

OCENA DYNAMIKI LEKKIEGO POJAZDU SZYNOWEGO Z WYKORZYSTANIEM OPRACOWANEGO PAKIETU KOMPUTEROWEGO

Streszczenie

Jednym z kluczowych zagadnień badań nad niezawodnością urządzeń jest ich dynamiczne zachowanie w trakcie eksploatacji. Ważnym czynnikiem wpływającym na niezawodność systemów transportowych eksploatujących pojazdy szynowe jest odpowiedni stan utrzymania infrastruktury torowej. Jej niewłaściwy stan techniczny może spowodować przerwy w ruchu, które w przypadku takiego pojazdu jak tramwaj mogą zakłócić system transportowy całej aglomeracji miejskiej. Jednym z elementów stanu torowiska są geometryczne nierówności toru zmieniające się w trakcie jego eksploatacji. Ich wpływ na dynamikę pojazdu jest bezdyskusyjny. Duże nierówności i niedostosowanie do nich prędkości jazdy mogą spowodować wykolejenie pojazdu. Badania symulacyjne dynamiki pojazdu pozwalają na oszacowanie ryzyka wykolejenia i mogą stanowić istotny element procesu homologacji. W artykule przedstawiono wyniki badań ruchu pojazdu na torach, których geometrię zdefiniowano poprzez wskaźnik jakości toru jako tory o bardzo dobrym, dobrym i dostatecznym stanie utrzymania. W badaniach wykorzystano dane pomiarowe charakteryzujące nierówności pionowe, poprzeczne oraz lokalną przechyłkę toru. W artykule skupiono się nad badaniami lekkiego pojazdu szynowego (tramwaju) z konwencjonalnymi zastawami kołowymi. Szczególną uwagę poświęcono warunkom eksploatacyjnym, w których może dojść do sytuacji niebezpiecznych zakłócających niezawodność działania miejskiego systemu transportowego.

WSTĘP

Lekkie pojazdy szynowe typu tramwaj są elementem infrastruktury dużych aglomeracji miejskich. Łatwość, szybkość przemieszczania się czyni z tego środka transportu komunikacji miejskiej ważny element zbiorowego transportu publicznego.

Nowoczesne konstrukcje lekkich pojazdów szynowych odznaczają się niskim zużyciem energii, niskim poziomem hałasu, a także względnie małymi kosztami eksploatacji.

Lekkie pojazdy szynowe w dużych aglomeracjach miejskich wykorzystywane są do przewozu pasażerów i towarów [1]. Na Rys 1 przedstawiono lekki pojazd szynowy jako tzw. pociąg tramwajowy.

Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest tramwaj wielosystemowy. Pojazdy tramwajowe wielosystemowe są konstrukcjami przystosowanymi do poruszania się po infrastrukturze tramwajowej i infrastrukturze kolejowej, dostosowane są do różnych systemów zasilania np. 600 V DC i 15 kV 16 2/3 Hz.



Rys. 1. Tramwaj towarowy CarGoTram w Dreźnie i tramwaj dwusystemowy w l'Arbresle pod Lyonem 19.

W Polsce istnieje 14 systemów tramwajowych, w tym jedna linia budowana jest w Olsztynie. Torowa infrastruktura tramwajowa charakteryzuje się szerokością torów od 750 mm do 1435 mm. Najczęściej jednak stosowana jest szerokość toru 1000 mm i 1435 mm. W przypadku pudła tramwaju jego szerokość może przybierać wartości

między 2100 mm do 2650 mm, natomiast długość od 8000 mm do 45000 mm. Najdłuższe, wielozłonowe pojazdy tramwajowe (pociągi tramwajowe) mogą osiągać długość 80000 mm i więcej. Współczesne tramwaje są w stanie rozwijać prędkości do 80 km/h.

Przed wprowadzeniem każdego lekkiego pojazdu szynowego do eksploatacji niezbędne jest wykonanie odpowiednich testów, badań związanych z dopuszczeniem do eksploatacji.

Dokumentem, w którym zawarto wytyczne określające sposób badania, na etapie homologacji/dopuszczania do eksploatacji, lekkich pojazdów szynowych jest Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 28 maja 2013 r. w sprawie homologacji typu tramwajów i trolejbusów (Dz. U. 2013 poz. 688). W dokumencie tym określone są również podstawowe dane eksploatacyjne pojazdu takie jak 13:

- najmniejszy dopuszczalny poziomy łuk toru jazdy [mm],
- najmniejszy dopuszczalny pionowy łuk toru jazdy [mm],
- prędkość maksymalna [km/h].

W przypadku pojazdów kolejowych wymagania zostały określone w rozporządzeniach regulujących sposób dopuszczania pojazdu kolejowego do eksploatacji. Dla taboru kolejowego rozdzielono kwestie związane z eksploatacją oraz z badaniami. Zasady eksploatacji pojazdów kolejowych określone zostały w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (Dz. U. 2016 poz. 226). Wymagania dopuszczenia pojazdu kolejowego do eksploatacji zostały określone w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych (Dz. U. 2014 poz. 720).

Rozporządzenie, oprócz podziału pojazdów kolejowych na pasażerskie, towarowe czy specjalne, określa zakres badań technicznych koniecznych do uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu oraz stwierdzenia zgodności z typem. Do typowych badań na etapie dopuszczenia do eksploatacji wykonuje się między innymi następujące badania 12:

- a) przejazdu przez łuk o minimalnym promieniu, a w uzasadnionych przypadkach także rampę promową i przesuwnicę wagonową,
- b) ocenę własności dynamicznych pojazdu kolejowego, w szczególności w zakresie:
- określenia współczynnika bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu Y/Q w warunkach quasi-statycznych i dynamicznych,
 - określenia sił działających między kołem a szyną,
 - spokojności biegu.

Przytoczone wymogi są wybranymi, które zamieszczone są w rozporządzeniu 12. Odnosząc się do przytoczonych wymagań można stwierdzić, iż w obu przypadkach mówimy o transporcie szynowym tak, więc wymagania w stosunku do lekkich pojazdów szynowych zdają się być mniej restrykcyjne niż w stosunku do pojazdów kolejowych.

Badania zachowania się pojazdu szynowego pod wpływem różnego rodzaju wymuszeń prowadzone są od lat. Wśród prac dotyczących dynamiki pojazdów szynowych można wymienić publikacje autorów niniejszego artykułu 2, 4, 5, 6, 8, 9, 15, jak również prace innych Autorów 16, 17, 17.

Przeprowadzając eksperymenty symulacyjne dynamicznego zachowania się pojazdu szynowego badamy jego odpowiedzi w określonych warunkach. Analiza otrzymanych wartości stanowi podstawę do określenia czy badany pojazd spełnia wymagania dotyczące bezpieczeństwa ruchu. Model fizyczny jest podstawą sformowania modelu matematycznego. Dla układu mechanicznego, jakim jest pojazd szynowy, poruszający się po torze, modelem matematycznym będą dynamiczne równania ruchu 6. Układ mechaniczny w takim podejściu jest traktowany jako układ wielocłonowy, w literaturze anglojęzycznej określanymi jako Multi Body System (MBS) 18.

Niniejszy artykuł jest próbą oceny własności dynamicznych lekkiego pojazdu szynowego typu tramwaj. W artykule wykorzystano rzeczywiste geometryczne nierówności toru zmierzone na torze tramwajowym. Eksperymenty symulacyjne przeprowadzono na odcinkach toru prostego i łukach o małym promieniu. Badania symulacyjne wykonano dla różnych prędkości dla toru o różnym stanie utrzymania, sklasyfikowanym jako dostateczny, dobry i bardzo dobry. Szerokość torów na warszawskiej infrastrukturze tramwajowej wynosi 1435 mm. W eksperymentach symulacyjnych założono również minimalny promień łuku równy $R=18$ m.

1. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU WIELOCZŁONOWEGO

Model fizyczny pojazdu szynowego należy traktować jak układ wielocłonowy (ang. MBS). Oznacza to, że poszczególne składowe pojazdu traktowane są jak bryły sztywne. Te połączone ze sobą za pomocą elementów sprężysto-tłumiących. Ograniczenia w ruchu poszczególnych brył pojazdu wynikają z narzuconych więzów. W opisie ruchu pojazdów szynowych ograniczmy się na ogół do więzów holonomicznych całkowalnych 7.

W naszym przypadku model pojazdu szynowego podzieliliśmy na 3 podstawowe elementy, tj. zestaw kołowy, rama wózka, nadwozie (pudło) pojazdu. Zestaw kołowy posiada 3 stopnie swobody: są to: y_i – przemieszczenie poprzeczne, ψ_i – kąt odchylenia (yaw), ϕ_i – kąt pochylania (pitch). ($i=1, 2, 3, 4$ – łącznie 4 zestawy kołowe).

Rama wózka posiada 5 stopni swobody są to: y_{bj} – przemieszczenie poprzeczne, z_{bj} – przemieszczenie pionowe, ψ_{bj} – kąt odchylenia (yaw), θ_{bj} – kąt przechylenia (roll), ϕ_{bj} – kąt pochylania (pitch) ($j=1, 2$ – mamy 2 ramy wózków).

Nadwozie posiada 5 stopni swobody i są to: y_c – przemieszczenie poprzeczne, z_c – przemieszczenie pionowe, ψ_c – kąt odchylenia (yaw),

θ_c – kąt przechylenia (roll), ϕ_c – kąt pochylania (pitch). Analizowany układ jest to układ o 27 stopniach swobody.

W przypadku modelowania wielocłonowych układów mechanicznych, modelem matematycznym jest najczęściej układ równań różniczkowych które można wyprowadzić korzystając z równań Lagrange'a II rodzaju.

Współrzędne uogólnione przyjmują postać przemieszczeń (linowych lub kątowych). Ruch takiego pojazdu opisany jest równaniami różniczkowymi zwyczajnymi drugiego rzędu. Przyjmując, że drgania poszczególnych członów modelu względem układu odniesienia są małe, układ taki można przedstawić w postaci zlinearyzowanej w postaci:

$$M\ddot{q}(t) + D\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t)$$

M - symetryczna macierz bezwładności dodatnio określona,

$D\dot{q}(t)$ - wektor reprezentujący siły zależne od prędkości,

$Kq(t)$ - wektor reprezentujący siły zależne od przemieszczeń,

$F(t)$ - wektor sił (momentów) wymuszeń zewnętrznych

Jest to typowa forma zlinearyzowanych dynamicznych równań ruchu układu mechanicznego pojazd szynowy - tor 6.

2. ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania uzyskania dopuszczenia z uwagi na własności biegowe pojazdów kolejowych reguluje norma EN14363. Badanie własności biegowych ma zastosowanie głównie dla pojazdów, które są eksploatowane bez żadnych ograniczeń na torach o standardowej szerokości (1435 mm). Ze względu na specyfikę infrastruktury po której poruszają się lekkie pojazdy szynowe zdecydowano się na scenariusze badawcze wykraczające poza regulacje wynikające z normy EN14363. Należy zauważyć, iż brak jest uregulowań, z których jasno by wynikało, w jaki sposób należy badać lekkie pojazdy szynowe typu tramwaj. W przypadku dopuszczania do eksploatacji pojazdów kolejowych oprócz norm mamy również przepisy w postaci aktów prawnych. W dokumentach zostało określone, jakie badania należy przeprowadzić w celu dopuszczenia pojazdu szynowego do eksploatacji. Na potrzeby eksperymentów symulacyjnych zdecydowano się na zaproponowanie scenariuszy badawczych, które odzwierciedlają specyfikę infrastruktury torowej miasta Warszawy.

Założenia dotyczące przeprowadzanych eksperymentów symulacyjnych przedstawiono w tabeli nr 1, 2, 3.

Tab. 1. Przyjęte prędkości dla toru prostego

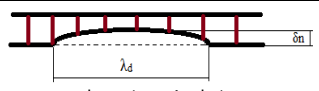
Przejazd po torze prostym o długości 500 m						
Stan toru	dostateczny		dobry		bardzo dobry	
Prędkość [km/h]	20	40	40	60	60	80

Tab. 2 Przyjęte prędkości dla przejazdu przez łuk

Przejazd po łuku							
Stan toru	dostateczny, dobry, bardzo dobry						
Promień łuku R[m]	18	50		100		150	
Prędkość [km/h]	20	20	40	20	50	20	50

W dokumentach regulujących proces dopuszczenia pojazdów szynowych do eksploatacji jest spis wymagań oraz badań, jakie należy przeprowadzić. Wymogi zostały określone w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych (Dz. U. 2014 poz. 720 z późn. zm.).

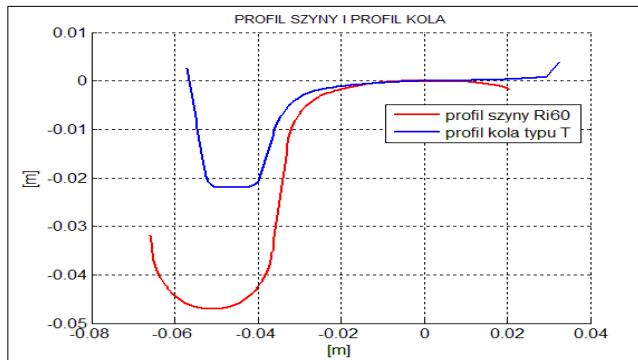
Tab. 3 Przyjęty scenariusz badawczy

Przejazd po łuku	
stan toru	brak nierówności, dostateczny, dobry, bardzo dobry
zwężenie jednostronne, $\delta n = 0.02$ m, $\lambda_d = 5$ m, $v = 20$ km/h, $v = 70$ km/h	 <p>schemat zwężenia toru</p>

W przypadku lekkich pojazdów szynowych brak jest dokumentu, który odnosiłby się do badań, jakie należy przeprowadzić, aby uzyskać stosowne dopuszczenie do ruchu. W niniejszym artykule skupiono się na wybranych rodzajach badań i są to:

- przejazd przez łuk o promieniu $R=18$ m,
- wyznaczenie sił między kołem a szyną,
- wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa Y/Q przeciw wykolejeniu.

W eksperymentach symulacyjnych przyjęto profil szyny UIC60 i profil toczny koła tramwajowego typu T. Założono, że tory są sztywne w kierunku pionowym i poprzecznym. Opis nierówności geometrycznych toru sprowadza się do nierówności poprzecznych, lewej i prawej szyny, nierówności pionowych linii środkowej toru oraz lokalnej przechyłki. Profil szyny i koła przedstawiono na rys. 2.

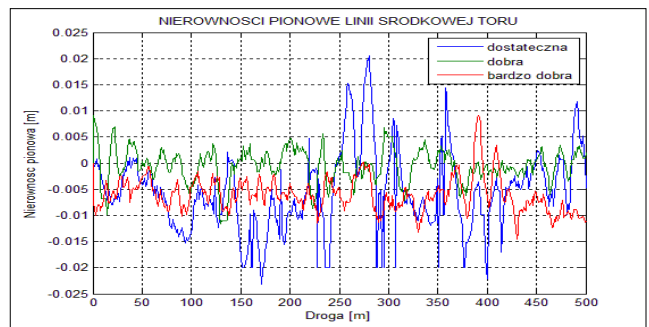


Rys. 2. Profil szyny (linia czerwona) i profil koła (linia niebieska) przyjęty w badaniach symulacyjnych.

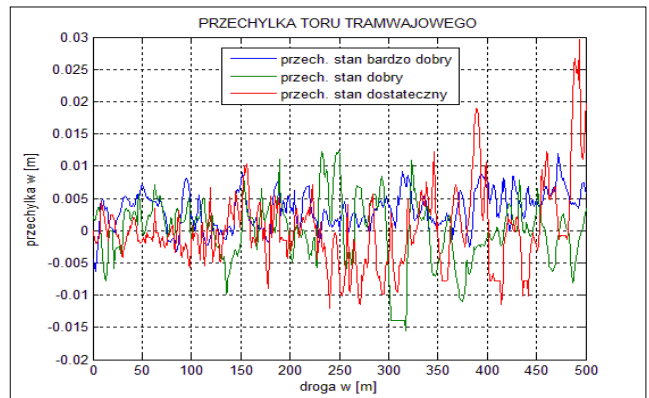
Istotną cechą charakterystyczną profili szyn jest wartość pochodnej promienia krzywizny (ewentualny tangens konta kontaktu) oraz promień krzywizny, które potraktujemy, jako egzemplifikację parametrów geometrycznych mających wpływ na dynamikę pojazdu szynowego. W miejscu styku koła i szyny, na skutek sił ciężkości, oraz oddziaływań dynamicznych w strefie kontaktu podczas ruchu pojazdu pojawią się siły kontaktowe. Takie wielkości geometryczne jak chwilowy promień toczny koła, promienie krzywizny koła i szyny w punkcie styku czy kąt między płaszczyzną poziomą a płaszczyzną styczną do szyny w punkcie styku mają wpływ na wartości sił kontaktowych 15.

Eksperymenty przeprowadzono dla trzech stanów utrzymania toru. Tory zgodnie z przepisami zostały sklasyfikowane, jako tor o stanie utrzymania dostatecznym, dobrym i bardzo dobrym. Na rysunku nr 3, 4, 5 przedstawione są wielkości opisujące nierówności geometryczne odcinków wykorzystywanych do badań eksperymentalnych. Przedstawiono przebiegi nierówności pionowej linii środkowej toru, lokalnej przechyłki i nierówności poprzeczne lewej i prawej szyny.

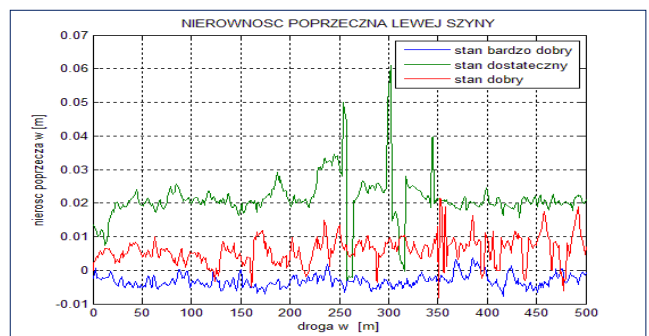
Wykorzystywane w przedstawianym artykule nierówności toru tramwajowego są rzeczywistymi nierównościami otrzymanymi w wyniku przeprowadzonych badań pomiarowych odcinków toru. W przypadku toru o dobrym i bardzo dobrym stanie utrzymania nie ma tak znaczących rozbieżności w zakresie przemieszczeń linii środkowej toru jak dla toru o dostatecznym stanie utrzymania.



Rys. 3. Nierówności pionowe linii środkowej toru na odcinku 500 m.

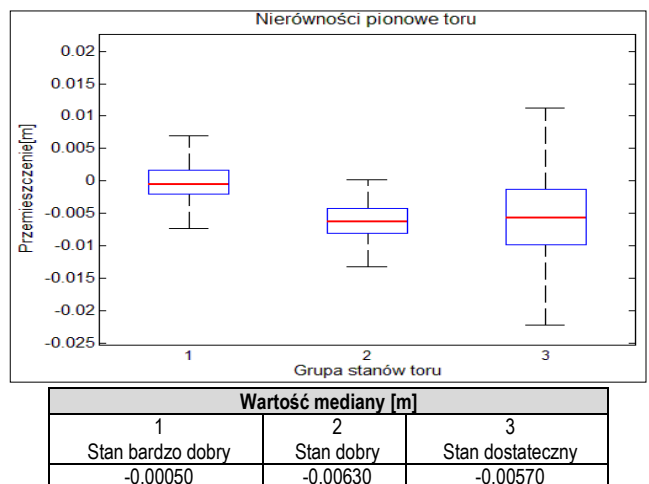


Rys. 4. Przebieg lokalnej przechyłki na odcinku 500 m.



Rys. 5. Przebieg nierówności lewej szyny toru na odcinku 500 m.

Na rysunku nr 6 przedstawiono wykres skrzynkowy dla nierówności pionowych i poprzecznych linii środkowej toru, na odcinku 500 m.



Rys. 6. Wykres skrzynkowy nierówności pionowych linii środkowej toru na odcinku 500 m.

Wykres skrzynkowy przedstawia przebieg nierówności pionowych linii środkowej toru. Otrzymany w ten sposób wykres przedstawia położenie, rozproszenie i kształt rozkładu empirycznego badanych nierówności. Czerwona kreska w oznaczanie medianę nierówności. Górna i dolna krawędź wskazują wartości odpowiednio górnego i dolnego kwartyla. Górna krawędź prostokąta oznacza pierwszy kwartyl natomiast dolna kwartyl trzeci. Odległość między górną i dolną linią skrzynki to rozstęp ćwiartkowy (także rozstęp kwartylny lub rozstęp międzykwartylny, iqr. od ang. *interquartile range*). Im większa jest odległość między dolnym i górnym kwartylem tym jest większe zróżnicowanie przedstawianych nierówności. Między górnym i dolnym kwartylem obecnych jest z definicji 50% wszystkich obserwacji (położonych centralnie w rozkładzie), dlatego istotne jest, aby szerokość rozstępu ćwiartkowego była jak najmniejsza wówczas otrzymamy mniejsze zróżnicowanie, w naszym przypadku badanych nierówności. Widoczne na wykresach "wąsy" wyznaczają największą i najmniejszą wartość badanych nierówności. Wartości leżące poza wąsami są reprezentowane przez punkty.

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W trakcie prowadzonych eksperymentów symulacyjnych skupiono się na rejestrowaniu następujących wielkości:

- Przemieszczenia poprzeczne: zestawów kołowych, ram wózków, pudła,
- Sily: pionowe, poprzeczne, wzdłużne,
- Kąty: kąt odchylenia (yaw), kąt przechylenia (roll), kąt pochylenia (pitch),
- Przyspieszenia: zestawów kołowych, ram wózków, pudła,
- Współczynniki: bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu Y/Q, komfortu jazdy.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa poruszającego się pojazdu szynowego podczas przejazdu istotnym jest wyznaczenie współczynnika przeciw wykolejeniu 8. Przeważnie stosowanym do obliczeń teoretycznych jest wzór Nadal'a. Można przyjąć, że jest to kryterium podstawowe i najbardziej powszechne. Wzór Nadal'a w klasycznej postaci jest wzorem znacznie uproszczonym

$$\frac{Y}{Q} = \frac{tgy - \mu}{1 + \mu tgy}$$

gdzie: Y-siła pionowa, Q-siła poprzeczna, μ -wsp. tarcia, γ - kąt pochylenia obrzeża.

Poszczególne wielkości odnoszą się do wartości promienia koła, kąta nabiegania koła na szynę, promienia krzywizny toru, poślizgów względnych, współczynnika tarcia, obciążenia pionowego statycznego koła oraz obciążenia koła nabiegającego (spowodowane zarówno czynnikami wewnętrznymi, jak i zewnętrznymi).

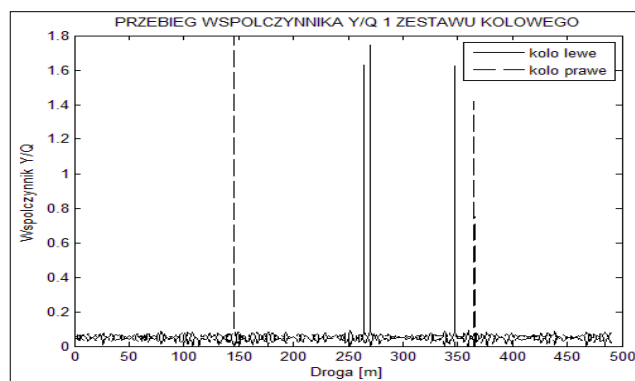
Badania symulacyjne składały się ze scenariuszy badawczych przedstawionych w tabelach nr 1, 2, 3. Scenariusz 1 obejmował eksperymenty przeprowadzone na torze prostym o długości 500 m. Wariantowano stan utrzymania toru oraz prędkość przejazdu.

Scenariusz 2 obejmował przejazd na odcinku: tor prosty, łuk, tor prosty. Wariantowano stan utrzymania toru, prędkość oraz promień łuku. We wszystkich przypadkach tor prosty był odcinkiem o długości 30 m.

Scenariusz 3 obejmował przejazd pojazdu po torze z jednostronnym zwężeniem. Badania prowadzono dla 3 stanu utrzymania toru dostatecznym, dobrym i bardzo dobrym oraz przejazdu pojazdu bez nierówności z uwzględnieniem tylko zwężenia toru.

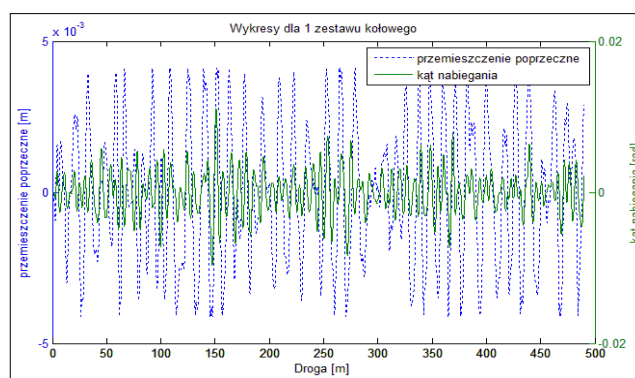
Rysunek nr 7 przedstawia przebieg współczynnika przeciw wykolejeniu Y/Q w funkcji drogi. Wyniki przedstawiono dla odcinka toru prostego o długości 500m, o bardzo dobrym stanie utrzymania dla przejazdu z prędkością 80 km/h.

Na rys. 7 widać pojedyncze piki, które wskazują na sporadyczne przekroczenia tych wartości. Należy zauważyć, iż 1 zestaw kołowy jest zestawem atakującym (prowadzącym) natomiast 2 zestaw kołowy jest zestawem wleczonym.



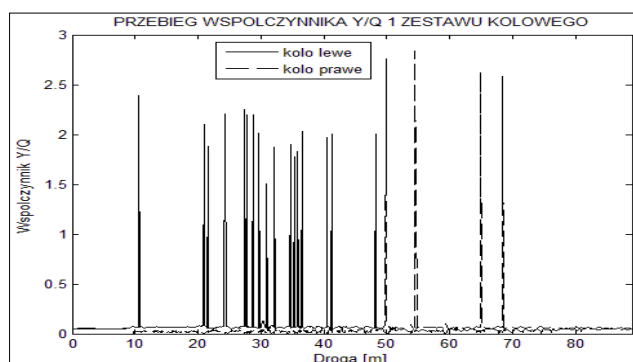
Rys. 7. Przebieg współczynnika Y/Q 1 zestawu kołowego na odcinku 500 m, $v=80\text{km/h}$

Na rys. nr 8 przedstawiono przebieg przemieszczenia poprzecznego zestawu kołowego oraz kąta nabiegania w funkcji drogi. Badania wykonano dla odcinka toru prostego o długości 500m o stanie utrzymania bardzo dobrym, prędkość pojazdu $V=80\text{ km/h}$.

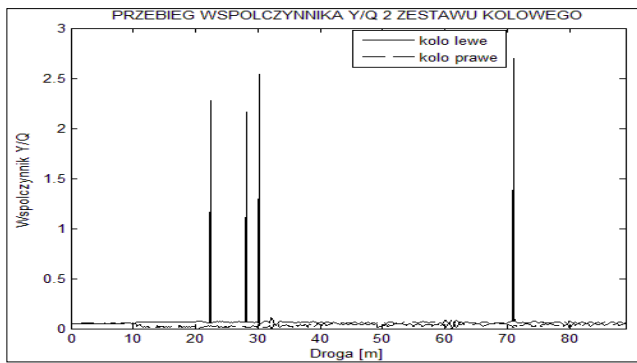


Rys. 8. Wykres przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego - stan toru bardzo dobry, $v=80\text{ km/h}$

Na rys. nr 9 i 10 przedstawiono przebieg współczynnika przeciw wykolejeniu Y/Q dla 2 scenariusza badań. Droga, po której poruszała się pojazd składała się z odcinka toru prostego o długości 30m, następnie z łuku o promieniu $R=18\text{m}$, toru prostego o długości 30m. Przedstawiono wyniki dla toru o dostatecznym stanie utrzymania, prędkość pojazdu $V=20\text{ km/h}$. Z uwagi na specyfikę linii tramwajowych świadomie zdecydowano się na tak mały promień łuku, który można spotkać na zajezdniach tramwajowych.



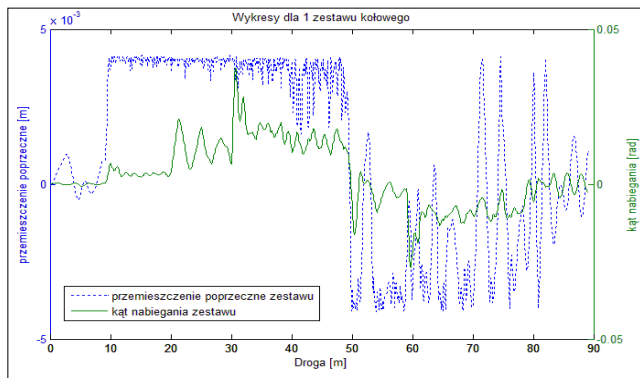
Rys. 9. Przebieg współczynnika Y/Q 1 zestawu kołowego, $v=20\text{km/h}$, $R=18\text{m}$



Rys. 10. Przebieg współczynnika Y/Q 2 zestawu kołowego, $v=20\text{km/h}$, $R=18\text{m}$

Widoczne piki współczynnika przeciw wykołowaniu dla lewego i prawego koła 1 zestawu kołowego świadczyć mogą o utracie kontaktu powierzchni tocznej koła taboru z powierzchnią toczną główki szyny.

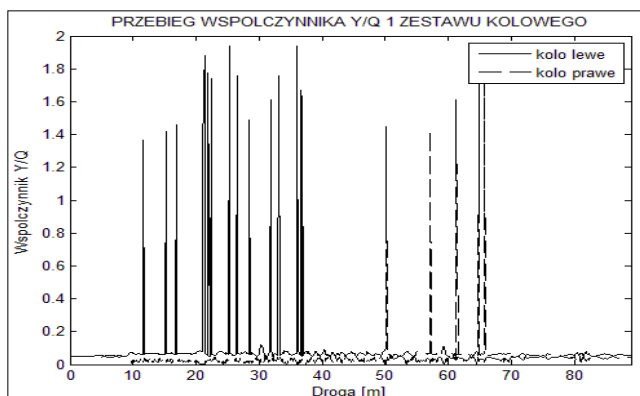
Na rys. nr 11 przedstawiono przebiegi przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego. Wyniki symulacji dotyczą toru o dostatecznym stanie utrzymania.



Rys. 11 Wykres przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego - stan toru dostateczny, $v=20\text{km/h}$, $R=18\text{m}$

Podczas przejazdu po łuku o małym promieniu $R=18\text{m}$, pierwszy zestaw kołowy nabiega na szynę zewnętrzną promienia łuku, natomiast 2 zestaw kołowy na szynę wewnętrzną. W rzeczywistości obserwujemy podobne zjawisko.

Na rys. nr 12 przedstawiono przebieg współczynnika przeciw wykołowaniu Y/Q uzyskany eksperymentu symulacyjnego dla 2 scenariusza badań. Profil drogi składa się z toru prostego o długości 30m, następnie łuku o promieniu $R=18\text{m}$, oraz toru prostego o długości 30m. Przedstawiono wyniki dla toru o bardzo dobrym stanie utrzymania, prędkość pojazdu $V=20\text{ km/h}$.

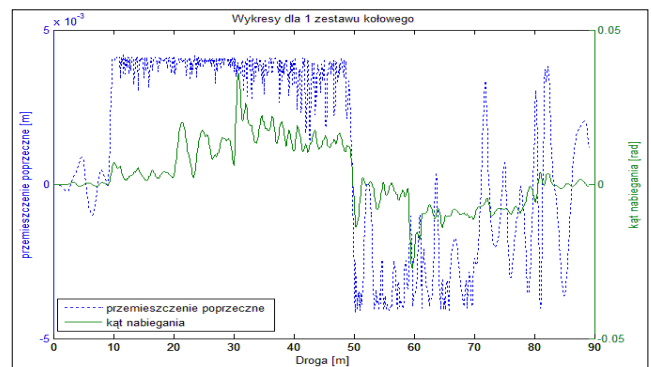


Rys. 12. Przebieg współczynnika Y/Q 1 zestawu kołowego, $v=20\text{km/h}$, $R=18\text{m}$

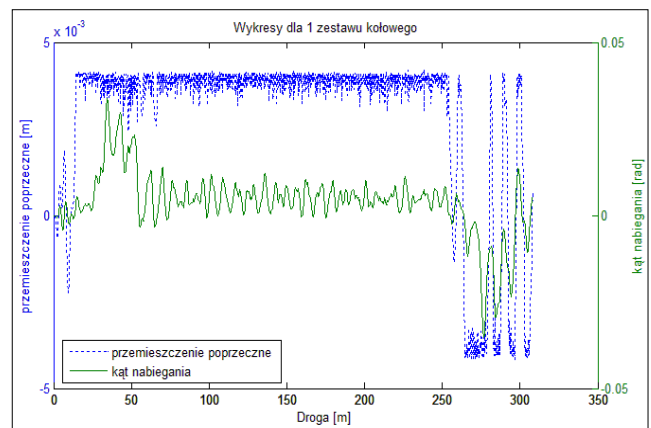
Na rysunku nr 13 przedstawiono przebiegi przemieszczenia poprzecznego oraz kąta nabiegania 1 zestawu kołowego. Wyniki badań przedstawiono dla toru o bardzo dobrym stanie utrzymania, prędkość pojazdu $V=20\text{ km/h}$.

Na rys. nr 14 przedstawiono przebieg współczynnika przeciw wykołowaniu Y/Q dla 2 scenariusza badań. Przyjęty profil drogi to 30 m toru prostego, krzywa przejściowa o długości 6m, łuk regularny o długości 236 m i promieniu 150 m, odcinek toru prostego o długości 30 m. Przedstawiono wyniki dla toru o bardzo dobrym stanie utrzymania, prędkość pojazdu $V=50\text{ km/h}$.

Wartości przemieszczeń poprzecznych oraz kątów nabiegania są na podobnym poziomie w stosunku do przebiegów przedstawionych na rys. 11. Wynikać to może z niewielkiej prędkości poruszającego się pojazdu.



Rys. 13. Wykres przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego - stan toru bardzo dobry, $v=20\text{km/h}$, $R=18\text{m}$



Rys. 14. Wykres przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego - stan toru bardzo dobry, $v=50\text{km/h}$, $R=150\text{m}$

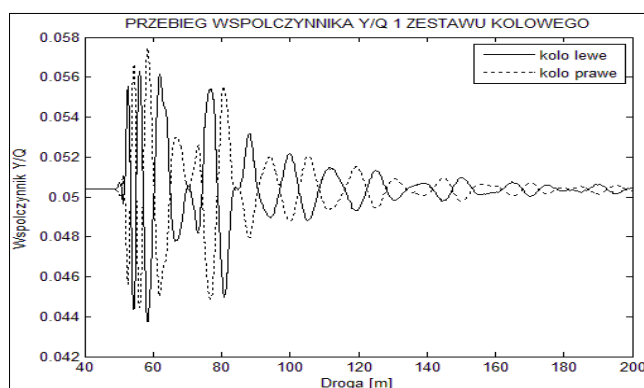
Na rys. nr 15 przedstawiono przebieg współczynnika przeciw wykołowaniu Y/Q dla zwężenia jednostronnego toru. Eksperymenty symulacyjne wykonano dla prostego odcinka toru o długości 500m bez nierówności, prędkość $V=70\text{ km/h}$.

Eksperyment przeprowadzono według scenariusza badawczego przedstawionego w tabeli nr 3. Przebieg współczynnika Y/Q kształtuje się w akceptowanych wartościach. Współczynnik siły poprzecznej do pionowej zmniejsza się wraz z przebytą drogą.

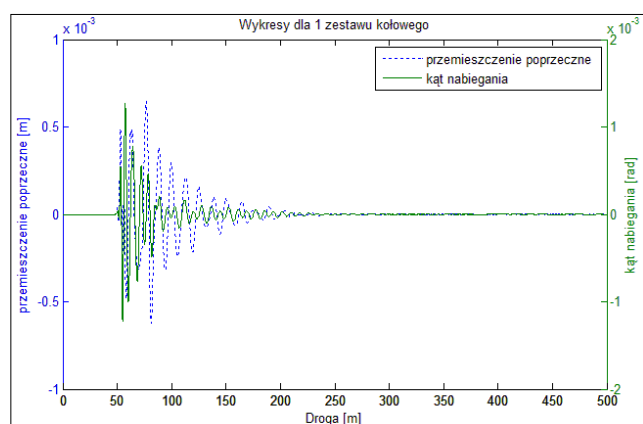
Na rys. 16 przedstawiono przebieg przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego. Badania wykonano dla scenariusza badawczego wg tabeli nr 3. Eksperyment symulacyjny przeprowadzono dla prostego odcinka toru o długości 500 m bez nierówności, prędkość $V=70\text{ km/h}$.

Przemieszczenie poprzeczne i kąt nabiegania mają podobny charakter zmian, co może świadczyć o prawidłowości zbudowanego modelu. W rzeczywistości obserwujemy podobne zjawisko. Ponadto

można zaobserwować właściwości powracania zestawu kołowego do jego centralnego położenia.



Rys. 15. Przebieg współczynnika Y/Q 1 i 2 zestawu kołowego, $v=70\text{km/h}$



Rys. 16. Wykres przemieszczenia poprzecznego i kąta nabiegania 1 zestawu kołowego - stan toru bardzo dobry, $v=70\text{km/h}$

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na ocenę dynamicznego zachowania się modelu tramwaju o parametrach zbliżonych do wagonu 105N. Badania przeprowadzono według zaproponowanych scenariuszy symulacyjnych, które obejmowały m.in. przejazd po łukach o małym promieniu oraz po torze prostym. W scenariuszach badawczych uwzględniono nierówności geometrycznych szyn odpowiadające różnym stanom utrzymania.

Wyniki z przeprowadzonych badań wskazują, iż dla modelu pojazdu o przyjętych parametrach, wartości graniczne wskaźnika Y/Q były przekraczane wielokrotnie niezależnie od przyjętych nierówności toru. Przy czym częstotliwość przekroczeń dopuszczalnych wartości była znacznie większa dla zestawu kołowego atakującego niż wlezonego. Może świadczyć to o błędnej klasyfikacji stanu toru w przypadku pomierzonych nierówności geometrycznych szyn, lub też o lokalnych uszkodzeniach rzeczywistego toru.

Wpływ prędkości jazdy na odpowiedź dynamiczną modelu pojazdu w łukach o małym promieniu jest istotny. Rejestrowane wielkości współczynnika Y/Q dla $v=20\text{km/h}$, $R=18\text{m}$ osiągają znacznie większe wartości dla pierwszego zestawu kołowego.

W przypadku zwiększenia prędkości jazdy do $v=50\text{ km/h}$ i promienia łuku do $R=150\text{m}$ przemieszczenia poprzeczne zestawu kołowego osiągają podobne wartości, co świadczy o poprawności modelu pojazdu.

Odpowiednie wpisywanie się zestawu kołowego podczas przejazdu przez łuk o małym promieniu jest istotne ze względu bezpieczeństwa podróżujących pasażerów oraz innych uczestników ruchu

drogowego. Przedstawione przebiegi kąta nabiegania oraz współczynnika Y/Q dostarczają informacji o możliwości wspinania się koła na szynę. Występowanie kontaktu dwupunktowego i duże wartości sił w kontakcie koła szyna powodują nadmierne zużycie się powierzchni toczonej koła i szyny co w konsekwencji prowadzi do wykołowania się pojazdu.

BIBLIORAFIA

- Białkowski G.: *Mechanika klasyczna*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1975.
- Chudzikiewicz A, Kalker J. J.: "Wheel-Rail Wear Calculations With The Fastsim Routine", Archives Of Transport Quarterly Volume:1 Issue Number: 1/2 p.p. 9-27, 1989, ISSN 0866-9546
- Cudzikiewicz A., Firlik B.: "Kryteria bezpieczeństwa jazdy lekkich pojazdów szynowych.", XVII Konferencja Naukowa - Pojazdy Szynowe, pp. 479-497, 2008.
- Chudzikiewicz A.: "Simulation of Rail Vehicle Dynamics in MATLAB Environment", Vehicle System Dynamics, Volume 33, Issue 2, 2000, p.p. 107-119, ISSN: 0042-3114
- Chudzikiewicz A., Sowiński B., „Simulation method of selection of diagnostic parameters in the process of monitoring the rail vehicle's conditions”, Structural Health Monitoring 2011, DESTech Publications Inc. Stanford, CA, USA, 2011 pp.1103-1110, ISBN 8-1-60595-053-2
- Chudzikiewicz A., Drożdżel J., Kisilowski J., Żochowski A.; „Modelowanie i analiza dynamiki układu mechanicznego tor-pojazd”, PWN, Warszawa, 1982., ISBN 83-01-04727-5
- Chudzikiewicz A. red.: "Monitorowanie stanu układu dynamicznego pojazd szynowy - tor", Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012, ISBN 978-83-7814-050-4
- Kardas-Cinal E.: "Bezpieczeństwo i komfort jazdy pojazdu szynowego z uwzględnieniem losowych nierówności geometrycznych toru", Prace Naukowe Transport Politechniki Warszawskiej, z. 94, 2013, ISSN 1230-9265
- Kisilowski J. red.; "Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy - tor", PWN, Warszawa, 1991, ISBN 83-01-10154-7
- Królikowski W., Rubinowicz W., *Mechanika teoretyczna*: PWN, 2012.
- Oderfeld J.: "Wstęp do mechanicznej teorii maszyn", WNT Warszawa 1962.
- Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (Dz. U. 2016 poz. 226)
- Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 28 maja 2013 r. w sprawie homologacji typu tramwajów i trolejbusów (Dz. U. 2013 poz. 688)
- Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych (Dz. U. 2014 poz. 720 z późn. zm.).
- Sowiński B.: "Zagadnienia aproksymacji i dyskretyzacji w badaniach symulacyjnych dynamiki toru i pojazdu szynowego", Prace Naukowe Transport Politechniki Warszawskiej, z. 59, 2007, ISSN 1230-9265
- Zboiński K.: "Nieliniowa dynamika pojazdów szynowych w łuku", Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, 2012, ISBN 978-83-7789-129-2
- Zboiński K.: "Metodyka modelowania dynamiki pojazdów szynowych z uwzględnieniem zadanego ruchu unoszenia i jej zastosowania", Prace Naukowe Transport Politechniki Warszawskiej, z. 43, 2000, ISSN 1230-9265
- Wickens A.H.: „Fundamentals of rail vehicle dynamics”, Netherlands 2003, ISBN 90-265-1946-X

EVALUATION OF DYNAMIC LIGHT RAIL VEHICLE WITH USING DEVELOPED COMPUTER PACKAGE

Abstract

One of the key issues of research on reliability equipment is their dynamic behaviour in the course of the exploitation. An important factor affecting the reliability of transport systems exploiting rail vehicles is the appropriate state of maintenance of track infrastructure. It is the wrong condition that can cause a break in the traffic, which in the case of the vehicle such as the tram can disrupt the transport system throughout the whole urban agglomeration. One of the elements of the state of the track is arising in the course of operation of geometric inequalities of the track. Their impact on the dynamics of the vehicle is indisputable. Large inequality and lack of adaptation to these speeds can cause a derailment of the vehicle. Research simulation of vehicle dynamics allows for the estimation of the risk of derailment and it can be an important element in enhancing the process of approval. The article gives the results of the research involving the simulation of the movement of

the vehicle on the tracks, where the geometry defined by the quality of the track is named as a track for a very good, good and sufficient condition. In the research we used survey data related to vertical irregularities, transversal and local cant of a railway track. The article focuses on the research of a light rail vehicle (tram) with a conventional wheelset. Particular attention was given to the conditions of exploitation, which could lead to dangerous situations disturbing reliability of the urban transport system.

The article presents the method, which uses modeling of transport processes to selected aspects of the organization of rail freight. Using of modelling takes into account the conditions specific to the market economy. Specified, the conditions which must be satisfied that the demand for cargo generated by the buyers of transport services, was carried out by the railway operators who offer their services on the transport market.

Autorzy:

dr hab. inż. **Bogdan Sowiński prof. PW** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, e-mail: bso@wt.pw.edu.pl

dr inż. **Aleksander Szulczyk** - Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, e-mail: als@wt.pw.edu.pl

mgr inż. **Seweryn Koziak** - Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, e-mail: sko@wt.pw.edu.pl