ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE OF TRAMWAY ON TRACKS WITH VARYING LEVEL OF MAINTENANCE

BADANIA SYMULACYJNE ODPOWIEDZI DYNAMICZNEJ TRAMWAJU NA TORACH O RÓŻNYM STOPNIU WYEKSLOATOWANIA

Julian Kominowski, Tomasz Staśkiewicz

Poznan University of Technology

e-mail: julian.kominowski@put.poznan.pl; tomasz.staskiewicz@put.poznan.pl

Abstract: The paper presents feature of geometric track irregularities occurring on tram infrastructure with varying levels of maintenance and their influence on vehicle's dynamic response. Measurements of vehicle's model masses accelerations were conducted during rides on chosen track sections projecting real geometry. Frequency characteristics of vibration accelerations obtained from simulation and spectra of measured track irregularities were shown and compared to find the relationship between them.

Keywords: tramway infrastructure, exploitation, tramway tracks geometry

Streszczenie: W artykule opisano charakter nierówności geometrycznych nawierzchni występujących na odcinkach miejskiej infrastruktury szynowej o różnym stopniu wyeksploatowania oraz ich wpływ na odpowiedź dynamiczną pojazdu. Dokonano pomiarów przyspieszeń drgań mas modelu tramwaju niskopodłogowego na wybranych odcinkach toru o rzeczywistej geometrii. Przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe pomiarów przyspieszeń drgań z badań symulacyjnych oraz zmierzonych nierówności, a następnie poddano je konfrontacji i ukazano zależność między nimi.

Słowa kluczowe: miejska infrastruktura tramwajowa, eksploatacja, geometria toru tramwajowego

ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE OF TRAMWAY ON TRACKS WITH VARYING LEVEL OF MAINTENANCE

1. Introduction

In the biggest Polish agglomerations trams are the main mean of transport. Thanks to European Union's financial support, there is significant increase of outlays on purchasing new rolling stock, modernization and construction of streetcar lines.

The urban rail infrastructure stands out with high intensity of exploitation, strong influence on the environment due to location of the tracks nearby residential buildings and diversified fleet [6]. Quality of tracks surface affects ride comfort, ride safety, influence on the surroundings and technical condition of vehicles. The main criteria of track surface state assessment are track width, superelevation and rail irregularities (vertical and horizontal). The importance of track geometry in vehicle's dynamic response measurements is indisputable [2, 4, 5]. Therefore for complete evaluation of track condition examination of vehicle's dynamic behavior should be included.

The most recent regulations describing tram tracks maintenance [7], which are applied by the administrators of urban rail infrastructure, do not include tolerances for entire track irregularities. The permissible values of superelevation are described in wide range of vehicle velocities, whereas track width limit is constant. Moreover, the guidelines [7] are dated back in the 1980s, while there was made big technological progress in the field of trams and tracks construction. Carried maintenance policy indicates, that determining speed limit on the specific track stretch is based mainly on it's technical condition. In many cases, there are no other contraindications for rising the permitted velocity. Lack of precise guidelines concerning urban rail infrastructure extorts using the ones dedicated to railway applications [3]. Furthermore, the absence of up-to-date regulations for tram tracks quality assessment forced tram systems administrators to introduce their scales e.g. 3-grade ones estimating tracks quality as: good, satisfactory or bad.

2. Methodology

The paper describes an attempt to estimate the character of tram track irregularities (with varying level of maintenance) and it's influence on dynamic behavior of low-floor tram in range of low frequency vibrations during rides with diversified velocities. On the basis of track irregularities measurements' analysis authors tried to specify means for tracks condition evaluation and calculation of speed limits.

The vehicle's dynamic behavior assessment was carried out on basis of simulation rides through straight sections with measured geometry. Track sections were selected, due to speed limits, not their topography. The simulation model was a five-section, low-floor, 32 meters long tram supported by 3 bogies (first and last – motor, center – trailer). The second and the fourth car were pendant.

The model was developed in the framework of a project conducted at Poznan University of Technology. Calculations were carried out using existing commercial software dedicated to multi-body systems simulations. Model's topology was presented in Figure 1. Particular wheels were designated as WSxy, where x meant number of following wheelsets and y referred to sides of vehicle (L – left or R – right).

Fig. 1. Model's topology

Measurements of track irregularities were carried out using trolley track gauge with inertial measuring system. Following track parameters were recorded: track gauge, superelevation and rail irregularities (vertical and horizontal) with step equal to 0,25 and 0,5 m.

The research was conducted on two chosen track sections with differential speed limits. The first one was limited to 30 kmph and the second one – to 70 kmph (part of fast tram line with desolated passenger infrastructure and collision-safe arrangement with road traffic). The results analysis was based on basic statistic parameters calculations and determining wavelengths of vertical and horizontal rail irregularities [1]. Every track was ballasted and ca. 350 m long, rails (49E1 and 180S) were attached to sleepers with K type fasteners. In order to eliminate possible measuring errors – examined track were straight and without any engineering objects influencing track stiffness.

The simulation of vehicle's dynamic response on track with measured geometry was carried out with 3 ride velocities: 30, 50 and 70 kmph. The measured quantities were vibration accelerations of first bogie frame in two directions: horizontal y and vertical z.

3. Characteristics of irregularities of chosen track sections

The analysis involved tracks classified as follows: track in bad technical condition (called further track one) and track in good technical condition (called further track two). Extent of changes and standard deviation of vertical and horizontal irregularities of rails for specific tracks were presented in Tables 1. and 2.

Tab. 1. Extent of changes and standard deviation of vertical and horizontal irregularities of rails for track one

	Extent of changes [mm]	Standard dev. [mm]
Vertical irregularities, left rail	43	7,6
Vertical irregularities, right rail	51	8,8
Horizontal irregularities, left rail	31	4,8
Horizontal irregularities, right rail	34	5,5

Tab. 2. Extent of changes and standard deviation of vertical and horizontal irregularities of rails for track two

	Extent of changes [mm]	Standard dev. [mm]
Vertical irregularities, left rail	23	3,4
Vertical irregularities, right rail	21	3,5
Horizontal irregularities, left rail	35	5,7
Horizontal irregularities, right rail	39	6,0

Presented values indicate lower vertical irregularities amplitudes for track in good technical condition, but slightly higher values of standard deviation and extent of changes of horizontal irregularities. The track in bad technical condition marks out with higher amplitudes of vertical irregularities.

Figures 2. and 3. show power spectral densities of vertical and horizontal irregularities of particular rails belonging to track one.

Fig. 2. Power spectral density of vertical irregularities of track one

Fig. 3. Power spectral density of horizontal irregularities of track one

Recorded wavelengths of track's vertical irregularities include in 8÷30 m range. Dominant vertical wavelength is equal to 14 m. Horizontal wavelengths include in 10÷35 m range, with dominant one around 22 m.

Power spectral densities of track two rail irregularities are shown in Figures 4. and 5.

Fig. 4. Power spectral density of vertical irregularities of track two

Fig. 5. Power spectral density of horizontal irregularities of track two

The maximum values of power spectral density of track two vertical irregularities are significantly lower, while the main wavelengths include in range of 10÷50 m. Distinguished dominant waves are around 11, 15 and 25 m long. Waves of horizontal irregularities are considerably longer for track in good technical condition than for track in bad technical condition. Recorded waves are 10÷50 m long and the dominant one is about 22 m.

4. Simulation results discussion

Simulation of rides of the low-floor tram model on both tracks characterized in Chapter 2 with various, constant velocities were carried out. Calculated accelerations of vibrations (vertical and horizontal) of the bogie frame were subject to further spectral analysis.

Figures 6. and 7. present power spectral densities of vertical vibration acceleration for rides with particular velocities, on track one.

Fig. 6. Power spectral density of vertical vibration accelerations on track one

Fig. 7. Power spectral density of vertical vibration accelerations on track one

During the ride on track one with 30 kmph, the dominant wavelengths of vertical irregularities (around 10 and 14 m) excited vibrations of bogie frame at around 0,6 and 0,8 Hz. The other waves of vertical irregularities did not affect the dynamic behavior of the model in noticeable manner. Simultaneously with increasing the velocity to 50 kmph, a considerable growth of power spectral density of vibration acceleration occurred. Dominant wavelengths of vertical rail irregularities caused appearance of high acceleration amplitudes around 1,0 and 1,4 Hz. There was no noticeable influence on bogie's behavior by waves with other lengths.

Even higher power spectral density values of vibration acceleration was obtained from ride with 70 kmph. The 14 m long wave is clearly visible on the above graph (Fig. 6.) in the form of dominant acceleration amplitude for frequency equal ca. 1,4 Hz. The research proved the increase in power spectral density of vibration acceleration corresponding to 25 m long wave, which was not observed while rides with lower velocities.

Figures 8. and 9. show power spectral densities of vertical vibration acceleration for rides with particular velocities on track two.

Fig. 8. Power spectral density of vertical vibration accelerations on track two

Fig. 9. Power spectral density of vertical vibration accelerations on track two

Values of power spectral density of vibration acceleration for track two are significantly lower than for track one, regardless of speed. For the 30 kmph ride, dominant power spectral density values corresponding to around 11 and 14 m rail irregularities wavelengths occurred (0,75 and 0,6 Hz respectively). For faster ride (50 kmph), influence of the same rail irregularities wavelengths was observed. Whereas for the highest ride speed, impact of waves from the scope of 10÷26 m with dominant wavelength of around 14 m was apparent. The 14 m long wave suits length of single rail section before welding.

Figures 10. and 11. present power spectral densities of horizontal vibration acceleration for rides with particular velocities, on track one.

Fig. 10. Power spectral density of horizontal vibration accelerations on track one

Fig. 11. Power spectral density of horizontal vibration accelerations on track one

For the ride with 30 kmph the influence of 10 and 22 m long dominant waves of rail irregularities was observed. Power spectral density of vibration acceleration values increased along with the growth of model speed to 50 kmph. The impact of dominant rail irregularities wavelengths was also visible. For the highest ride velocity the highest amplitudes of vibration acceleration power spectral density were recorded. The peaks of PSD values agrees with frequencies congruent with wavelengths from the scope of ca. 10÷33 m. Dominant wavelength of rail irregularities reached 13 m, which suits wavelength of vehicle's hunting movement.

Figures 12. and 13. show power spectral densities of horizontal vibration acceleration for rides with particular velocities on track two.

Fig. 12. Power spectral density of horizontal vibration accelerations on track two

Fig. 13. Power spectral density of horizontal vibration accelerations on track two

For the 30 kmph ride on track two, the most influence exerted 14 m long wave of horizontal rail irregularities. By increasing the velocity to 50 kmph the effect of shorter waves become to be visible for frequencies corresponding to wavelengths of around 14 and 22 m. During the ride with the top speed, a considerable growth in values of power spectral density of vibration acceleration around frequency of 1,4 Hz appeared – suitable to lengths of dominant waves of rail irregularities. Impact of longer waves increased.

5. Conclusion

Technical condition of track has significant influence on vehicle's dynamic response. It is particularly notable and dangerous regarding tram infrastructure, which level of maintenance is lower than for railway. Tram systems managers are aware of that fact and impose speed limits on specific track sections. Commonly decisions are made on the basis of track service's intuition, not measurements or simulation of vehicle's dynamic response.

Measurements of tracks geometry of particular sections with varying level of maintenance demonstrated higher amplitudes of vertical rail irregularities on track one (in bad technical condition). While slightly higher values of horizontal rail irregularities occurred on track two (in good technical condition).

Conducted simulations indicated appearance of short waves of vertical and horizontal rail irregularities and their influence on vehicle's dynamic response. It was confirmed, that the strongest impact on the vehicle (it's technical state and ride comfort) have short waves, around 7÷25 m long. In the field of frequency it suits range 0,5÷2,5 Hz. Along with increasing the velocity rail irregularities began to excite the bogie frame at higher frequencies. The influence of rail irregularities got more intense with increasing vehicle's speed.

Analysis of track irregularities measurements enables to specify the criterion of introducing accurate speed limits. It was found that, on measured tracks, speed limits could be set on basis of vertical track irregularities, as they had the biggest influence on ride comfort. On the other hand lateral irregularities affects ride safety strongly. It is also possible that tram systems manager base on vertical irregularities measurements because of used measuring instruments.

Presented results make up an introduction to conducted work and show the influence of track irregularities' amplitudes on vehicle's dynamic response. While determining the technical state of tracks, the tram system administrators should take vehicle's dynamics behavior into consideration. Geometric and dynamic measurements should be connected to avoid restrictions of track inspection tools.

6. References

- [1] EN: European Standard EN 13848-1-6: Railway applications – Track – Track geometry quality. European Committee for Standardization (CEN).
- [2] Firlik B., Czechyra B., Chudzikiewicz A.: Condition Monitoring System for Light Rail Vehicle and Track, Key Engineering Materials Vol. 518 (2012), p. 66-75.
- [3] Instrukcja o dokonywaniu pomiarów, badań i oceny stanu torów Id-14, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2005.
- [4] Molodova M., Li Z., Núñez A., Dollevoet R.: Validation of a finite element model for axle box acceleration at squats in the high frequency range, Computers and Structures Computers and Structures 141 (2014), p. 84–93

- [5] Sowiński B., Interrelation between wavelengths of track geometry irregularities and rail vehicle dynamic properties, Archives of Transport, Tom issue 1-2, Nr vol. 25-26, 2013.
- [6] Track design Handbook for Light Rail Transit, Second Edition, TCRP Report 155, Transport Research Board, Washington 2012.
- [7] Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych, Warszawa 1983.

All presented work is realised within the framework of a research project „Identification and modeling of nonlinear phenomena at the wheel/rail contact area for the development of a new tramway wheel profile” (LIDER/20/521/L-4/12/NCBR/2013), that has been started with a financial support from the Polish National Centre for Research and Development.

Julian Kominowski MSc. works in Institute of Combustion Engines and Transport at Poznan University of Technology on assistant position. Fields of interest: rail vehicle's dynamics, rail infrastructure diagnostics, multi-body systems simulation (Share 50%).

Tomasz Staškiewicz MSc. works in Institute of Combustion Engines and Transport at Poznan University of Technology on assistant position. Fields of interest: rail vehicle's dynamics, wheel/rail interaction, multi-body systems simulation (Share 50%).

BADANIA SYMULACYJNE ODPOWIEDZI DYNAMICZNEJ TRAMWAJU NA TORACH O RÓŻNYM STOPNIU WYEKSLOATOWANIA

1. Wstęp

W największych polskich ośrodkach aglomeracyjnych głównym środkiem transportu są tramwaje. Dzięki pozyskiwanym środkom unijnym zauważalny jest wzrost nakładów finansowych na zakup nowego taboru, a także modernizację lub budowę nowych linii miejskiego transportu szynowego.

Miejska infrastruktura szynowa wyróżnia się dużą intensywnością eksploatacji, silnym oddziaływaniem na otoczenie ze względu na przebieg linii blisko zabudowań mieszkalnych, czy zróżnicowany tabor [6]. Stan techniczny nawierzchni szynowej wpływa na komfort przejazdu, poziom bezpieczeństwa ruchu tramwajowego, oddziaływanie na otoczenie oraz stan techniczny pojazdów. Głównym kryterium oceny stanu nawierzchni są wyniki pomiarów podstawowych parametrów geometrycznych: szerokości, przechyłki oraz nierówności pionowych i poziomych. Znaczenie geometrii toru w pomiarach odpowiedzi dynamicznej pojazdów szynowych jest bezdyskusyjne [2, 4, 5], dlatego do pełnej oceny stanu nawierzchni należy wziąć pod uwagę również zachowanie dynamiczne pojazdu.

Obecnie stosowane, przez zarządców infrastruktury miejskiej, przepisy opisujące utrzymanie nawierzchni torowisk [7] nie uwzględniają tolerancji dla wszystkich nierówności toru. Dopuszczalne wartości przechyłki obowiązują w szerokim zakresie prędkości, a parametr dopuszczalnej szerokości toru jest niemal jednakowy, bez względu na obowiązujące ograniczenie prędkości oraz topografię toru. Dodatkowo wytyczne [7] pochodzą z pierwszej połowy lat 80. ubiegłego wieku, a od tego czasu nastąpił ogromny skok technologiczny w zakresie budowy pojazdów szynowych oraz torowej infrastruktury miejskiej. Co więcej, prowadzona polityka utrzymaniowa wskazuje, iż określenie ograniczenia prędkości na danym fragmencie linii, wiąże się z jej stanem technicznym. W związku z tym, najczęściej niska prędkość na wydzielonych torowiskach, na których warunki geodezyjne pozwalają na utrzymywanie wyższych prędkości, wiąże się jedynie ze złym stanem nawierzchni oraz dużymi amplitudami nierówności geometrycznych. Brak dokładnych wytycznych dotyczących miejskiej infrastruktury szynowej prowadzi do korzystania z przepisów kolejowych [3], które są znacznie precyzyjniej spisane, lecz odnoszą się do pojazdów i torowisk innych typów. Co więcej, brak współczesnych przepisów oceny nawierzchni torowisk tramwajowych powoduje, iż zarządcy wprowadzają własne skale, np. trzystopniową, określającą stan nawierzchni jako: dobry, zadowalający albo zły.

2. Metodyka badań

W artykule podjęto próbę oszacowania charakteru nierówności geometrycznych toru tramwajowego o różnym stopniu wyeksploatowania oraz ich wpływu na zachowanie dynamiczne tramwaju niskopodłogowego w zakresie niskich częstotliwości drgań podczas przejazdów z różnymi prędkościami. Na podstawie analizy pomiarów nierówności geometrycznych podjęto się także wskazania sposobu oceny stanu nawierzchni oraz wprowadzania ograniczeń prędkości.

Ocenę zachowania dynamicznego pojazdu przeprowadzono na podstawie symulacji na prostych odcinkach toru o zmierzonej, rzeczywistej geometrii. Wyboru fragmentów torowisk dokonano na podstawie ograniczeń prędkości jazdy wynikających ze stanu technicznego, a nie układu geometrycznego, określonych przez ich zarządcę.

W symulacjach wykorzystano istniejący model pięcioczłonowego tramwaju niskopodłogowego o długości 32 m, który został opracowany w ramach projektu prowadzonego w Politechnice Poznańskiej. Model oparty był na trzech wózkach (skrajne napędne, środkowy toczny) zawierających po dwa zestawy kołowe. Pierwszy, trzeci i piąty człon oparto na wózkach, a drugi i czwarty były lektykami. Badania przeprowadzono w istniejącym oprogramowaniu wspomagającym modelowanie i symulacje układów wielomasowych. Topologię modelu zaprezentowano na rys. 1. Oznaczenia poszczególnych kół przyjęto jako WSxy, gdzie x to numer kolejnych zestawów kołowych liczonych od czoła pojazdu, a y odnosi się do strony pojazdu (lewa – L albo prawa – P).

Rys. 1. Topologia modelu symulacyjnego

Pomiary nierówności geometrycznych zrealizowano przy użyciu toromierzy wózkowych z inercyjnym systemem pomiaru. Dokonywano jednoczesnej rejestracji podstawowych parametrów geometrycznych toru: szerokości, przechyłki, nierówności pionowych oraz poziomych, z krokiem pomiarowym wynoszącym 0,25 i 0,5 m.

Badania przeprowadzono na wybranych odcinkach infrastruktury o różnych dopuszczalnych prędkościach jazdy. Na pierwszym z nich obowiązywało ograniczenie do 30 km/h, a na drugim do 70 km/h.

Drugi odcinek stanowił część trasy szybkiego tramwaju miejskiego, z wydzieloną infrastrukturą pasażerską oraz o bezkolizyjnym układzie z ruchem drogowym. Analizę wyników pomiarów geometrii oparto na obliczeniu podstawowych parametrów statystycznych oraz określeniu długości fal nierówności pionowych i poziomych pojedynczych toków szynowych [1]. Każdy z odcinków był długości ok. 350 m, a torowisko zbudowane klasycznie na podsypce tłuczniowej, z przytwierdzeniami typu K oraz szynach 49E1 i 180S. W celu wyeliminowania możliwego błędu pomiarowego nierówności poziomych, każdy z odcinków był odcinkiem prostym, bez obiektów inżynierskich wpływających na zmianę sztywności toru.

Badania symulacyjne odpowiedzi dynamicznej modelu na torze o rzeczywistej geometrii przeprowadzono z trzema prędkościami – 30, 50 i 70 km/h. Wielkościami mierzonymi były przyspieszenia drgań ramy pierwszego wózka. Przyspieszenia drgań zmierzono w dwóch kierunkach: poprzecznym y oraz pionowym z .

3. Charakterystyka nierówności wybranych odcinków toru

Do analizy wybrano tory sklasyfikowane następująco: jeden tor o złym stanie utrzymania (dalej zwanym torem „jeden”) oraz tor o dobrym stanie utrzymania (dalej zwanym torem „dwa”). W tablicach 1 i 2 przedstawiono zakres zmian oraz odchylenie standardowe nierówności pionowych oraz poziomych pojedynczych toków szynowych, dla każdego z wybranych odcinków.

Tab. 1. Zakres zmian oraz odchylenie standardowe nierówności pionowych oraz poziomych toków szynowych toru jeden

	Zakres zmian [mm]	Odchylenie std. [mm]
Nierówności pionowe, tok lewy	43	7,6
Nierówności pionowe, tok prawy	51	8,8
Nierówności poziome, tok lewy	31	4,8
Nierówności poziome, tok prawy	34	5,5

Tab. 2. Zakres zmian oraz odchylenie standardowe nierówności pionowych oraz poziomych toków szynowych toru dwa

	Zakres zmian [mm]	Odchylenie std. [mm]
Nierówności pionowe, tok lewy	23	3,4
Nierówności pionowe, tok prawy	21	3,5
Nierówności poziome, tok lewy	35	5,7
Nierówności poziome, tok prawy	39	6,0

Przedstawione wartości wskazują na niższe amplitudy nierówności pionowych dla toru o dobrym stopniu utrzymania. Odchylenie standardowe oraz zakres zmian nierówności poziomych przyjmują nieznacznie wyższe wartości na torze drugim. Tor o złym stanie utrzymania charakteryzuje się większymi amplitudami nierówności pionowych.

Gęstości widmowe nierówności pionowych oraz poziomych dla poszczególnych toków szynowych na torze o złym stanie utrzymania pokazano na rysunkach 2 i 3.

Rys. 2. Gęstość widmowa mocy nierówności pionowych toru o złym stanie utrzymania

Rys. 3. Gęstość widmowa mocy nierówności poziomych toru o złym stanie utrzymania

Zarejestrowane długości fal nierówności pionowych mieszczą się w zakresie od około 8 m do około 30 m. Dla przeprowadzonych pomiarów badanego odcinka zauważono dominującą falę nierówności pionowej o długości ok. 14 m. Długości fal nierówności poziomych znajdują się w zakresie od ok. 10 m do ok. 35 m, a dominująca fala wynosi ok. 22 m.

Gęstości widmowe mocy nierówności toków szynowych o dobrym stanie utrzymania przedstawione są na rysunkach 4 i 5.

Rys. 4. Gęstość widmowa mocy nierówności pionowych toru o dobrym stanie utrzymania

Rys. 5. Gęstość widmowa mocy nierówności poziomych toru o dobrym stanie utrzymania

Wartości maksymalne widma gęstości mocy nierówności pionowych toru drugiego są znacznie mniejsze, a długości fal nierówności kształtują się od ok. 10 do 50 m. Wyróżniono dominujące fale o długościach ok. 11, 15 oraz 25 m. Gęstość widmowa mocy nierówności poziomych dla toru o dobrym stanie utrzymania wskazuje na występowania znacznie dłuższych fal, niż w przypadku toru o złym stanie utrzymania. Zarejestrowano fale o długościach od ok. 10 do ok. 50 m. Wyróżniono falę dominującą o długości ok. 22 m.

4. Analiza wyników symulacji

Na dwóch wybranych odcinkach, odpowiadającym trasom o rzeczywistej geometrii nawierzchni, przeprowadzono symulacje przejazdów modelu tramwaju niskopodłogowego z różnymi, stałymi prędkościami. Obliczone przyspieszenia drgań, pionowych oraz poziomych, ramy wózka atakującego poddano dalszej analizie widmowej.

Na rysunkach 6 i 7 zaprezentowano widma gęstości mocy przyspieszeń drgań dla przejazdów z poszczególnymi prędkościami, dla osi pionowej, dla toru jeden.

Rys. 6. Widmo gęstości mocy przyspieszeń drgań pionowych dla toru jeden

Rys. 7. Widmo gęstości mocy przyspieszeń drgań pionowych dla toru jeden

Podczas przejazdu z prędkością 30 km/h po torze jeden, którego dominujące fale nierówności pionowych wynoszą ok. 10 m i ok. 14 m, zauważono amplitudy wartości gęstości mocy przyspieszeń drgań, dla odpowiadających im częstotliwości ok. 0,6 i 0,8 Hz. Pozostałe fale nierówności, przy prędkości 30 km/h, nie wpłynęły w sposób zauważalny na zachowanie modelu tramwaju. Wraz ze zwiększeniem prędkości do 50 km/h, nastąpił zdecydowany wzrost wartości gęstości mocy przyspieszeń. Dominujące fale nierówności pionowych o długościach ok. 10 m i ok. 14 m spowodowały pojawienie się amplitud dominujących dla wartości 1,4 i 1,0 Hz. Dłuższe fale nie spowodowały zauważalnych zmian w odpowiedzi dynamicznej wózka pojazdu w kierunku pionowym. Jeszcze wyższe wartości gęstości widmowej mocy przyspieszeń drgań dostrzeżono w wyniku podniesienia prędkości do 70 km/h. Fala o długości ok. 14 m jest wyraźnie widoczna na powyższym wykresie w postaci amplitudy dominującej wartości gęstości widmowej mocy przyspieszeń drgań dla częstotliwości ok. 1,4 Hz.

Analiza wykazała także wzrost wartości odpowiadającej dłuższej dominującej fali nierówności pionowych – ok. 25 m, która nie była widoczna podczas przejazdów z niższymi prędkościami.

Na rys. 8 i 9 zaprezentowano widma gęstości mocy przyspieszeń drgań dla przejazdów z poszczególnymi prędkościami, dla osi pionowej, dla toru dwa.

Rys. 8. Widmo gęstości mocy przyspieszeń drgań pionowych dla toru dwa

Rys. 9. Widmo gęstości mocy przyspieszeń drgań pionowych dla toru dwa

Amplitudy wartości gęstości widmowej mocy przyspieszeń drgań dla toru dwa są zdecydowanie niższe niż dla toru jeden dla przejazdów ze wszystkimi prędkościami. Dla przejazdu z prędkością 30 km/h, dostrzeżono dominujące wartości amplitud dla częstotliwości odpowiadającym falom nierówności o długości ok. 11 m i ok. 14 m (0,75 i 0,6 Hz). Dla prędkości 50 km/h, także można zauważyć wzrost gęstości mocy przyspieszeń drgań pochodzący od fal o tych samych długościach. Natomiast dla najwyższej prędkości przejazdu, zarejestrowano fale nierówności pionowych w zakresie od ok. 10 m do ok. 26 m, z dominującą falą o długości ok. 14 m, co odpowiada długości pojedynczego odcinka szyny przed zgrzewaniem.

Na rys. 10 i 11 zaprezentowano widma gęstości mocy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym, dla przejazdów z poszczególnymi prędkościami, na torze jeden.

Rys. 10. Widmo gęstości mocy przyspieszeń drgań poprzecznych dla toru jeden

Rys. 11. Widma gęstości mocy przyspieszeń drgań poprzecznych dla toru jeden

Dla przejazdu z prędkością 30 km/h zauważono wpływ dominujących fal nierówności poziomych o długościach 10 i 22 m. Przy prędkości modelu wynoszącej 50 km/h, wartości amplitud gęstości mocy przyspieszeń drgań są wyższe. Widoczny jest wpływ fal nierówności o długościach ok. 10 i 22 m. Dla najwyższej prędkości przejazdu odnotowano najwyższe amplitudy gęstości widmowej mocy przyspieszeń drgań. Wyraźne piki wartości gęstości mocy pokrywają się z częstotliwościami odpowiadającymi długościom fal z zakresu od ok. 10 do ok. 33 m. Zlokalizowana dominująca fala nierówności poziomych osiągnęła długość ok. 13 m.

Na rys. 12 i 13 zaprezentowano widma gęstości mocy przyspieszeń drgań dla przejazdów z poszczególnymi prędkościami, dla osi poziomej, dla toru dwa.

Rys. 12. Widmo gęstości mocy przyspieszeń drgań poprzecznych dla toru dwa

Rys. 13. Widma gęstości mocy przyspieszeń drgań poprzecznych dla toru dwa

Przy przejeździe z prędkością 30 km/h po torze dwa, dominującą okazała się fala nierówności poziomych o długości ok. 14 m. Po zwiększeniu prędkości do 50 km/h wpływ krótszych fal nierówności zaczął być widoczny dla częstotliwości odpowiadającym falom o długości ok. 14 i 22 m. Podczas przejazdu z najwyższą prędkością odnotowano zdecydowane wzrosty wartości gęstości widmowej mocy przyspieszeń drgań w okolicach częstotliwości ok. 1,4 Hz, odpowiadających poszczególnym długościom dominujących fal. Wpływ fal o większych długościach zwiększył się.

5. Podsumowanie, Wnioski

Stan nawierzchni torowiska tramwajowego ma bardzo duży wpływ na zachowanie dynamiczne pojazdu. Jest to szczególnie widocznie i niebezpieczne na infrastrukturze tramwajowej, której utrzymanie jest na niższym poziomie niż kolejowej. Świadomi tego faktu zarządcy sieci wprowadzają ograniczenia prędkości na poszczególnych odcinkach. Są one wprowadzane zazwyczaj w oparciu o intuicję służb torowych, a nie o pomiary rzeczywiste czy symulacyjne odpowiedzi dynamicznej pojazdu.

Badania rzeczywiste geometrii nawierzchni odcinków o różnym stanie utrzymania, wykazały większe amplitudy nierówności pionowych na odcinku o złym stanie technicznym. Podczas gdy nieznacznie większe amplitudy nierówności poziomych zarejestrowano na odcinku o dobrym stanie utrzymania.

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały obecność krótkich fal nierówności pionowych i poziomych oraz ich wpływ na odpowiedź dynamiczną modelu. Potwierdzono, iż największe oddziaływanie na pojazd, a tym samym na jego stan techniczny oraz komfort jazdy, wywierają fale krótkie o długości od ok. 7 m do ok. 25 m. W dziedzinie częstotliwości jest to zakres 0,5÷2,5 Hz. Wraz ze wzrostem prędkości nierówności szyn wzbudzają na ramie wózka drgania o wyższych częstotliwościach. Im wyższa jest prędkość jazdy, tym bardziej odczuwalne jest oddziaływanie nierówności toru.

Analiza pomiarów nierówności geometrycznych nawierzchni pozwala określić kryterium wprowadzania ograniczeń prędkości przez zarządcę infrastruktury. Pomiary wykazały, iż zarządca określa maksymalne prędkości jazdy na podstawie amplitud nierówności pionowych, gdyż one mają największy wpływ na komfort jazdy. Nierówności poziome w większym stopniu wpływają na bezpieczeństwo jazdy. Być może zarządca opiera się na pomiarze nierówności pionowych ze względu na stosowane przez niego narzędzia pomiarowe.

Przedstawione wyniki są wstępem do prowadzonych prac i pokazują, wpływ amplitud nierówności geometrycznych nawierzchni na odpowiedź dynamiczną pojazdu. Przy określeniu stanu nawierzchni zarządcy infrastruktury miejskiej powinni uwzględniać zachowanie pojazdu na torze. Połączenie pomiarów geometrii infrastruktury oraz dynamiki pojazdu powinno być stosowane, choćby ze względu na ograniczenia stosowanego narzędzia pomiarowego nawierzchni.

6. References, Literatura

- [1] EN: European Standard EN 13848-1-6: Railway applications – Track – Track geometry quality. European Committee for Standardization (CEN).
- [2] Firlik B., Czechyra B., Chudzikiewicz A.: Condition Monitoring System for Light Rail Vehicle and Track, *Key Engineering Materials* vol. 518 (2012), p. 66-75.
- [3] Instrukcja o dokonywaniu pomiarów, badań i oceny stanu torów Id-14, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2005.
- [4] Molodova M., Li Z., Núñez A., Dollevoet R.: Validation of a finite element model for axle box acceleration at squats in the high frequency range, *Computers and Structures* 141 (2014), p. 84–93.
- [5] Sowiński B., Interrelation between wavelengths of track geometry irregularities and rail vehicle dynamic properties, *Archives of Transport*, Tom issue 1-2, vol. 25-26, 2013.

- [6] Track design Handbook for Light Rail Transit, Second Edition, TCRP Report 155, Transport Research Board, Washington 2012.
- [7] Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych, Warszawa 1983.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego
„Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną, celem opracowania nowego profilu koła tramwajowego”
(LIDER/20/521/L-4/12/NCBR/2013), finansowanego przez
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER.

Mgr inż. Julian Kominowski pracuje w Instytucie Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej na stanowisku asystenta. Zainteresowania naukowe: dynamika pojazdów szynowych, diagnostyka nawierzchni infrastruktury szynowej, symulacja układów wielomasowych (Udział 50%).

Mgr inż. Tomasz Staśkiewicz ukończył studia na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej na kierunku Mechanika i Budowa maszyn. Pracuje w Instytucie Silników Spalinowych i Transportu na stanowisku asystenta. Zainteresowania naukowe: dynamika pojazdów szynowych, symulacja układów wielomasowych, współpraca koła z szyną (Udział 50%).