

Doświadczalne badanie własności dynamicznych i statycznych toru kolejowego w warunkach Polskich Kolei Państwowych

W pracy opisano dwie metody doświadczalnego wyznaczania własności dynamicznych toru istotnych z punktu widzenia oddziaływania pojazdu na tor w zakresie średnio-częstotliwościowym. Omówiono przebieg wykonanych eksperymentów oraz podano wyznaczone doświadczalnie dla warunków PKP charakterystyki dynamiczne toru w postaci funkcji receptancji.

1. WSTĘP

Własności toru kolejowego w niezwykle istotny sposób wpływają na dynamikę jazdy pojazdów szynowych, zarówno przy niewielkich oraz dużych prędkościach jazdy. Do najważniejszych własności toru kolejowego uważano do pewnego czasu jego parametry geometryczne, tj. promienie łuków i krzywych przejściowych, wartości przechyłek oraz wszelkiego rodzaju nierówności w płaszczyźnie pionowej i poziomej będące źródłem kinematycznych wymuszeń drgań pojazdów szynowych podczas jazdy, [1,2]. Przy realnych wartościach prędkości komunikacyjnych współczesnych pociągów pasażerskich i towarowych nierówności te powodują zazwyczaj wzbudzenia drgań pojazdów szynowych z zakresie częstotliwości nie przekraczających 20÷30 Hz. Obserwowany obecnie wzrost prędkości podróży nowoczesnych pociągów pasażerskich i zwiększanie obciążeń na oś pociągów towarowych, jak również pojawianie się dodatkowych szybkozmiennych wymuszeń drgań wywoływanych nierównościami powierzchni tocznych szyn i kół jezdnych w formie zużycia falistego (korrugacji) i tzw. poligonalizacji kół, wymagają prowadzenia wnikliwych badań dynamicznego oddziaływania pojazdów szynowych z torem w zakresie znacznie wyższych częstotliwości, mając wówczas na uwadze nie tylko bezpieczeństwo i komfort jazdy, lecz również wytrzymałość szyn i elementów układu jezdnego, efekty ich zużycia i zmęczenia oraz różnego rodzaju efekty akustyczne (uciażliwego hałasu), [3,4]. Jak wynika z cytowanej literatury, np. [5-6], w zakresie częstotliwości oddziaływania pojazdu szynowego z torem 30÷1500 Hz własności lepko-bezwładnościowo-sprężyste toru kolejowego nabierają szczególnie istotnego znaczenia wpływając na wartości powstających sił kontaktowych i poślizgów między powierzchniami tocznymi kół jezdnych i szyn.

Podstawową mierzoną wielkością klasyfikującą tzw. „twardość” toru kolejowego jest jego pionowa sztywność statyczna w położeniu oddziaływania między podkładami, nad podkładem lub wartość średnia tych sztywności. Własności dynamiczne toru kolejowego są poszukiwane w formie odpowiednich charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych w pionowym, poprzecznym, a także wzdłużnym kierunku oddziaływania względem osi toru. Te charakterystyki wyznaczone w

zakresie częstotliwości wynoszącym najczęściej 0÷1500÷2000 Hz są wyrażane zwykle w postaci widma jednostkowych amplitud przemieszczeń odniesionych do wartości siły wymuszającej (jej amplitudy) zwanego receptancjami, np. w [5-8,10,11-13], lub w formie odwrotności tej wielkości zwanego impedancjami, np. w [9].

Jednym z podstawowych celów wyznaczania wymienionych powyżej charakterystyk dynamicznych jest określenie zakresów częstotliwości, w których tor kolejowy może być szczególnie wrażliwy na drgania wzbudzone wskutek oddziaływania z pojazdem szynowym, oraz zakresów, w których tor jest mało wrażliwy na drgania, tzn. jest dynamicznie „twardy”. Jak wynika z przeprowadzonych dotychczas badań doświadczalnych i teoretycznych opublikowanych np. w [5-8], tor kolejowy mimo swojej pozornie nieskończonej długości struktury posiada określone widmo częstotliwości drgań własnych w kierunku pionowym, poprzecznym, a nawet wzdłużnym. Przy oddziaływaniu dynamicznym z pojazdem szynowym szczególnie ważny jest kierunek pionowy i poprzeczny drgań toru. Dla obu tych kierunków w zakresie częstotliwości 0÷1500 Hz występują co najmniej trzy charakterystyczne postacie drgań własnych.

Pierwszą z nich jest postać, w której szyna i podkłady drgają „w fazie”. Zarówno w położeniu oddziaływania „nad podkładem” i „między podkładami” występuje ona najczęściej w zakresie częstotliwości 100÷200 Hz w kierunku pionowym oraz w zakresie częstotliwości 50÷100 Hz w kierunku poprzecznym.

Drugą postacią drgań własnych jest forma, w której szyna i podkłady drgają „w przeciwfazie”, (rysunek 1). W kierunku pionowym występuje ona najczęściej w zakresie częstotliwości 400÷600 Hz, a w kierunku poprzecznym w zakresie częstotliwości 100÷300 Hz zarówno w położeniu oddziaływania „nad podkładem” i „między podkładami”.

Trzecią charakterystyczną postacią drgań toru jest forma, w której zarówno w kierunku pionowym i poprzecznym podkłady pozostają w spoczynku, a drganiom podlegają tylko szyny. Ta postać drgań własnych nazywana jest w języku angielskim „pinned-pinned mode”. Cechuje ją w przybliżeniu sinusoidalny kształt linii ugięcia szyn „nawleczonych” na stanowiące węzły drgań podkłady. W kierunku pionowym trzecia postać występuje najczęściej w zakresie częstotliwości 800÷1200 Hz, a w kierunku poprzecznym w zakresie częstotliwości 400÷1000 Hz w

położeniu oddziaływania „między podkładami”. W przeciwieństwie do dwóch poprzednich postaci drgań własnych toru, postać trzecia jest teoretycznie niemożliwa do wzbudzenia w położeniu oddziaływania „nad pokładem” będącym węzłem jej drgań.

Znane są dotychczas wyniki badań własności kolejowych torów zagranicznych, np. niemieckich, szwedzkich, brytyjskich, francuskich i innych. Natomiast niewiele analogicznych informacji można znaleźć w literaturze dotyczącej torów polskich.

Specyfika konstrukcji nawierzchni kolejowej występującej na liniach PKP nie zezwala na bezpośrednie przeniesienie wyników badań własności dynamicznych toru dostępnych w literaturze zagranicznej. Plany podwyższenia prędkości jazdy na PKP oraz przewidywane w związku z tym niekorzystne zjawiska występujące podczas eksploatacji nowoczesnego parku wagonów pasażerskich oraz lokomotyw w postaci dodatkowych obciążeń dynamicznych układu tor – pojazd spowodowały, że doświadczone wyznaczenie scharakteryzowanych powyżej własności dynamicznych i statycznych torów kolejowych eksploatowanych w warunkach PKP stało się szczególnie celowe.

2. OBIEKT BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Ważnym etapem w przygotowaniu eksperymentu był wybór odcinka pomiarowego do badań. Z uwagi na fakt, że celem eksperymentu miało być określenie własności dynamicznych torów najbardziej reprezentatywnych w typowych warunkach na liniach PKP wybór odcinków pomiarowych musiał uwzględniać typowe konstrukcje nawierzchni dostosowanych do jazd z prędkościami do 200 km/h (pociągi pasażerskie), z prędkościami do 160 km/h (pociągi pasażerskie i nowoczesne towarowe), z prędkościami do 120 km/h (pociągi pasażerskie i towarowe). W celu spełnienia tak postawionych wymagań eksperyment przeprowadzono, na typowych w warunkach polskich, trzech odcinkach (lokalizacjach – tabela 1) toru kolejowego należącego do poligonu doświadczalnego Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa w Żmigrodzie k. Wrocławia.

Tabela 1 Cechy konstrukcyjne toru wybranych lokalizacji pomiarowych

Elementy konstrukcji toru	Lokalizacja I	Lokalizacja II	Lokalizacja III
szyna -	S60	S60	S60
podkład-	Betonowy	drewniany miękki	drewniany twardy
przekładki podszynowe	Lu	Lu	Lu
wkładki izolacyjne	W60 (LU)	Brak	Brak
Przytwierdzenie	sprężyste SB3, łubki i śruby łubkowe (S)	łubki, śruby łubkowe, łapki (S)	łubki, śruby łubkowe, łapki (S)
rodzaj podsypki	Źłuczeń	Źłuczeń	Źłuczeń

3. WYZNACZANIE SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ TORU

Wyznaczania sztywności statycznej toru dokonano mierząc ugięcie toru pod występującym obciążeniem. Obliczona jako stosunek nacisku koła lokomotywy do zmierzonego ugięcia wartość sztywności statycznej dla Lokalizacji I wynosi $k_{stat}=2.03 \cdot 10^8$ N/m. Ta wartość wskazuje, iż badany odcinek toru typowy na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK) lub linii E-20 (Warszawa-Poznań) należy do tzw. torów sztywnych wg odpowiedniej klasyfikacji zamieszczonej w pracy [15]. Obliczona w taki sam sposób wartość sztywności statycznej dla Lokalizacji II wynosi $k_{stat}=0.82 \cdot 10^8$ N/m. Ta wartość wskazuje, iż badany odcinek toru jest typowym "torem miękkim" wg wspomnianej klasyfikacji z pracy [15]. Z kolei obliczona wartość sztywności statycznej dla Lokalizacji III wynosi $k_{stat}=1.10 \cdot 10^8$ N/m. Na podstawie tej wartości stosując klasyfikację z pracy [15] badany odcinek toru można zaliczyć do "torów średnich".

4. WYZNACZANIE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH TORU

Badanie własności dynamicznych toru dla wybranych trzech lokalizacji sprowadza się do wyznaczenia ich wspomnianych powyżej charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych w formie pionowych i poprzecznych receptancji, odpowiadających im funkcji kątów przesunięć fazowych oraz transmitancji definiowanych jako stosunki wartości receptancji otrzymanych w zadanych punktach pomiarowych.

Z uwagi na własności dynamiczne toru i możliwości aparatury badawczej do wyznaczenia własności dynamicznych toru użyto dwóch metod pomiarowych.

Metoda pierwsza oparta była na impulsowym wymuszaniu drgań szyny za pomocą uderzeń specjalnym młotkiem pomiarowym, co miało realizować teoretyczną przesłankę, że widmo przebiegu impulsowego jest stałe i ciągle w całym zakresie częstotliwości. Metoda druga polegała na wymuszaniu drgań toru za pomocą specjalnego wzbudnika drgań umożliwiającego uzyskanie stałej amplitudy siły wymuszającej przy przestrajanej w sposób ciągły częstotliwości.

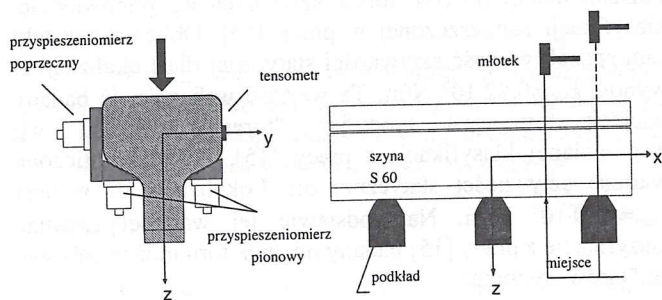
Pierwsza metoda pomiarowa pozwalała na zbadanie postaci drgań własnych toru przy częstotliwościach z zakresu 200÷1500 Hz, natomiast metoda druga pokrywała zakres niskich częstotliwości 40÷250 Hz.

4.1 WYZNACZANIE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH TORU PRZY WYKORZYSTANIU „MŁOTKA POMIAROWEGO”

Jako metodę pomiarową przyjęto impulsowe wymuszanie drgań szyny za pomocą uderzeń specjalnym młotkiem pomiarowym oraz rejestrację zarówno siły uderzenia jak i odpowiedzi dynamicznych szyny poprzez pomiar przyspieszeń w określonych punktach pomiarowych. Badania były przeprowadzane na torze obciążonym wagonem osobowym o ciężarze ok. 50 t. Wózek wagonu osobowego stał na torze badanym w ten sposób, że pierwsza oś wózka

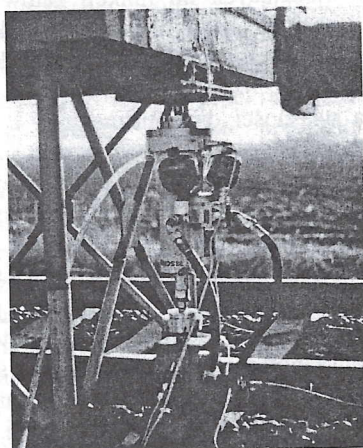
znajdowała się w odległości 2 podkładów od skrajnego przekroju pomiarowego.

Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione na rysunku nr.1. Na szynie nad podkładem jak i pomiędzy podkładami zostały zamontowane czujniki pomiarowe mierzące drgania w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Uderzenia młotka pomiarowego w płaszczyźnie pionowej oraz poziomej następowały zarówno między podkładami jak i nad podkładem.



Rys.1. Stanowisko pomiarowe do pomiaru receptancji dynamicznych toru

4.2 WYZNACZANIE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH TORU PRZY WYKORZYSTANIU WZBUDZANIA DRGAŃ SYGNAŁEM STACJONARNYM



Rys. 2 Hydrauliczny wzbudnik drgań

Jako metodę pomiarową przyjęto wymuszanie drgań szyny za pomocą specjalnego wzbudnika drgań w zakresie częstotliwości od 40 do 250 Hz oraz rejestrację zarówno siły wymuszającej jak i odpowiedzi dynamicznych szyny poprzez pomiar przyspieszeń w określonych punktach pomiarowych. Badania były przeprowadzane na torze obciążonym wagonem towarowym o masie ok. 90 t.

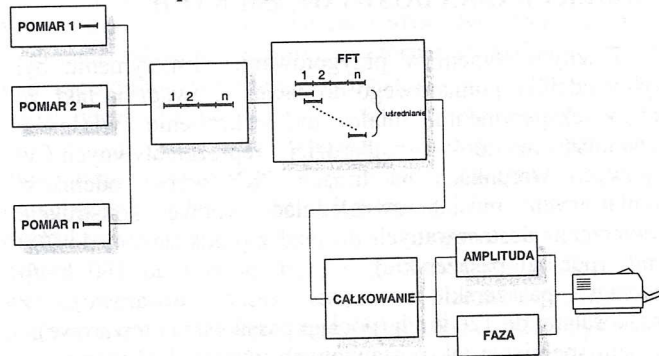
W celu pomiaru receptancji dynamicznych toru wzbudzano drgania z określonymi częstotliwościami za pomocą specjalnego wzbudnika drgań. Do przeprowadzenia eksperymentu na specjalnie adaptowanej sztywnej konstrukcji bramki nośnej umieszczonej nad szyną zamontowano wzbudnik drgań, który za pomocą specjalnego uchwytu mocującego połączony był z szyną. W celu zapewnienia większej sztywności układu bramki nośnej

obciążono ją podkładami betonowymi o łącznej masie ok. 5 ton.

W wybranych miejscach nad podkładem jak i pomiędzy podkładami na szynie zostały zamontowane czujniki przyspieszeń mierzące drgania w kierunku pionowym. Wymuszenie drgań szyny następowało zarówno w punkcie między podkładami jak i nad podkładem.

5. WYNIKI POMIARÓW

Wszystkie rejestrowane sygnały pomiarowe były zapisywane na dysku PC. Następnie za pomocą specjalistycznego oprogramowania wyznaczono receptancje i transmitancje w funkcji częstotliwości. Schemat układu przetwarzania danych przedstawiono na rysunku 3. Do obliczeń zastosowano metodę wędrującego okna czasowego przesuwanego ze stałym krokiem. Dla każdego okna wyznaczane były charakterystyki widmowe metodą szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Do uśredniania w dziedzinie częstotliwości zastosowano metodę Welha [14]. Metoda ta ma tę przewagę nad innymi, że umożliwia zmniejszenie wariacji (poprawę funkcji koherencji) kosztem niewielkiego zmniejszenia rozdzielności poszczególnych prążków widma.

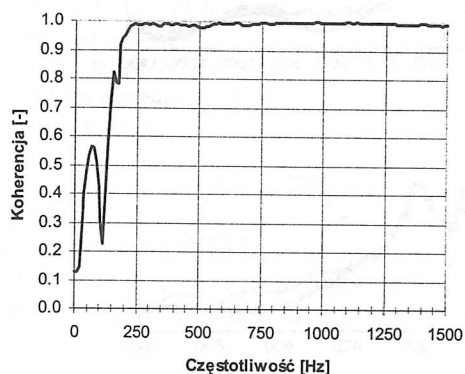


Rys. 3. Schemat metody przetwarzania danych pomiarowych

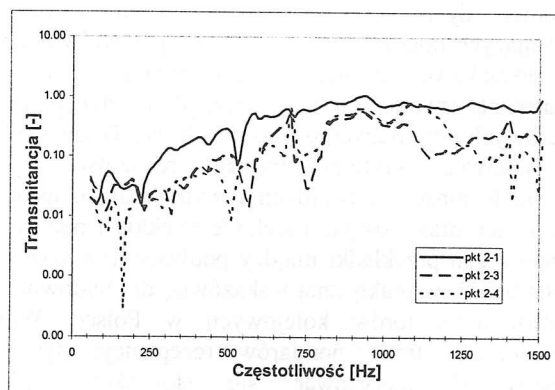
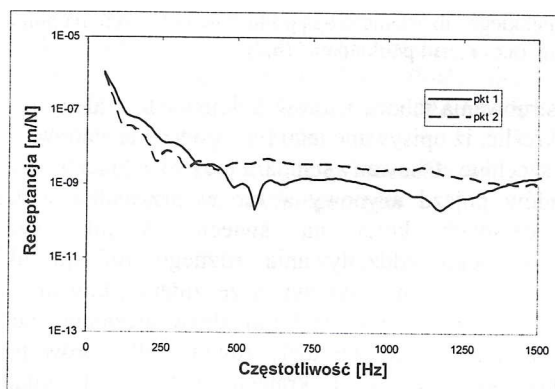
Analiza sygnałów zarejestrowanych w czasie przeprowadzania eksperymentów, w których źródłem wymuszenia siły był młotek wykazała małą korelację między sygnałami w paśmie częstotliwości 0-200Hz, pomimo „sklejenia” danych z poszczególnych eksperymentów. Przykładową funkcję koherencji przedstawiono na rysunku 4. Przyczyny tego mogły być powodowane użytą aparaturą rejestrującą, nieznanymi właściwościami czujników przy wymuszeniu impulsowym, nie-osiowego wymuszenia lub innych. Potwierdza to jednak opinię innych ośrodków badawczych. W celu określenia charakterystyk częstotliwościowych toru w paśmie częstotliwości do 200Hz jak już wspomniano użyto hydraulicznego wzbudnika drgań. Sposób przetwarzania danych pomiarowych był identyczny jak w przypadku poprzednich eksperymentów. Uzyskano jednak bardzo dobrą korelacja między sygnałami (wartości funkcji koherencji leżą w przedziale 0.95-1).

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów receptancji i funkcji transmitancji pomiędzy określonymi punktami pomiarowymi znajdującymi się na szynie. Funkcję transmitancji należy rozumieć jako stosunek amplitudy drgań w jednym punkcie pomiarowym

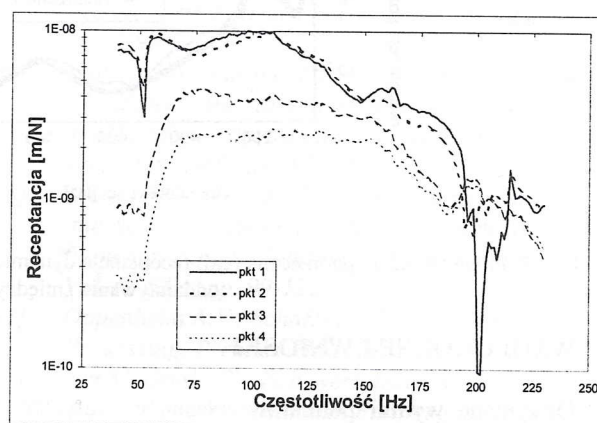
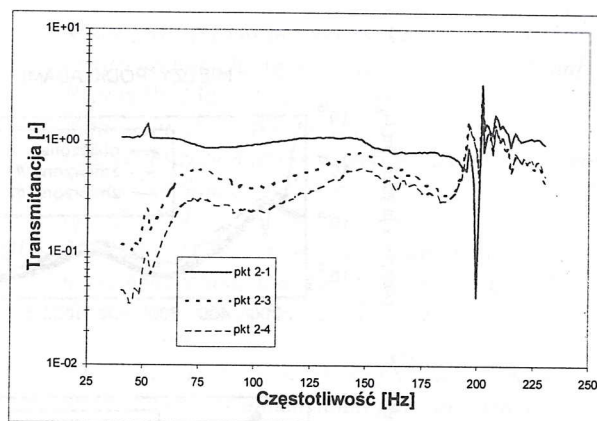
do amplitudy drgań w drugim punkcie. Punkt pomiarowy numer 1 znajdował się na szynie leżącej na pierwszym podkładzie. Punkt nr 2 w środku odległości między pierwszym a drugim podkładem Punkt nr 3 umiejscowiony był nad 5-tym podkładem, a punkt nr 6 między 5-tym a 6-tym. Drgania w obu przypadkach wymuszano w punkcie nr 2, czyli „między podkładami”.



Rys. 4.



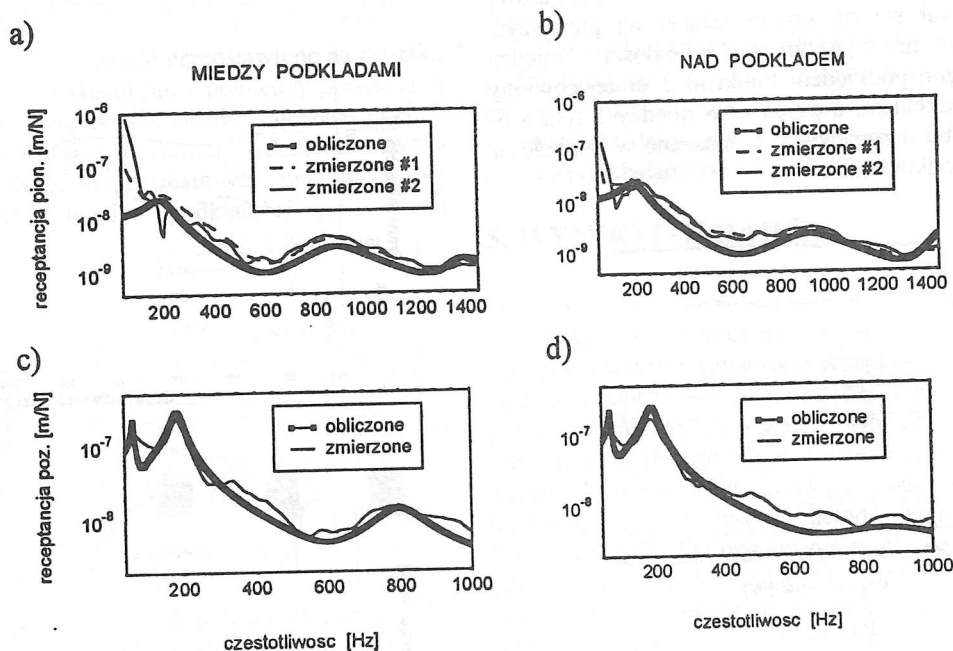
Rys. 5. Wykresy receptancji i transmitancji dla wymuszenia "młotkiem pomiarowym"



Rys. 6. Wykresy receptancji i transmitancji dla wymuszenia "wzbudnikiem drgań"

6. WYKORZYSTANIE WYNIKÓW BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH DO IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW MODELU TEORETYCZNEGO TORU KOLEJOWEGO

Dla toru „miękkiego” położonego w Lokalizacji II osiągnięto bardzo dobrą zgodność receptancji pionowych i poprzecznych uzyskanych doświadczalnie z odpowiadającymi im receptancjami otrzymanymi teoretycznie drogą obliczeń.



Rys. 7 Pionowe (a,b) i poprzeczne (c,d) receptancje dynamiczne toru „miękkiego” uzyskane drogą pomiarów i obliczeń dla położen oddziaływania „między podkładami” (a,c) i „nad podkładem” (b,d)

7. UWAGI OGÓLNE I WNIOSKI

Otrzymane wyniki pomiarów własności statycznych i dynamicznych toru kolejowego pozwalają przede wszystkim na dokonywanie wstępnych klasyfikacji torów na statycznie bardziej „twarde” lub „miękkie” oraz dynamicznie mniej lub bardziej wrażliwe na możliwość powstawania rezonansów wskutek oddziaływania z pojazdami szynowymi jadącymi z różnymi prędkościami. Taka klasyfikacja staje się obecnie szczególnie ważna w dobie stałego wzrostu prędkości podróży pociągów pasażerskich i towarowych oraz stopniowego zwiększania dopuszczalnych obciążeń osi zestawów kołowych wagonów i lokomotyw. Drugim niemniej istotnym celem przeprowadzanych badań doświadczalnych było uzyskanie szerokiego zakresu danych niezbędnych do dokonywania identyfikacji parametrów liczbowych teoretycznych modeli toru kolejowego wykorzystywanych do numerycznej symulacji dynamicznego oddziaływania pojazdu szynowego z torem w zakresie częstości, w którym obserwowane są niekorzystne bądź nawet niebezpieczne zjawiska prowadzące do wspomnianego powyżej przedwczesnego zużywania się i powstawania uszkodzeń toru i elementów jezdnych pojazdów oraz generacji uciążliwego hałasu. Uzyskiwanie w ten sposób wiarygodnych do zastosowań technicznych modeli teoretycznych toru kolejowego daje możliwość dokładniejszego prognozowania trwałości i zapasu bezpieczeństwa odpowiedzialnych elementów układów jezdnych pojazdów i szyn kolejowych, jak również efektywniejszego komputerowego wspomaganie procesu

konstruowania taboru i torów kolejowych. Należy przy tym podkreślić, iż opisywane tego typu podejście stanowi obecnie powszechnie stosowany standard przy eksploatacji i budowie układów pojazd szynowy - tor w przypadku większości nowoczesnych kolei na świecie. Wyniki symulacji dynamicznego oddziaływania różnego rodzaju układów jezdnych pojazdów szynowych ze zidentyfikowanymi przy użyciu przedstawionej techniki doświadczalnej modelami toru kolejowego potwierdziły również dla torów polskich obserwowaną w innych krajach tendencję do budowania torów stosunkowo miękkich i wytrzymałych, przy których składowe dynamiczne siły kontaktowych i poślizgów powstających między kołami jezdnych pojazdów a szynami są stosunkowo niewielkie zapewniając jednocześnie dostateczną trwałość toru - szczególnie dla przewozów towarowych przy dużych obciążeniach osi. Te dwa pozornie przeciwstawne kryteria można realizować poprzez budowanie torów na twardych i wytrzymałych nasypach i podsypkach oraz stosując możliwie miękkie i pochłaniające energię drgań przekładki między podkładami a szynami, co można uznać za praktyczną wskazówkę dla budowniczych i eksploatorów torów kolejowych w Polsce. Wówczas otrzymywane drogą pomiarów receptancje dynamiczne powinny charakteryzować się stosunkowo płaskimi przebiegami o małych „pikach” stref możliwych rezonansów wykazując jednocześnie możliwe niewielkie różnice własności dynamicznych w dwóch skrajnych chwilowych położeniach oddziaływania z pojazdem szynowym, tj. „nad podkładem” i „między podkładami”.

8. LITERATURA

- [1] Kisilowski J., Knothe K.: *Advanced Railway Vehicle System Dynamics*, WNT, Warsaw 1991.
- [2] Popp K., Schiehlen W.: *Fahrzeugdynamik*, Teubner B. G. (ed.), Stuttgart, 1993.
- [3] Popp K., Kruse H., Kaiser I.: *Vehicle-track dynamics in the mid-frequency range*, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 31, No. 5-6, 1999, pp.423-464.
- [4] Bogacz R., Meinke P., Popp K.: *Zur Modellierung der höherfrequenten Radsatz/Gleisdynamik*, Hestra Verlag: *Report on the "Tagung Systemdynamik der Eisenbahn"*, 13-14 Oct. 1994 in Henningsdorf, Germany, pp. 45-55, 1994.
- [5] Ripke, B.: *Anpassung der Modellparameter eines Gleismodells an gemessene Gleisrezeptanzen*, *ILR-Mitt.* 274, Institut für Luft- und Raumfahrt, 1992.
- [6] Oscarsson J., Dahlberg T.: *Dynamic train/track/ballast interaction - computer models and full-scale experiments*, *Vehicle System Dynamics*, Supplement 28, 1998. (pp.73-84)
- [7] Meinders T.: *Gleismodelle zur Simulation von mittelfrequenten Rad-Schiene-Problemen*, *Praca dypl. DIPL-64*, Institut B für Mechanik, Universität Stuttgart, 1996.
- [8] Fingberg U., Popp K.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Schallabstrahlverhalten von Schienenrädern*, *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Final Report Po 136/5-2*, August 1991.
- [9] Remington P. J.: *Wheel/rail noise – Part I: Characterization of the wheel-rail dynamic system*, *Journal of Sound and Vibration*, 46 (3), 1976, pp. 359-379.
- [10] Thompson D. J.: *Theoretical modelling of wheel-rail noise generation*, *Journal of Rail and Rapid Transit, Proc. Instn. Mech. Engrs., (ImechE)* 1991, Vol. 205, pp. 137-149.
- [11] Krzyżyński T.: *On dynamics of a railway track modeled as two-dimensional periodic structure*, *Proc. 4th Engineering Foundation Conference on Vehicle-Infrastructure Interaction*, San Diego, USA, June 1996.
- [12] Szolc T.: *Simulation of bending-torsional-lateral vibrations of the railway wheelset-track system in the medium frequency range*, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 30, 6, 1998, pp. 473-508.
- [13] Szolc T.: *Simulation of dynamic interaction between the railway bogie and the track in the medium frequency range*, *Multibody System Dynamics*, Vol. 6, 2001, pp. 99-122.
- [14] Oppenheim A.V., Schaffer R.W.: *Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, 1975.
- [15] von Madeyski, T.: *Fahrwerkstechnik – im Zusammenwirken mit dem Fahrweg und dem Fahrzeugkasten*, *ETR*, 48, 1999, H. 9. (pp. 523-532)