typu jest dojście do prędkości wykoślenia [1]. Jest to wartość prędkości, przy której drzania mają charakter narastający a na długości badanego odcinka pojawia się wykoślenie [8]. Z punktu widzenia teorii cykli granicznych i bifurkacji, o punktach odpowiadających prędkości krytycznej i wykoślenia należy myśleć jako o punktach bifurkacji, to jest zmiany typu rozwiązania układu.

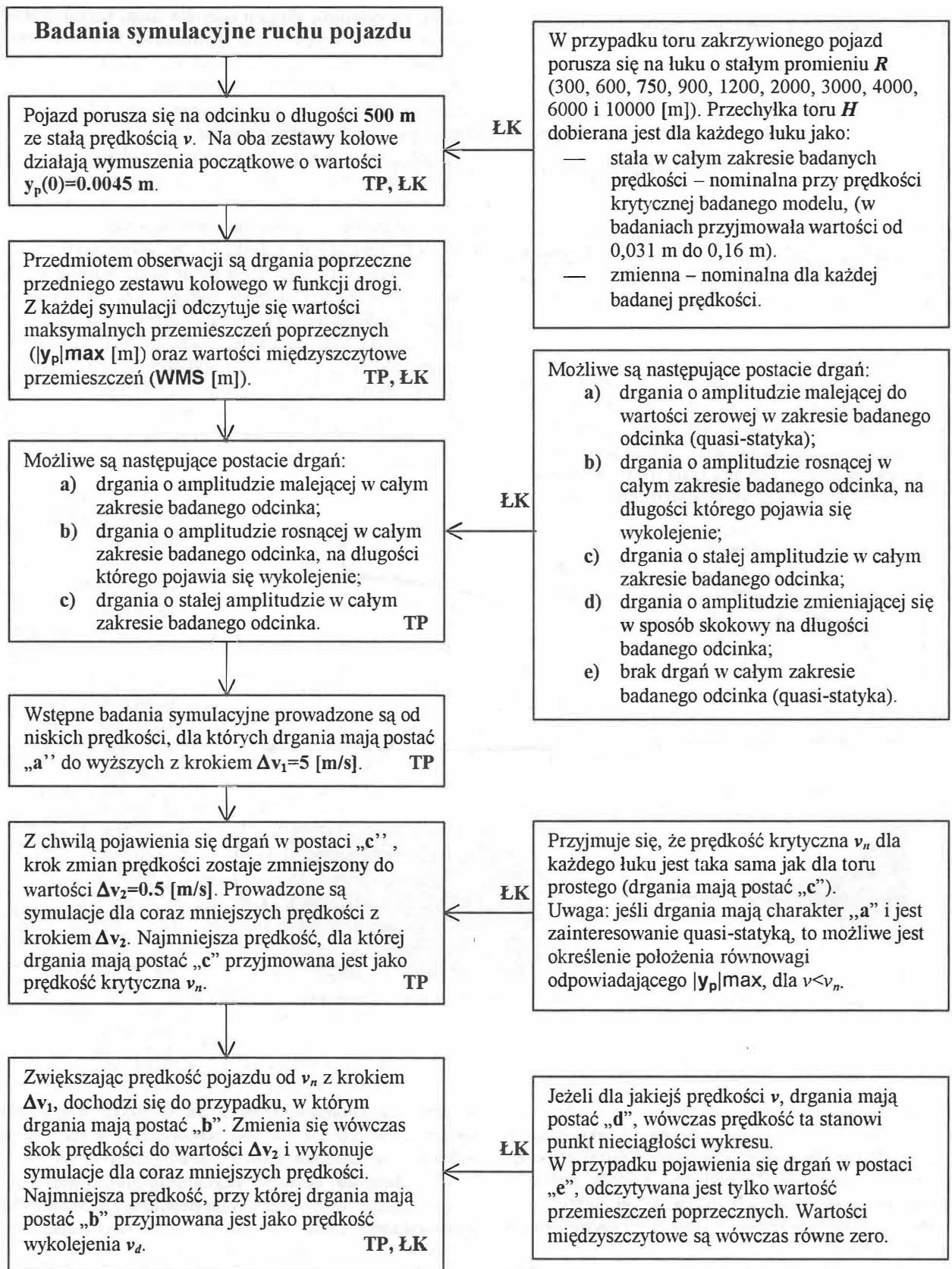
Ostatecznym wynikiem badań jest utworzenie tzw. mapy stateczności ruchu pojazdu [8]. Są to wykresy obrazujące zależność maksymalnych przemieszczeń poprzecznych zestawu kołowego $|y_p|_{max}$ i wartości międzyszczytowych tych przemieszczeń **WMS** w funkcji prędkości. Schemat poglądowy metody przedstawiony jest na rys. 2.

Model umożliwia przyjęcie tablic parametrów kontaktowych dla dowolnych zarysów powierzchni toczonej kół i szyn.

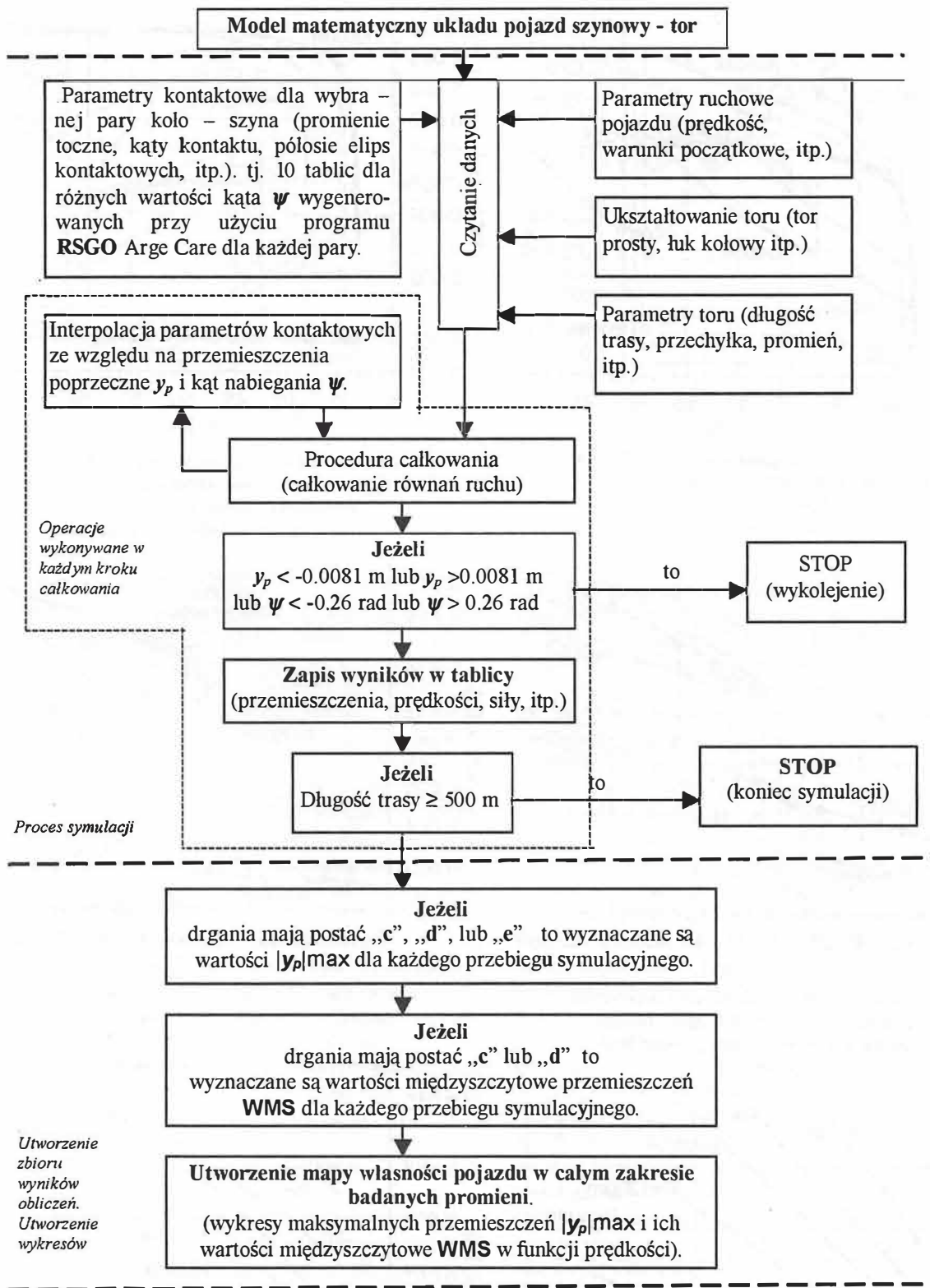
W dotychczasowych badaniach [8, 9, 10] używano tablic wygenerowanych dla zarysów typowych, tj. szyn: UIC60, SZDR65, S49 oraz kół: S1002, BR-P10 i SZDwheel.

Możliwa jest dowolna kombinacja profilu pary kolo-szyna. Istnieje możliwość użycia profili nominalnych (bez jakichkolwiek oznak zużycia lub uszkodzeń) i częściowo zużytych.

Na rys. 3 zamieszczony jest schemat blokowy działania metody z wyszczególnieniem przypadków występujących na torze prostym TP i łuku kołowym ŁK. Kolumna lewa zawiera bloki typowe dla toru prostego i te wspólne z łukiem kołowym. Kolumna prawa zawiera bloki ważne wyłącznie dla łuku kołowego. Rysunek 4 przedstawia algorytm obliczeń i prezentacji wyników.



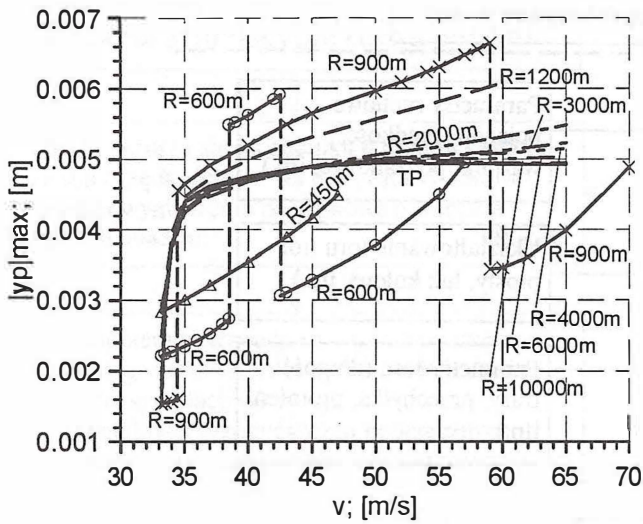
Rys. 3. Metoda badań



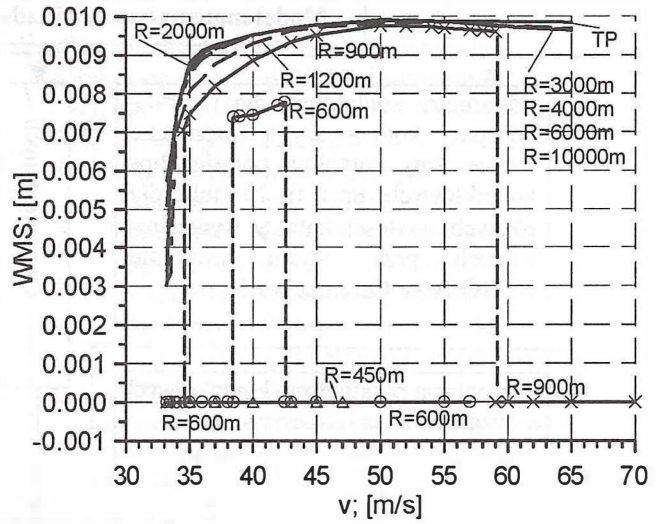
1. Wyniki badań

W oparciu o przedstawioną metodę przeprowadzono szereg badań [8, 9, 10] w celu określenia wpływu wybranych czynników na stateczność ruchu modelu pojazdu o strukturze przedstawionej na rys. 1. Analizowano wpływ: zarysów powierzchni tocznych kół i szyn (zarówno nominalnych jak i częściowo zużytych), wartości parametrów układu zawieszenia i przechyłki toru.

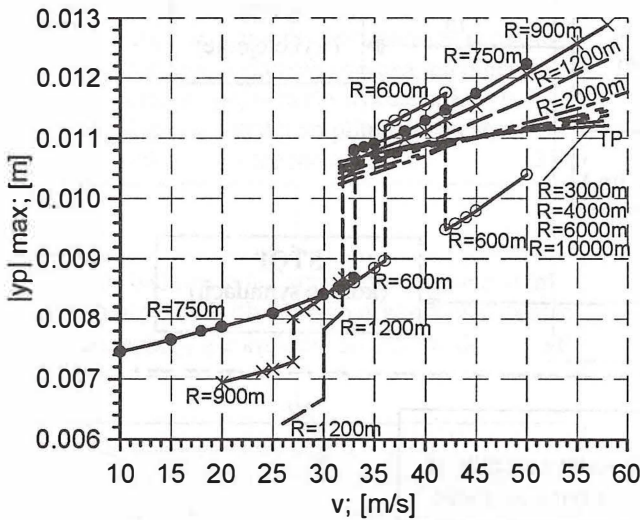
Prezentowane w pracy wyniki dotyczą tego samego modelu, badanego w dwóch wariantach. Raz wyposażono go w tablicę parametrów kontaktowych utworzoną dla szyny S49 i koła S1002, drugi raz dla szyny UIC60 i koła S1002. Badania mają na celu określenie wpływu zużycia powierzchni tocznej w pierwszym przypadku szyny S49, a w drugim koła S1002 na stateczność ruchu pojazdu. Wyniki zestawiono na rys. 5 ÷ 12.



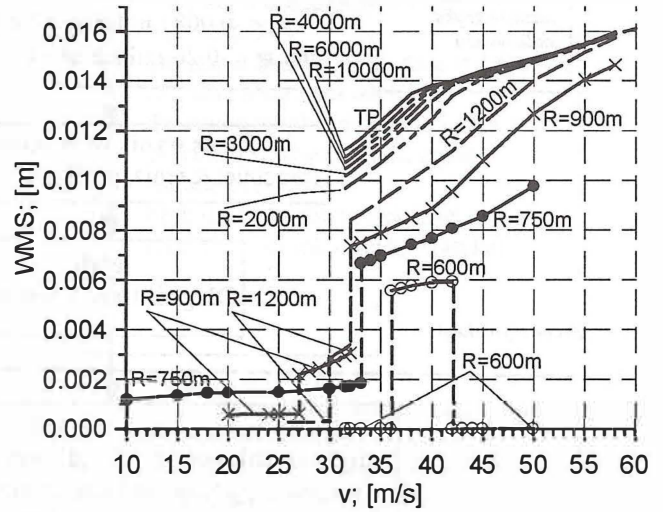
Rys. 5. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Profile toczne S49-S1002 nominalne.



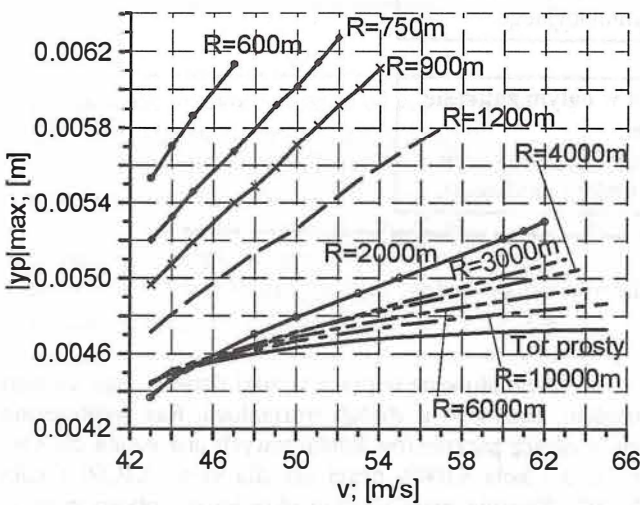
Rys. 6. Wartości międzyszczytowe maksymalnych przemieszczeń poprzecznych nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Profile toczne S49-S1002 nominalne



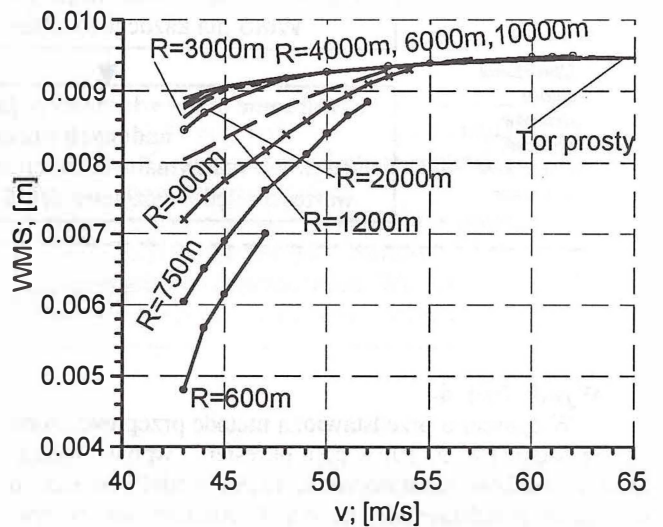
Rys. 7. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Częściowo zużyte powierzchnie toczne szyn S49.



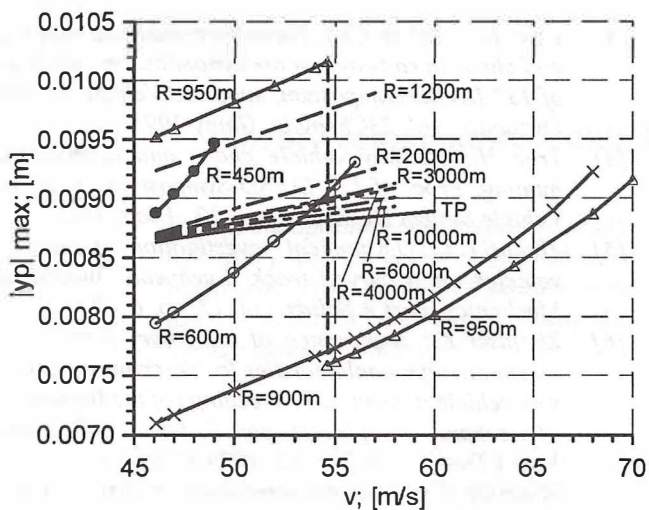
Rys. 8. Wartości międzyszczytowe maksymalnych przemieszczeń poprzecznych nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Częściowo zużyte powierzchnie toczne szyn S49.



Rys. 9. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Profile toczne UIC60-S1002 nominalne



Rys. 10. Wartości międzyszczytowe maksymalnych przemieszczeń poprzecznych nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Profile toczne UIC60-S1002 nominalne



Rys. 11. Maksymalne przemieszczenia poprzeczne nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Częściowo zużyte powierzchnie toczne kół S1002.

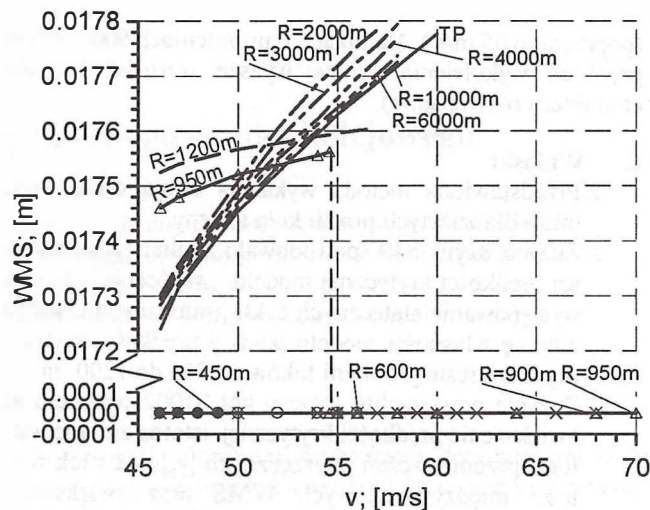
5. Analiza wyników badań

Prędkość krytyczna modelu z nominalnymi powierzchniami tocznymi kół S1002, poruszającego się po torze o nominalnych zarysach powierzchni tocznych szyn S49, wyniosła 33 m/s (rys. 5). Pierwszą charakterystyczną cechą modelu, jest gwałtowny wzrost wartości maksymalnych przemieszczeń poprzecznych zestawu kołowego (y_p max) jak i wartości międzyszczytowych (WMS) tych przemieszczeń (rys. 6) w zakresie prędkości 33 ÷ 35 m/s. Powyżej prędkości 35 m/s zmiany parametrów zachodzą mniej intensywnie. Drugą charakterystyczną cechą modelu jest zmiana charakteru rozwiązań zaobserwowana na trasach o promieniach $R = 600$ i 900 m. W pierwszym przypadku skokowe zmiany wartości przemieszczeń poprzecznych i WMS zachodzą przy prędkościach 38,5 m/s i 42,5 m/s. Następuje wówczas wzrost wartości przemieszczeń od ok. 0,0028 m do ok. 0,0056 m. Na wykresie WMS odpowiada to przejściu od wartości zerowych (quasi-statyka) do ok. 0,0074 m.

Zakres utrzymywania się statecznych cykli granicznych kończy się przy prędkości 42,5 m/s. Następuje wówczas przeskok wartości przemieszczeń w dół do ok. 0,003 m i WMS do poziomu zero. Na łuku o promieniu 900 m, analogiczne „przeskoki” rozwiązań występują przy prędkościach 34,5 m/s i 59 m/s.

Największe przemieszczenia poprzeczne wystąpiły na łuku o promieniu $R = 600$ m (w zakresie prędkości 38,5 ÷ 42,5 m/s). W miarę zwiększania promienia łuku przemieszczenia malały osiągając najmniejsze wartości na torze prostym. Najmniejsze WMS wystąpiły na łuku o promieniu 600 m i wyniosły ok. 0,0075 m w podanym wyżej zakresie prędkości. Poniżej i powyżej tego zakresu prędkości WMS są równe zero (quasi-statyka).

Dla większych promieni łuków linie WMS są zbliżone do siebie i osiągają wartości ok. 0,01 m. Badania tego samego modelu poruszającego się po torze o częściowo zużytych powierzchniach tocznych szyn S49, przyniosły istotne zmiany zachowania. Na szczególną uwagę zasługuje fakt pojawienia się drgań samowzbudnych o niewielkich WMS (ok. 0,001 m, rys. 8), poniżej prędkości krytycznej 31,5 m/s.



Rys. 12. Wartości międzyszczytowe maksymalnych przemieszczeń poprzecznych nabiegającego zestawu kołowego w funkcji prędkości. Zużyte powierzchnie toczne kół S1002.

Największa intensywność tego zjawiska występuje na łuku o promieniu 750 m (rys. 7), gdzie drgania pojawiają się już przy prędkości 10 m/s. Na łukach o promieniach 900 i 1200 m zjawisko to występuje w mniejszym przedziale prędkości. Przy prędkości krytycznej występuje charakterystyczny skok wartości przemieszczeń i WMS do wyższego zakresu. Ogólnie można zauważyć nieznaczne zmniejszenie się wartości prędkości krytycznej do 31,5 m/s (poprzednio 33 m/s) oraz „skrócenie” obszaru występowania statecznych cykli granicznych. Prędkość wykolejenia na torze prostym wyniosła 58 m/s (poprzednio 65 m/s).

Drugi przedstawiony wynik badań dotyczy tego samego modelu wyposażonego w tablicę parametrów kontaktowych utworzoną dla szyny UTC 60 i koła S1002. Prędkość krytyczna modelu wyniosła 43 m/s. Największe przemieszczenia poprzeczne zestawu kołowego wystąpiły na łuku o promieniu 750 m i wyniosły ok. 0,0063 m (rys. 9). W miarę zwiększania promienia łuku przemieszczenia maleją przy analogicznych prędkościach, osiągając minimum na torze prostym.

Najmniejsze WMS wystąpiły na łuku o promieniu 600 m (Rys. 10). W miarę zwiększania promienia łuku, rosły WMS przy analogicznych prędkościach, osiągając dla większych promieni wartości zbliżone do tych dla toru prostego (maksymalnie 0,0095 m). Prędkość wykolejenia na torze prostym wyniosła 65 m/s. Ten sam model wyposażony w częściowo zużyte powierzchnie toczne kół S1002, wykazywał odmienne własności, niekiedy znacząco. Prędkość krytyczna wzrosła do 46 m/s. Zauważalny jest wzrost wartości maksymalnych przemieszczeń (rys. 11) w stosunku do poprzedniego przypadku przy analogicznych prędkościach. W miarę zwiększania promienia łuku przy wartości $R = 950$ m występuje zmiana charakteru rozwiązania, objawiająca się skokową zmianą wartości przemieszczeń poprzecznych i WMS. Dla mniejszych badanych promieni łuków w całym zakresie prędkości wystąpiła quasi-statyka (WMS=0, rys. 12). Dla łuku o promieniu 950 m widoczna skokowa zmiana WMS występuje przy prędkości 54,6 m/s. Dla większych promieni łuków zauważalna jest znacząca zmiana WMS w porównaniu z poprzednim przypadkiem. Prędkość wykolejenia na torze prostym wyniosła 60 m/s

(poprzednio 65 m/s). Na łukach o promieniach 900 i 950 m prędkość wykolejenia osiąga wyższe wartości (zmiana charakteru rozwiązania).

6. Wnioski

1. Przedstawiona metoda wykazała swoją skuteczność także dla zużytych profili koła i szyny.
2. Zużycie szyny S49 spowodowało zmniejszenie wartości prędkości krytycznej modelu, „skrócenie” obszaru występowania statecznych cykli granicznych i istotną zmianę własności modelu poniżej prędkości krytycznej w zakresie promieni łuków od 750 do 1200 m.
3. Zużycie powierzchni tocznej kół S1002 wpłynęło na zwiększenie prędkości krytycznej, istotną zmianę wartości przemieszczeń poprzecznych $|y_p|_{\max}$ i ich wartości międzyszczytowych WMS oraz zwiększenie prędkości wykolejenia dla promieni łuków 900 i 950 m.

Literatura

- [1] 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, Chengdu, Chiny, 1993.*
- [2] Kisilowski J., red.: *Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy – tor. PWN, Warszawa 1991.*
- [3] 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 Chengdu, Chiny 1993.*
- [4] True H.: *Railway vehicle chaos and asymmetric hunting. Proc. of 12th IAVSD Symposium, suppl. to Vehicle System Dynamics, vol. 20, 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, 1998.*
- [6] 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, Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 213, F3, 1999.*
- [7] Zboiński K.: *Metodyka modelowania dynamiki pojazdów szynowych z uwzględnieniem zadanego ruchu unoszenia i jej zastosowania. Prace Naukowe Transport, z. 43, Oficyna Wyd. PW, 2000.*
- [8] 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.*
- [9] Zboiński K., Dusza M.: *Symulacyjne badania dynamiki pojazdów szynowych w torze zakrzywionym. XV Konferencja Pojazdy Szynowe, tom 2, Szklarska Poręba 2002.*
- [10] Zboiński K., Dusza M.: *Komputerowe badania wpływu przechyłki toru na stateczność pojazdu szynowego w łuku. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport z. 49, Gliwice 2003.*