

Mirosław Nader, Michał Opala, Jarosław Korzeb

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

WYBRANE ZAGADNIENIA BADANIA DYNAMIKI WAGONU TYPU PLATFORMA DO PRZEWOZU ZESTAWÓW DROGOWYCH

Rękopis dostarczono, kwiecień 2019

Streszczenie: W referacie przedstawiono pilotażową analizę dynamiki wagonu kolejowego przeznaczonego do przewozu zestawów drogowych. Uwadze poddano nowatorskie rozwiązanie konstrukcji wagonu, posiadającego ruchomą platformę, umożliwiającą przewozy pojazdów drogowych w ramach transportu intermodalnego. Przedstawiony w artykule opis techniczny uwzględnia zapisy Patentu nr 214797, na wynalazek pod nazwą „Kolejowy wagon transportowy oraz kolejowy zespół transportowy i system transportu kolejowego zawierający taki wagon”. W pracy przedstawiono koncepcję charakterystyki technicznej rozwiązania konstrukcji wagonu oraz zbudowano model symulacyjny wykorzystując autorskie oprogramowanie. Dokonano analizy parametrów technicznych, a następnie przeprowadzono pilotażowe badania symulacyjne. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dynamiki układu wagonu platformy, obciążonej typowym zestawem drogowym. Dokonano analizy wartości własnych dla elementów analizowanego układu, pozwalającej na wstępną ocenę zjawisk dynamicznych występujących w warunkach eksploatacji obciążonego wagonu. Badania mają charakter pilotażowy i stanowią wstęp do przeprowadzenia złożonych analiz symulacyjnych obejmujących badania dynamiki w łukach, krzywych przejściowych, oraz zużycie powierzchni tocznej kół i szyn przy różnych prędkościach ruchu.

Słowa kluczowe: kolejowy wagon transportowy; transportu intermodalny; dynamika pojazdu szynowego

1. WPROWADZENIE

Europejski rynek transportowy jest bogaty w rozwiązania techniczne służące do transportu naczip siodłowych i zestawów drogowych [4, 17]. Pomimo liczności rozwiązań stosowanych skutecznie na europejskim rynku przewozów intermodalnych, w Polsce nadal nie wprowadzono na stałe żadnego z rozwiązań, pozwalającego na skuteczne połączenie obszarów sąsiadujących z granicami Państwa, portami oraz w rejonach ważnych węzłów komunikacyjnych lub obszarów uprzemysłowionych [18]. Brak właściwego wyposażenia zainstalowanego na terenie lądowych terminali przeładunkowych, które umożliwiłoby w sposób

efektywny obsługę pociągów do przewozu zestawów drogowych implikuje konieczność prowadzenia inwestycji w tym zakresie. Przedstawione w ramach niniejszej pracy rozwiązanie, bazujące na zastosowaniu technologii przewozowo – przeładunkowej dla transportu kombinowanego, umożliwia wykonywanie czynności ładunkowych i przejście z transportu drogowego na wagon kolejowy bez konieczności wykorzystania skomplikowanego wyposażenia technicznego. Proponowane rozwiązanie bazuje na istniejącym patencie¹, a przedstawione w nim rozwiązanie konstrukcyjne wagonu jest innowacyjne w odniesieniu do rozwiązań konkurencyjnych na rynku europejskim. Wagon platforma posiadający nisko położoną, wysuwaną w poziomie platformę na rampę przytorową, umożliwia łatwe wykonanie czynności załadunkowych, a prognozowany czas tych czynności jest konkurencyjny [3]. Może być on wykorzystywany do przewozu pojazdów samochodowych – ciężarowych w transporcie krajowym i międzynarodowym, co przekłada się na bezpieczeństwo ruchu oraz ograniczenie emisji dźwięku i hałasu związanego z transportem [2, 7, 13].

2. WAGON – KLUCZOWY ELEMENT SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

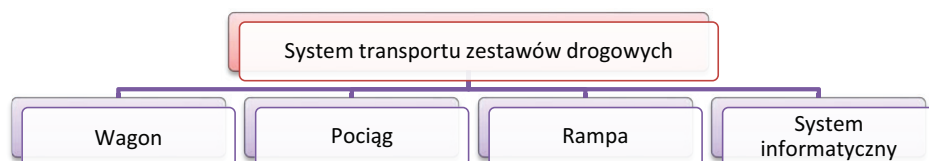
System transportowy, bazujący na wykorzystaniu istniejącej infrastruktury kolejowej, posłużyć może uczestnikom ogólnopolskiego systemu transportowego takim jak: koleje, przewoźnicy drogowi, przedsiębiorstwa żeglugowe i porty morskie, operatorzy transportu kombinowanego. Przewidywane korzyści z zastosowania takiego rozwiązania:

- wzrost udziału przewozów kolejowych na krajowym rynku transportowym,
- integracja łańcuchów transportowych drogowych, kolejowych i morskich,
- wzrost bezpieczeństwa przewozów tranzytowych,
- niższe koszty transportu towarów,
- lepsze wykorzystanie środków transportu;
- skrócenie czasu pracy kierowców,
- zwiększona konkurencyjność w segmencie przewozów,
- rozwój infrastruktury kolejowej,
- ochrona środowiska,
- mniejsze zużycie energii i paliw,
- zmniejszenie kosztów zewnętrznych transportu,
- wdrażanie idei zrównoważonego rozwoju transportu itp.,

Kluczowym elementem tego systemu jest wagon z ruchomą platformą, wysuwaną na rampę przytorową. Zastosowanie ruchomej platformy ładunkowej, nie wymaga przy czynnościach załadunku i rozładunku żadnych dodatkowych urządzeń ładunkowych.

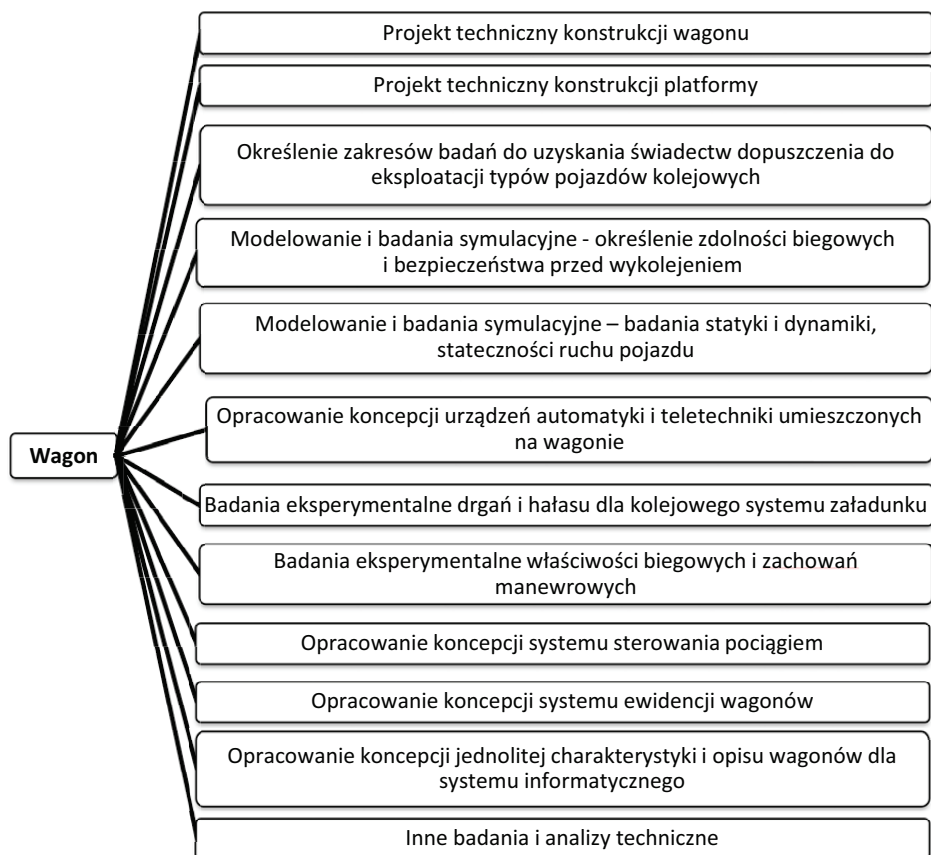
System kolejowy wykorzystujący istniejącą infrastrukturę kolejową obejmuje charakterystyczne elementy przedstawione na rysunku 1.

¹ Nader M., Sala M. - Patent nr 214797 na wynalazek pt: „Kolejowy wagon Transportowy i kolejowy system transportowy zawierający taki wagon”.



Rys. 1. Struktura omawianego systemu transportowego

Projektowanie techniczne Kolejowego Systemu Transportowego obejmuje żmudny proces tworzenia logicznych podstaw w celu doprowadzenia do powstania prototypu środka technicznego. W odniesieniu do wagonu proponowane jest przeprowadzenie zestawu badań wymienionych na rysunku 2.



Rys. 2. Proponowany zestaw badań w odniesieniu do wagonu-platformy

Źródło: opracowanie własne

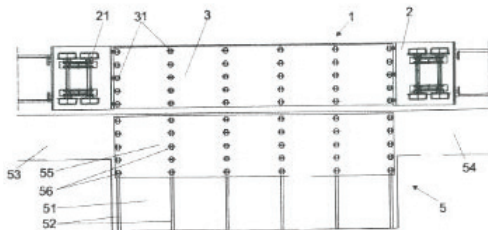
Niniejsza praca stanowi wstęp do rozpoczęcia modelowania oraz prowadzenia badań symulacyjnych modelu wagonu.

3. KONSTRUKCJA WAGONU

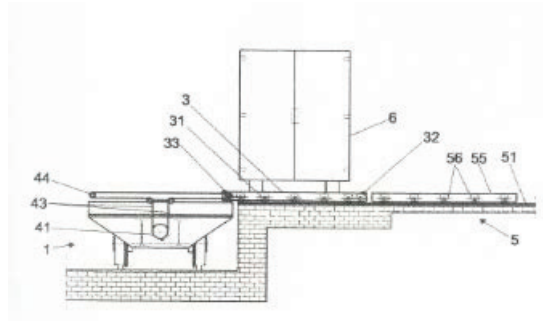
Przed przystąpieniem do prac projektowych przyjęto zestaw założeń wstępnych, które określają podstawowe wymagania dla budowy modelu [9, 10, 15]:

- nieskomplikowana budowa wagonu, oparta na dostępnych materiałach,
- zastosowanie nisko położonej ruchomej platformy ładunkowej, z uwzględnieniem skrajni dolnej,
- możliwość zastosowania standardowych wózków jezdnych (np. Y25), o średnicach kół tocznych 920 [mm],
- spełnienie wymogów skrajni,
- zastosowanie wydajnego układu napędowego oraz lekkiej platformy ładunkowej, stwarzającego możliwość dokonywania czynności ładunkowych w sposób efektywny,
- możliwość dokonywania czynności ładunkowych indywidualnie dla każdego z wagonów, dzięki zastosowaniu obustronnie wysuwanej platformy ładunkowej,
- możliwość zastosowania 4 osi jezdnych,
- dopuszczalny nacisk na oś do 22,1 [t],
- możliwość transportu jednostki ładunkowej o wadze brutto 40–44 [t],
- założenie prędkości maksymalnej z jaką może poruszać się wagon 100–120 [km/h].

Wymienione założenia konstruktorskie pozwoliły na wytypowanie bazowego wagonu platformy, posiadającego obniżoną część platformy do przewozu ładunków, których gabaryty przekroczyłyby skrajnię. Ze względu na fakt, iż standardowy wagon UAi 418ZA posiada obniżoną przestrzeń ładunkową na długości 17,4 m, a maksymalna długość zestawu drogowego określona przepisami dla zespołu pojazdów składającego się z pojazdu silnikowego oraz przyczepy nie może przekroczyć 18,75 m, należałoby rozważyć możliwość wydłużenia przestrzeni ładunkowej wagonu. Należy zauważyć, że nadrzędnym aspektem projektowanej technologii do przewozu pojazdów drogowych jest konieczność zachowania skrajni kolejowej, która narzuca maksymalne wymiary obrysu zewnętrznego wagonów kolejowych obciążonych ładunkiem, co powinno umożliwiać dokonywanie czynności ładunkowych bezpośrednio pod siecią trakcyjną. Schemat ideowy wagonu platformy przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Widok z góry na wagon z wysuniętą platformą [8, 9]



Rys. 4. Widok od czoła wagonu z wysuniętą platformą [8, 9]

Zakłada się zabudowę ruchomej platformy w centralnej części płyty wagonu (3), wyposażonej w grupę urządzeń wsporczych w postaci od dwóch do sześciu rzędów rolek (31), które będą pełniły rolę podparcia oraz umożliwią swobodny ruch obciążonej platformy w poziomie. Do przeprowadzenia załadunku i rozładunku wymagany jest utwardzony peron bez konieczności stosowania dodatkowej infrastruktury.

4. BADANIA MODELOWE

Badania wstępne obejmują sformułowanie modelu matematycznego wagonu platformy wraz ze znajdującym się na niej pojazdem drogowym, a następnie przeprowadzenie wybranych analiz jego dynamiki w dziedzinie niskich zakresów częstotliwości do ok. 20 Hz. Pierwszy etap polega na wyznaczeniu charakterystycznych częstotliwości drgań własnych oraz poziomów tłumienia w układzie w kontekście możliwości wystąpienia rezonansów i niestateczności. Poszczególne części pojazdów modelowane są za pomocą brył sztywnych połączonych bezmasowymi elementami sprężysto-tłumiącymi. Układ posiada w sumie 64 stopnie swobody, z czego 12 stopni swobody przypada na 4 zestawy kołowe wagonu, które w czasie analizy częstotliwościowej są zablokowane. Drgania tłumione układu liniowego o wielu stopniach swobody mogą być opisane ogólnym dynamicznym równaniem różniczkowym drugiego rzędu:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (1)$$

gdzie: $q(t)$ – wektor współrzędnych uogólnionych, M , C , K – globalne macierze bezwładności, tłumienia oraz sztywności układu, $f(t)$ – wektor uogólnionych wymuszeń.

Wyznaczenie elementów składowych macierzy M , C , K odbywa się na zasadzie wyznaczenia składowych sił reakcji więzów (zależnych od stałych sprężystości i tłumienia) przy jednostkowym przemieszczeniu, jednostkowej prędkości i jednostkowym przyspieszeniu kolejnych mas układu zgodnie z ich stopniami swobody. Siły oddziaływania pomiędzy masami w przyjętym modelu są proporcjonalne do przemieszczenia i prędkości (zależnie od

sztynności i tłumienia), natomiast nie zależą od przyspieszenia. Z tego wynika diagonalna postać macierzy bezwładności przy założeniu, że układy odniesienia związane z poszczególnymi ciałami pokrywają się z ich głównymi centralnymi osiami bezwładności. W ogólnym przypadku każde ciało może posiadać 6 stopni swobody a przemieszczenie i prędkość wybranego punktu ciała, do którego przymocowany jest koniec sprężyny lub tłumika, wynika z ruchu postępowego i obrotowego, przy założeniu niewielkich kątów obrotu. Wyznaczenie macierzy M , C , K odbywa się przy użyciu autorskiego programu komputerowego Simdel w sposób iteracyjny, przez analizę każdego połączenia między dwoma kolejnymi ciałami układu.

Zadanie wyznaczenia wartości własnych w odniesieniu do (1) może być rozwiązane przez przekształcenie (1) do układu opisanego równaniami pierwszego rzędu w formie równania stanu:

$$x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bf(t) \quad (3)$$

gdzie: macierz A jest rzeczywistą niesymetryczną macierzą stanu o wielkości $2n \times 2n$ (n – liczba stopni swobody), x – wektor zmiennych stanu, B – macierz wejścia.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie: I – macierz jednostkowa, 0 – macierz zerowa.

W analizowanym przypadku drgań swobodnych przyjęto $f(t)=0$, natomiast rozwiązanie równania (3) posiada następującą formę

$$x(t) = ze^{-\lambda t} \quad (5)$$

$$\lambda = \sigma \pm i\omega, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \sigma^2}$$

gdzie: z – wektor własny zespolony sprzężony, λ – liczba zespolona sprzężona, σ – poziom tłumienia, ω – częstość drgań tłumionych, ω_0 – częstość drgań nietłumionych.

Współczynnik tłumienia podaje się również w formie bezwymiarowej jako

$$\zeta = \frac{-\operatorname{Re} \lambda}{\sqrt{(\operatorname{Re} \lambda)^2 + (\operatorname{Im} \lambda)^2}} \quad (6)$$

gdzie $\zeta = 1$ oznacza tłumienie krytyczne.

Podstawiając (5) do (3) otrzymujemy standardowe równanie zagadnienia własnego dla każdego λ

$$(A - I\lambda_j)z_j = 0 \quad (7)$$

Równanie (7) posiada $2n$ rozwiązań w postaci wartości własnych λ_j oraz odpowiadających im wektorów własnych z_j ($j = 1, \dots, 2n$) o wartościach zespolonych reprezentujących stosunki amplitud oraz kąty fazowe [1, 16]. Wartości te zostały wyznaczone numerycznie przy użyciu

programu komputerowego i przedstawione są w tablicy 2. Natomiast w tablicy 1 przedstawione są wybrane parametry modelu, który wykorzystano do obliczeń.

Tablica 1

Wybrane parametry modelu

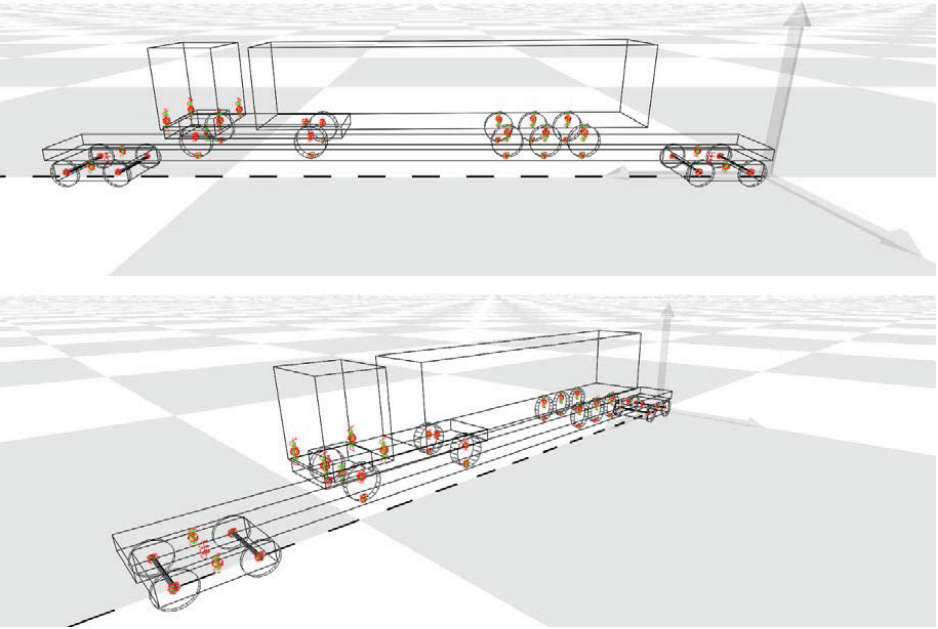
Lp.	Element pojazdu	Wartość
1	Ładowność (masa w pełni załadowanej naczepy)	24000 kg
2	Masa ramy samochodu	5000 kg
3	Masa kabiny	700 kg
4	Masa silnika i przekładni	1200 kg
5	Masa koła	100 kg
6	Sztywność pionowa opony (zależnie od odkształcenia) przy dużym obciążeniu	1,5 MN/m
7	Tłumienie pionowe opony	1,5 kNs/m
8	Sztywność pionowa sprężyny zawieszenia tylnej osi samochodu	1 MN/m
9	Tłumienie pionowe tłumika zawieszenia tylnej osi samochodu	10 kNs/m
10	Sztywność pionowa sprężyny zawieszenia przedniej osi samochodu	500 kN/m
11	Tłumienie pionowe tłumika zawieszenia przedniej osi samochodu	10 kNs/m
12	Sztywność pionowa sprężyny zawieszenia ramy naczepy	400 kN/m
13	Tłumienie pionowe tłumika zawieszenia ramy naczepy	10 kNs/m
14	Sztywność pionowa sprężyny zawieszenia kabiny samochodu	23,5 kN/m
15	Tłumienie pionowe tłumika zawieszenia kabiny samochodu	1,5 kNs/m
16	Sztywność pionowa pojedynczego elementu mocowania silnika	1 MN/m
17	Sztywność pionowa zawieszenia I stopnia wózka Y25 (sprężyna zewnętrzna)	6476 kN/m
18	Sztywność pionowa zawieszenia I stopnia wózka Y25 (sprężyna wewnętrzna)	3984 kN/m
19	Sztywność pionowa i poprzeczna zawieszenia platformy w gnieździe skrętu wózka	10 MN/m
20	Sztywność pionowa ślizgów bocznych wagonu	500 kN/m

Model wagonu towarowego w postaci układu wieloczołowego [11, 14] zbudowano na podstawie danych technicznych wagonu platformy, wyposażonego w wózki typu Y25 (25TN). Zgodnie z przeznaczeniem konstrukcyjnym pojazd wyposażony w wózki Y25Lsd lub Y25Lsd1 może poruszać się w reżimie ruchu S i SS z obciążeniami do 20 ton na oś i 22,5 ton na oś z maksymalnymi prędkościami eksploatacyjnymi odpowiednio 120 km/h i 100 km/h. Nadwozie wagonu posadowione jest na wózkach za pośrednictwem centralnych gniazd skrętu z wykładziną cierną, które przenoszą 70% ciężaru wagonu [12, 14]. Pozostałe 30% ciężaru wagonu przenoszone jest przez sprężyste ślizgi boczne, które również posiadają elementy cierne. Ślizgi te są w stałym kontakcie z nadwoziem pojazdu a element sprężysty ślizgu posiada napięcie wstępne. Na rysunku 5 przedstawiono wizualizację struktury modelu z zaznaczonymi miejscami połączeń sprężystych i tłumiących.

Model przedstawiony na rysunku 5 przygotowany jest z myślą o analizie w zakresie niskich częstotliwości do ok. 20 Hz. Drgania w takim modelu są w dużym stopniu wynikiem nierówności geometrycznych toru, które można zdefiniować jako odchylenia od jego wymiarów nominalnych. Innymi źródłami wymuszeń w układzie mogą być odcinki w torze nominalnym, które charakteryzują się zaprojektowanymi zmiennymi parametrami geometrycznymi (np. krzywe przejściowe, rozjazdy, rampy).

Parametry zawieszenia pojazdów z reguły dobiera się tak aby masa nieresorowana poddana wymuszeniu od toru lub drogi nie powodowała rezonansów przy oddziaływaniu na masy resorowane, co mogłoby doprowadzić do pogorszenia stabilności ruchu pojazdu i obniżenia poziomu bezpieczeństwa. Brany jest także pod uwagę odpowiedni poziom komfortu

pasażerów, ograniczenie przechyłów wzdłużnych i bocznych oraz uzyskanie korzystnego rozkładu nacisków.



Rys. 5. Wizualizacja struktury modelu
Źródło: opracowanie własne.

Wagon platforma wraz z przewożonym zestawem drogowym stanowi układ dwóch połączonych ze sobą pojazdów, w którym drgania jednego pojazdu stanowią źródło wymuszenia drgań drugiego pojazdu. Wzajemne oddziaływanie mas pojazdów poprzez elementy sprężyste może powodować podwyższony poziom drgań, szczególnie w zakresie tych samych częstotliwości własnych (zakres ok. 0,9 – 5 Hz wg tablicy 2).

Tablica 2

Wartości własne oraz wybrane postacie drgań

Lp.	Części urojone [Hz]	Części Rzeczywiste	Wybrane dominujące postacie drgań; oznaczenie: człon_współrzędna (stosunki amplitud)
1	9,194e-01	-3,291e-02	platf_wag_y(-0,19), naczepa_y(0,12), kabina_χ(0,21), rama_y(-0,21)
2	1,257e+00	-5,739e-02	platf_wag_ψ(-0,01), kabina_χ(0,40), silnik_y(-0,39), rama_y(-0,36)
3	1,448e+00	-5,806e-02	platf_wag_ψ(0,02), kabina_χ(0,38), rama_y(-0,24)
4	1,566e+00	-8,971e-02	platf_wag_y(-0,11), kabina_χ(-0,30)
5	1,611e+00	-3,480e-01	kabina_y(0,30), kabina_χ(0,37), rama_ψ(0,07)
6	1,725e+00	-6,690e-01	kabina_z(0,90)

Lp.	Części urojone [Hz]	Części Rzeczywiste	Wybrane dominujące postacie drgań; oznaczenie: człon współrzędna (stosunki amplitud)
7	1,824e+00	-5,099e-01	platf_wag_χ(0,19), kabina_y(-0,31), rama_χ(0,20), rama_ψ(-0,12), podw_koło_3_y(0,38), podw_koło_4_y(0,38)
8	1,944e+00	-1,971e-01	platf_wag_y(0,23), naczepa_z(0,27), naczepa_φ(-0,19), kabina_φ(- 0,37), koło_9_z(0,24)
9	2,260e+00	-7,353e-01	kabina_y(-0,43)
10	2,371e+00	-9,285e-01	kabina_φ(0,36)
11	2,896e+00	-8,632e-01	kabina_y(0,44)
12	3,357e+00	-2,125e-01	platf_wag_z(-0,34), naczepa_z(0,17), koło_8_z(-0,24), koło_9_z(- 0,24)
13	3,596e+00	-1,396e+00	kabina_ψ(0,85)
14	3,653e+00	-7,287e-01	naczepa_χ(0,53), naczepa_ψ(-0,13), rama_χ(-0,16), koło_5_y(-0,38), koło_6_y(-0,38)
15	4,846e+00	-6,454e-01	kabina_φ(0,40)
16	5,096e+00	-2,876e-01	platf_wag_φ(-0,03), rama_z(0,46)
17	5,729e+00	-1,326e+00	rama_χ(0,30)
18	6,117e+00	-7,711e-01	rama_z(0,63), rama_φ(-0,37)
19	7,636e+00	-2,064e+00	silnik_y(0,70), rama_ψ(-0,09), koło_1_y(-0,35), koło_2_y(-0,35)
20	1,036e+01	-1,850e+00	silnik_z(0,94)
21	1,395e+01	-6,266e+00	wózek_1_y(0,70), wózek_2_y(0,70)
22	1,395e+01	-6,265e+00	wózek_1_y(0,68), wózek_2_y(-0,68)
23	1,480e+01	-8,821e+00	wózek_1_ψ(-0,69), wózek_2_ψ(-0,69)
24	1,480e+01	-8,821e+00	wózek_1_ψ(0,71), wózek_2_ψ(-0,71)
25	1,961e+01	-4,911e+00	wózek_1_φ(-0,96)
26	1,961e+01	-4,911e+00	wózek_2_φ(0,72)
27	1,979e+01	-9,246e+00	koło_7_z(0,33), koło_8_z(0,33), koło_9_z(0,41), koło_10_z(0,41)
28	1,993e+01	-9,154e+00	koło_5_z(0,57), koło_6_z(0,57), koło_9_z(-0,42), koło_10_z(-0,42)
29	1,994e+01	-9,151e+00	koło_5_z(0,39), koło_7_z(-0,62), koło_8_z(-0,47), koło_9_z(0,23), koło_10_z(0,32)
30	1,994e+01	-9,151e+00	koło_5_z(-0,54), koło_6_z(0,33), koło_9_z(0,27), koło_10_z(-0,48)
31	1,994e+01	-9,151e+00	koło_5_z(-0,50), koło_6_z(0,34), koło_7_z(0,38), koło_10_z(-0,28)
32	2,000e+01	-9,132e+00	koło_5_z(-0,38), koło_6_z(0,38), koło_7_z(-0,38), koło_8_z(0,38), koło_9_z(-0,38), koło_10_z(0,38)
33	2,008e+01	-9,486e+00	koło_1_z(-0,43), koło_2_z(0,43)
34	2,020e+01	-9,448e+00	koło_1_z(0,58), koło_2_z(0,58)
35	2,200e+01	-4,864e+00	podw_koło_3_z(-0,70), podw_koło_4_z(-0,70)
36	2,204e+01	-4,892e+00	podw_koło_3_z(-0,70), podw_koło_4_z(0,70)
37	2,272e+01	-1,157e+01	wózek_1_χ(-0,70), wózek_2_χ(-0,70)
38	2,286e+01	-1,155e+01	wózek_1_χ(-0,67), wózek_2_χ(0,67)
39	2,621e+01	-9,328e+00	wózek_1_z(0,69), wózek_2_z(0,69)
40	2,632e+01	-9,413e+00	wózek_1_z(0,62), wózek_2_z(-0,63)

Wartości własne przedstawione w tablicy 2 posiadają niezerowe części urojone oraz ujemne części rzeczywiste co oznacza ruch oscylacyjny z tłumieniem podkrytycznym, natomiast pominięto te wartości własne, które zawierają zerowe części urojone i niezerowe ujemne części rzeczywiste, wynikające z tłumienia nadkrytycznego. Pozycje te dotyczą przemieszczeń kół samochodu w kierunku poprzecznym (założono duże wartości tłumienia przy połączeniu koło-samochód oraz znacznie mniejsze przy połączeniu koło samochodu-platforma wagonu w kierunku poprzecznym). Części rzeczywiste (poziom tłumienia) wszystkich wyznaczonych wartości własnych przyjmują wartości mniejsze od zera co świadczy o stabilności układu.

Opisy postaci drgań przedstawione w tablicy 2 zawierają następujące oznaczenia:

- χ – obrót wokół wzdłużnej osi x ,
- ϕ – obrót wokół poprzecznej osi y ,
- Ψ – obrót wokół pionowej osi z ,
- y, z – przemieszczenie w kierunku poprzecznym i pionowym,
- platf_wag – platforma wagonu, na której postawiony jest samochód,
- wózek_1 , wózek_2 – rama przedniego i tylnego wózka wagonu,
- rama – rama ciągnika siodłowego,
- koło_1 , koło_2 – przednie lewe i prawe koło samochodu,
- podw_koło_3 , podw_koło_4 – tylne lewe i prawe koło samochodu,
- koło_5-10 – sześć kół naczepy samochodu,
- kabina – kabina kierowcy samochodu,
- silnik – silnik samochodu wraz z osprzętem.

5. PODSUMOWANIE

Budowa modelu w autorskim środowisku obliczeniowym pozwoliła na przeprowadzenie pilotażowych badań symulacyjnych. Przedstawiono charakterystyczne wartości własne oraz wybrane dominujące postacie drgań tłumionych. Wartości własne, które zawierały zerowe części urojone i niezerowe ujemne części rzeczywiste, wynikające z tłumienia nadkrytycznego, zostały pominięte. Części rzeczywiste wszystkich wyznaczonych wartości własnych (odpowiadające za poziom tłumienia) przyjmują wartości mniejsze od zera co świadczy o stabilności układu. Model będzie rozbudowywany i wykorzystywany w dalszej części prowadzenia prac o charakterze symulacyjnym.

Bibliografia

1. Hatch M.: Vibration Simulation Using Matlab and Ansys. Chapman and Hall/CRC. 2000.
2. Korzeb J.: Predykcja wybranych oddziaływań dynamicznych w strefie wpływu infrastruktury transportowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, nr 90. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN 978-83-7814-111-2. 1-202 s. 2013.
3. Kostrzewski A., Korzeb J.: Ocena i rola technologicznych aspektów przeładunku samobieżnych zestawów drogowych w transporcie intermodalny. Instytut Logistyki i Magazynowania. ISSN 1231 – 5478. Poznań. Logistyka 4/2012. str. 399 – 406. 2012.

4. Krasoń W., Niezgoda T.: FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. Vol. 62, No. 4, doi: 10.2478/bpasts-2014-009. 2014.
5. Kwaśniewski S., Nowakowski T., Zając M.: Transport intermodalny w sieciach logistycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. ISSN 1425 – 0993. Wrocław 2008.
6. Medwid M.: Studium tworzenia intermodalnych środków technicznych transportu lądowego w szczególności taboru bimodalnego. Monografia nr 422. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań, 2008.
7. Nader M.: Drgania i hałas w transporcie. Wybrane zagadnienia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN 978-83-7814-543-1, 133 s., 2016.
8. Nader M., Sala M.: Kolejowy Wagon Transportowy. Patent nr 214797. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Wiadomości Urzędu Patentowego RP Nr 9/2013. ISSN-1689-0132. Warszawa, 2013.
9. Nader M., Sala M., Korzeb J., Kostrzewski A.: Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne do przewozu naczeł siodłowych i zestawów drogowych dla transportu intermodalnego. w: Logistyka, nr 4, ss. 2272-2279. 2014.
10. Nader M., Kostrzewski A.: Technologiczne uwarunkowania krajowych lądowych baz przeładunkowych pośredniczących w transporcie intermodalnym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport z. 97. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISSN 1230 - 9265. Warszawa. str. 389 – 398. 2013.
11. Opala M., Melnik R.: Ocena zgodności modeli symulacyjnych dynamiki pojazdów szynowych na podstawie testów referencyjnych (Concordance assessment of the rail vehicles' dynamic models based on the benchmark tests). Czasopismo Logistyka, vol. 4/2015. ISSN 1231-5478. 2015.
12. Opala M., Koziać S.: Wykorzystanie narzędzia MES do modelowania elementów zawieszenia wagonu towarowego w postaci gniazda czopa skrzętu z wykładziną cierną. Problemy Kolejnictwa. vol. 62. nr 178. 2018.
13. Opala M.: Metoda analizy bezpieczeństwa czynnego pojazdów kolejowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN 978-83-7814-358-1. 134 s., 2015.
14. Opala M.: Evaluation of bogie centre bowl friction models in the context of safety against derailment simulation predictions. Archive of Applied Mechanics. DOI:10.1007/s00419-018-1351-4, Volume 88, Issue 6, p. 943–953. 2018.
15. Polska Norma PN-EN 12663-2:2010E: Kolejnictwo – Wymagania konstrukcyjno – wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych – Część 2: Wagony Towarowe.
16. Rao S.S.: Mechanical Vibrations 5th Edition. Pearson Education. 2011.
17. Wójcik K., Małachowski J., Baranowski P., Mazurkiewicz Ł., Damaziak K., Krasoń W.: Multi-body simulations of railway wagon dynamics. Journal of Kones Powertrain and Transport. Vol. 19. No. 3. 2012.
18. Zielaskiewicz H.: „Transport intermodalny na rynku usług przewozowych”. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB. ISBN 978-83-7204-961-2. Radom 2010.

SELECTED STUDIES OF DYNAMICS OF RAILWAY FLAT-CAR USED FOR TRANSPORT OF SEMI-TRILER TRUCK (TIR)

Summary: The paper presents a pilot analysis of the dynamics of a railway wagon designed for transporting road semi-trailer trucks. Attention was given to the innovative solution of the wagon construction, having a movable platform enabling transportation of road vehicles as a part of intermodal transport. The technical description presented in the article takes into account the provisions of Patent No. 214797, for the invention under the name "Railway transport wagon, railway transport unit and railway transport system containing such wagon". The work presents the concept of technical characteristics of the wagon construction solution and a simulation model was built using in-house software. The technical parameters were analyzed, followed by pilot simulation tests. This paper presents the results of research on the dynamics of the platform wagon, loaded with a typical road semi-trailer truck. The system's eigenvalues were analyzed, allowing for the initial assessment of dynamic phenomena occurring in the conditions of exploitation of the loaded wagon. The tests are of pilot nature and constitute a prelude to carry out complex simulation analyzes including tests of dynamics while running on transition curves, arcs, and wear of the rolling surfaces of wheels and rails at different traffic speeds.

Keywords: railway transport wagon, intermodal transport, rail vehicle dynamics