

Michał Opala, Andrzej Chudzikiewicz, Józef Drożdziel, Bogdan Sowiński
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

SYMULACYJNA OCENA MONITOROWANIA STANÓW POJAZDU SZYNOWEGO TYPU WAGON

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki badań nad sposobem monitorowania i diagnozowania uszkodzeń elementów zawieszenia pojazdów szynowych z pozycji pokładu wagonu. Na etapie koncepcji, sposób ten poddano ocenie symulacyjnej, przedstawiono przykładowe wyniki analiz i wnioski. Wykorzystano dwa modele pojazdu szynowego- model wagonu pasażerskiego i towarowego.

Słowa kluczowe: monitorowanie, diagnostyka pojazdów szynowych, symulacja komputerowa

1. WSTĘP

Przyczyny mechaniczne obniżenia poziomu bezpieczeństwa ruchu pociągów można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa obejmuje uszkodzenia związane z pojazdami stanowiącymi skład pociągu (lokomotywa, wagony), druga grupa z torem. Dotychczas stosowane metody monitorowania tych uszkodzeń polegają na rejestrowaniu odpowiednich wielkości w postaci sygnałów drganiowych elementów pojazdu i/lub toru albo sygnałów akustycznych generowanych przez jadący pociąg. Rejestracja tych sygnałów może odbywać się na stanowiskach stacjonarnych (np. przy torze) lub pokładowych (zainstalowanych na pokładzie pociągu lub wagonu). Należy zaznaczyć, że monitoring, który jest przedmiotem naszego zainteresowania nie dotyczy części funkcjonalnej pociągu, istotnej z punktu widzenia użytkownika (np. wentylacja, klimatyzacja, działanie oświetlenia, otwieranie i zamykanie drzwi, itp.). Interesuje nas stan techniczny części jezdnych pojazdów szynowych w czasie ich eksploatacji oraz innych ważnych elementów mechanicznych odpowiedzialnych za bezpieczeństwo prowadzenia pojazdów w torze.

Badania symulacyjne właściwości dynamicznych pojazdów zostały przeprowadzone pod kątem monitoringu pokładowego, tzn. możliwości rejestracji sygnałów diagnostycznych w odpowiednich miejscach pojazdu podczas jazdy.

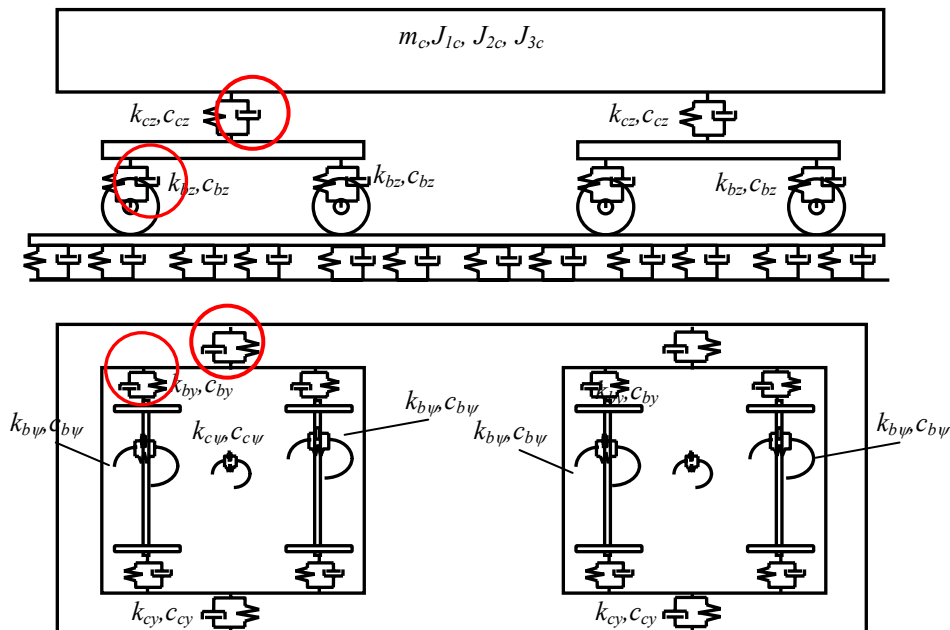
2. MODEL MATEMATYCZNY

W badaniach symulacyjnych wykorzystano modele wagonu pasażerskiego i towarowego wraz z odpowiednim modelem toru. Wymuszenia dla tego układu pojazd szynowy-tor mają głównie charakter kinematyczny, źródłem wymuszeń są nierówności geometryczne toru przyjęte na podstawie pomiarów.

2.1. Model wagonu pasażerskiego

Do modelu symulacyjnego przyjęto parametry wagonu osobowego produkcji HCP/ABB Henschel o standardzie wg UIC - **Z1B** (ozn. literowe **Bdmnu**).

Wagon jest wyposażony w wózki typu MD524. Model nominalny wagonu osobowego jest pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Model nominalny wagonu osobowego. Okręgami zaznaczono elementy zawieszenia I i II stopnia z symulowanymi uszkodzeniami. Oznaczenia: k- sztywność, c- tłumienie, J- moment bezwładności, m-masa.

2.2. Model wagonu towarowego

Do obliczeń symulacyjnych przyjęto model czteroosiowego wagonu towarowego serii *Eanos 423W*, parametry techniczne wózka przyjęto dla typu 6RS/N oraz Y25. Model nominalny wagonu towarowego charakteryzuje się większą masą nadwozia, efektem tego są inne parametry sztywności i tłumienia elementów zawieszenia w stosunku do modelu wagonu pasażerskiego. Rama wózka spoczywa na dwóch zestawach kołowych za pośrednictwem zawieszenia progresywnego o dwóch stopniach podatności. Pionowe ruchy

ramy wózka tłumione są tłumikiem ciernym suchym, którego charakterystyka została przybliżona funkcją arctg. Statyczna siła nacisku na oś zestawu kołowego wynosi 225kN 10.

2.3. Model ruchu pojazdu po torze

Zasady modelowania matematycznego wagonu osobowego i towarowego są takie same i będą opisane w jednym punkcie. Termin pojazd szynowy oznacza jeden z wymienionych wagonów. Model pojazdu traktowany jako układ niskoczęstotliwościowy (do ok. 30 – 50 Hz) składa się z nadwozia i dwóch wózków [1]. Każdy wózek składa się z ramy traktowanej jako bryła sztywna i dwóch zestawów kołowych. Założenia dotyczące modelu układu przy założeniu, że tor jest sztywny są następujące:

- ruch względny jest opisany w nieinercyjnym układzie odniesienia, którego początek znajduje się na linii środkowej toru, poruszającym się razem z pojazdem ze stałą prędkością,
- model pojazdu ma w ruchu po torze sztywnym 27 stopni swobody i składa się z takich brył sztywnych jak nadwozie, dwie ramy wózków i cztery zestawy kołowe,
- każdy zestaw ma 3 stopnie swobody: przemieszczenie poprzeczne, kąt nabiegania i toczenia,
- każda rama wózka i nadwozie mają po 5 stopni swobody: przemieszczenia pionowe i poprzeczne oraz trzy kąty obrotu,
- ruch wzdłużny niezaburzony każdej z brył jest jednostajny $x_b = v \cdot t$ (przemieszczenie bezwzględne) gdzie v prędkość pojazdu,
- bryły sztywne są połączone bezmasowymi elementami sprężysto-tłumiącymi o liniowych charakterystykach (oprócz zawieszenia Ist. wagonu towarowego),
- siły bezwładności związane są z nieinercyjnością układu współrzędnych, zaś siły styczne są obliczane numerycznie zgodnie z procedurą *Fastsim* [2],
- poślizgi są wyznaczone zgodnie z powszechnie przyjmowaną dość prostą postacią np. [3],
- wyznaczanie sił normalnych w kontakcie jest zgodne z 4,
- profile kół S1002 i szyn UIC60 przyjęto jako nominalne (nowe), pochylenie szyn jest stałe i wynosi 1:40,
- opis nierówności toru i jego topologia jak również opis profili kół i szyn stanowią więzy ruchu zestawu kołowego.

3. SYMULACYJNE BADANIE WPLYWU WYBRANYCH USZKODZEŃ MECHANICZNYCH POJAZDU SZYNOWEGO NA JEGO DYNAMIKĘ

W tej części przedstawiono zakres symulacji ze względu na warunki eksploatacyjne oraz przyjęte typy uszkodzeń mechanicznych układu biegowego pojazdu, które poddane były monitorowaniu.

3.1. Zakres symulacji

Ustalając zakres symulacji brano pod uwagę zmienne warunki eksploatacji składów pociągów osobowych i towarowych. Na te warunki mają wpływ: zmienny stan torów, zakres prędkości jazdy, poziom zużycia różnych elementów jezdnych wagonów. Przyjęto założenie, że wyniki symulacji wagonu z wprowadzonym uszkodzeniem (anomalia) są oceniane na podstawie porównania z odpowiednimi wynikami symulacji wagonu bez uszkodzenia (wzorzec), tzn. wagonu o parametrach nominalnych.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla trzech kategorii toru QN1, QN2 i QN3. Różnią się one stanem technicznego utrzymania. Tor kategorii QN1 jest najlepszy ze względu na jakość utrzymania, jest dopuszczony dla prędkości do 200 km/h. Pozostałe kategorie są dopuszczone odpowiednio dla niższych prędkości 9. Odcinki toru każdej kategorii zostały scharakteryzowane za pomocą czterech nierówności geometrycznych, nierówności te stanowiły sygnały wejściowe w modelu symulacyjnym.

Oczywiście, przy doborze zakresu zmian prędkości przyjmowanego w obliczeniach symulacyjnych brano pod uwagę rodzaj pojazdu (osobowy, towarowy, inny) a także rodzaj uszkodzenia. Wykonano w sumie dla wagonu osobowego i towarowego ok. 400 symulacji na odcinkach toru o długościach ok. 500 m.

3.2. Uszkodzenia testowane w programie symulacyjnym

Uszkodzenia wprowadzano do modelu pojazdu w postaci odstrojenia wybranych parametrów od wartości nominalnych lub „wyłączenia” ich funkcji oraz poprzez wprowadzanie odpowiednio zamodelowanych zmian parametrów układu. Wybrane do analizy uszkodzenia są natury mechanicznej i odnoszą się przede wszystkim do części jezdnych i zawieszenia pojazdu. W tym artykule przedstawiono jedynie część poświęconą uszkodzeniom zawieszenia, pominięto rezultaty badań odnoszące się do części tocznych (np. utrata kołowości kół, pojedyncze spłaszczenie koła). Uszkodzenia części tocznych mogą być decydującym czynnikiem w zagrożeniu bezpieczeństwa jazdy, wyniki badań poświęconych temu zagadnieniu przedstawione zostaną w osobnym artykule. Przyjęto założenie, że w czasie każdej symulacji występuje tylko jedno uszkodzenie. W rzeczywistych warunkach może zdarzyć się jednoczesne występowanie dwóch lub więcej uszkodzeń. Na tym etapie nie badano takich przypadków.

Badane uszkodzenia układu zawieszenia pojazdu zostały wyróżnione i ponumerowane dla celów porównawczych następująco:

- 1) Jednostronne uszkodzenie usprężynowania pionowego Ist. dla skrajnego zestawu
- 2) Jednostronne uszkodzenie usprężynowania poprzecznego Ist. dla skrajnego zestawu.
- 3) Jednostronne uszkodzenie usprężynowania pionowego IIst. dla jednego wózka.
- 4) Jednostronne uszkodzenie usprężynowania poprzecznego IIst. dla jednego wózka

Uszkodzenia w pozycjach 1,2,3,4 oznaczają redukcję o 50% sztywności nominalnej sprężyny zawieszenia lub redukcję tłumienia o 100%. Wyniki dla tych pozycji zostały pogrupowane w ten sposób, że uszkodzenia sprężyn oznaczono symbolami U1 – U4 oraz uszkodzenia tłumików U5 – U8. Wyniki dla parametrów nominalnych oznaczono symbolem W („wzorzec”).

Program badań obejmował symulacje po torze prostym z nierównościami odpowiadającymi kategorii torów QN1 i QN3.

4. WSKAŹNIKI WYKORZYSTANE PRZY OCENIE ORAZ PRZYKŁADOWE WYNIKI

Program symulacyjny generuje wyniki rozwiązania układu w postaci zmian w funkcji drogi (lub czasu) współrzędnych, prędkości i przyspieszeń środków mas zestawów kołowych, ram wózków i nadwozia pojazdu oraz kątów obrotu, prędkości i przyspieszeń kątowych. Na drodze prostych przekształceń można otrzymać przemieszczenia i ich pochodne dla innych punktów brył pojazdu niż te uzyskane z symulacji. Np. przemieszczenia ramy wózka w miejscu podparcia sprężyny zawieszenia I stopnia lub środka podłużnicy ramy wózka. Biorąc pod uwagę techniczne aspekty monitorowania stanu pojazdu i/lub toru z pokładu pojazdu oraz koszty skupiliśmy się na sygnałach przyspieszeń. Przyspieszenia są miarodajnymi sygnałami w ocenie dynamiki układu mechanicznego a ich pomiary i analizy są technicznie bardzo dobrze opanowane.

Uzyskane z symulacji sygnały przyspieszeń poddano analizie statystycznej w celu znalezienia wskaźników które mogłyby posłużyć do diagnozowania uszkodzeń elementów zawieszenia pojazdu szynowego. Do tej pory wykorzystano trzy grupy analiz. W pierwszej grupie znajdują się typowe funkcje statystyczne takie jak:

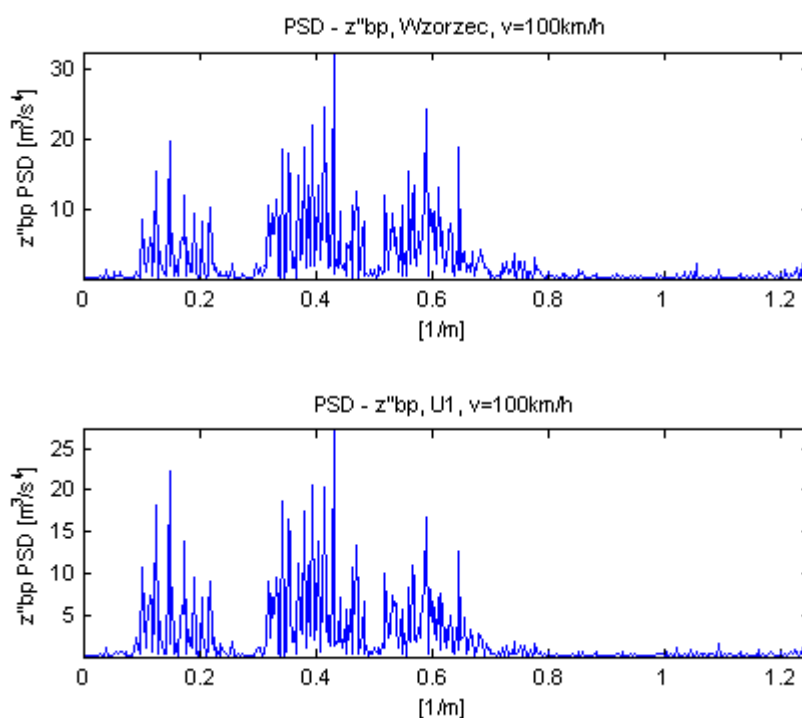
- Wartość średnia (+) z wartości dodatnich
- Wartość średnia (-) z wartości ujemnych
- Odchylenie standardowe
- RMS - wartość skuteczna
- |Maksimum| - wartość bezwzględna z wartości maksymalnych
- Współczynnik korelacji pomiędzy sygnałami z pojazdu wzorcowego i uszkodzonego
- Współczynnik korelacji PSD (dla gęstości widmowych mocy sygnału z pojazdu wzorcowego i uszkodzonego)

Analizowano wyniki przedstawione w postaci tabel i wykresów (przykład: tab.1, rys.2)

Tablica 1.

Przykładowe wyniki: przyspieszenie pionowe prawej strony ramy pierwszego wózka-na środku z''_{bp} . Wagon towarowy, tor QN1. Uszkodzenie U1 - Odstrojona prawa sprężyna pionowa między nadwoziem a ramą pierwszego wózka.

		V=40km/h		V=60km/h		V=80km/h		V=100km/h	
		W	U1	W	U1	W	U1	W	U1
Wartość średnia(+)		0,12	0,13	0,29	0,29	0,52	0,50	0,81	0,76
Wartość średnia(-)		-0,13	-0,13	-0,28	-0,29	-0,52	-0,50	-0,81	-0,75
Odchylenie standardowe		0,17	0,17	0,38	0,38	0,70	0,66	1,10	1,00
RMS		0,17	0,17	0,38	0,38	0,70	0,66	1,10	1,00
W-U	Maksimum	0,04		0,02		0,14		0,23	
	Wartość średnia(+)	0,01		0,00		0,02		0,05	
	Wartość średnia(-)	0,00		0,01		0,02		0,06	
	Odchylenie standardowe	0,00		0,00		0,04		0,10	
	RMS	0,00		0,00		0,04		0,10	
Współczynnik korelacji		0,87		0,93		0,96		0,95	
Współczynnik korelacji PSD		0,94		0,95		0,96		0,96	
Względne odchylenie standardowe		1,30		-0,96		-5,12		-8,77	



Rys.2. Widmowa gęstość mocy przyspieszeń pionowych prawej strony ramy pierwszego wózka-na środku z''_{bp} dla prędkości 100 km/h. Wykresy porównawcze dla wzorca i uszkodzenia (U1 - odstrojona prawa sprężyna pionowa między nadwoziem a ramą pierwszego wózka). Wagon towarowy, tor QN1

Druga grupa analiz opiera się na metodzie klasteryzacji. Klasteryzacja (grupowanie) jest jedną z metod nie nadzorowanej (bez dostępnej a priori wiedzy) analizy danych. Głównym celem klasteryzacji jest podział rozpatrywanego zbioru obiektów na grupy (klastry), w ten

sposób, aby każda z grup była możliwie jednorodna (tzn. zawierała elementy podobne do siebie), a jednocześnie poszczególne klastry były jak najbardziej zróżnicowane między sobą. Klasteryzację wykonano w dwóch konfiguracjach: uszkodzeń (klastrami były uszkodzenia U1-U8 i wzorzec W) oraz prędkości (klastrami były prędkości przejazdu 60-200km/h). Analizowano wyniki przedstawione w postaci dendrogramów pokazujących jak poszczególne klastry są ze sobą związane.

Trzecią grupę stanowiły dodatkowe analizy statystyczne, jako symptomy diagnostyczne uszkodzenia przyjęto:

a) względną różnicę odchylenia standardowego przyspieszeń między sygnałami W i U,

$$\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_w}\right) \cdot 100\%,$$

b) względną różnicę zakresów zmian amplitud sygnałów, zdefiniowaną jak wyżej,

c) współczynnik korelacji między sygnałami W i U,

d) względne porównanie kurtozy [8] jako miary spłaszczenia rozkładu gęstości prawdopodobieństwa sygnałów W i U.

5. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników symulacji można sformułować następujące wnioski:

- Stan utrzymania toru dominująco wpływa na dynamikę układu pojazd – tor. Zmiany w sygnałach badanych charakterystyk przyspieszeń są tym silniej maskowane przez wpływ nierówności toru im gorszy jest stan jego utrzymania. Może skutkować to tym, że symptomy pewnego uszkodzenia rejestrowalne podczas jazdy po dobrym torze są maskowane podczas jazdy po torze gorszym.
- Dynamika zestawu kołowego jest przede wszystkim zdeterminowana wpływem toru. Zatem pomiary sygnałów na zestawie dla monitorowania uszkodzeń powyżej zestawu są niecelowe. Z tego punktu widzenia stosunkowo najlepszym miejscem jest rama wózka. Przy czym diagnostyka oparta o pomiary na ramie danego wózka może dotyczyć tylko elementów w obrębie tego wózka (zawieszenia I i II stopnia, elementy układu jezdnego).
- Analiza parametrów statystycznych przyspieszeń pionowych lub poprzecznych (RMS, wartości ekstremalne, współczynniki korelacji, względne zmiany odchylenia std.) dla sygnałów wzorcowych (W) i z uszkodzeniami (U) wyraźnie zależą od prędkości jazdy pojazdu, ale trudno w tym przypadku ustalić jakąś tendencję i podjąć próbę uogólnienia. W analizowanych przypadkach sygnały W i U były na ogół wysoko skorelowane. Zastosowanie zatem współczynnika korelacji między odpowiednimi sygnałami przyspieszeń do detekcji uszkodzeń elementów zawieszenia nie wydaje się skuteczne (tab. 1).

- W dziedzinie częstotliwości, porównując widmowe gęstości mocy (PSD) sygnałów W i U, można w zdecydowanej większości stwierdzić bardzo zbliżone do siebie położenia lokalnych maksimów. Istotne różnice występują natomiast, (choć nie zawsze) przy porównaniu amplitud PSD (rys.2).

Badane modele poszczególnych uszkodzeń zawiesznień (1,2,3,4) są słabo diagnozowalne za pomocą przyjętych miar.

Bibliografia

1. Grassie S.L. Knothe K.: Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies. VSD, vol 22, 1993 (pp. 209-262).
2. Kalker J.J.: Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle Systems Dynamics, vol. 11, 1982, (pp.1-13).
3. Elkins J.,A.: Prediction of Wheel/Rail Interaction: The state of art. Proc. 12th IAVSD-Symp., Lyon, France 1991, (pp.1-27).
4. Masmoudi W., Castel L., Granville D.: A New Wheel-Rail Contact Element for Vehicle Dynamic Calculation, The Dynamics of Vehicle on Roads and on Tracks, Supplement to Vehicle System Dynamics, vol. 29, 1998, (pp.339-355).
5. Chudzikiewicz A., Drożdźiel J., Sowiński B., The influence of wheel and rail rolling surfaces wear on railway vehicle dynamics. Proc. of CSME Forum - 2004. The University of Western Ontario, Canada, June 1-4, 2004, pp.945-954.
6. Froehling R.D.: Low Frequency Dynamic Vehicle/Track Interaction: Modelling and Simulation. Vehicle System Dynamics. Supplement 28, 1998, pp. 30-46
7. Report., Dynamics of transient interaction of the rolling parts of a rail car with the track. (Drożdźiel J., et al.). KBN Grant No. 5 T12C 034 22. Warsaw University of Technology, Faculty of Transport Engineering. Warsaw, Nov. 2004 (in polish).
8. <http://pl.wikipedia.org/wiki/Kurtoza>
9. PN-EN 14363, Badania własności dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu, badania własności biegowych i próby stacjonarne
10. Drożdźiel J., Opala M., Sowiński B., "Symulacyjne badanie sił koło-szyna przy zwiększonych naciskach na oś w ruchu po torze nieregularnym", Konf. Transport XXI wieku, pp. 109, Warszawa 2004

SIMULATION ASSESSMENT OF THE MONITORING OF THE STATES IN THE WAGON-TYPE RAILWAY VEHICLE

Abstract: The paper describes some results of the study on the on-board monitoring and diagnosis of failures in the railway vehicles' running gear elements. The initial concept is submitted to the simulation analysis, the analysis exemplary results and conclusions are presented. Two railway vehicle models are used: passenger and freight car model.

Keywords: monitoring, railway vehicles diagnostics, computer simulation

Acknowledgement. *Artykuł powstał w związku z realizacją projektu MONIT („MONITOROWANIE TECHNICZNEGO STANU KONSTRUKCJI I OCENA JEJ ŻYWOTNOŚCI”), Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka Oś priorytetowa 1: Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Działanie 1.1: Wsparcie badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy*