

Badania dynamiczne toru kolejowego

Marek Krużyński, Ewelina Kwiatkowska, Jarosław Zwolski

Opracowanie obejmuje analizę wyników badań eksperymentalnych drgań podtorza kolejowego, wywołanych obciążeniem dynamicznym. Przeprowadzone badania wykonano z wykorzystaniem prototypowej metody badawczej pomiarów przyspieszeń pionowych wywołanych przez generator drgań i przekazywanych przez nawierzchnię kolejową na podtorze kolejowe. Badania obejmowały nawierzchnie kolejowe zbudowane z podkładów drewnianych, strunobetonowych i strunobetonowych z wibroizolacją.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 22.10.2012

data akceptacji do druku: 15.11.2012



dr hab. inż.
Marek Krużyński
prof. nadzw.
Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego,
Zakład Infrastruktury
Transportu Szynowego
marek.kruzynski@pwr.wroc.pl



mgr inż.
Ewelina Kwiatkowska
Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego,
Zakład Infrastruktury
Transportu Szynowego
ewelina.kwiatkowska@pwr.wroc.pl



dr inż. Jarosław Zwolski
Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego,
Zakład Infrastruktury
Transportu Szynowego
jaroslaw.zwolski@pwr.wroc.pl

Powszechne wprowadzenie do eksploatacji podkładów betonowych w miejsce drewnianych niesie ze sobą pewne ujemne zjawiska między innymi takie jak przeciążenia dynamiczne i zwiększone deformacje podtorza. Przyczyna tego zjawiska jest taka, że podkłady betonowe mają charakterystykę sprężysto-kruchą podczas gdy drewniane są bardziej sprężysto-plastyczne i posiadają znacznie mniejszą twardość. Dzięki temu podkłady drewniane lepiej tłumią drgania, w większym stopniu pochłaniają energię przekazywaną z kół pojazdów na podsypkę i podtorze. Zbliżenie charakterystyk dynamicznych podkładów betonowych do drewnianych można osiągnąć stosując warstwy wibroizolacyjne między podkładami a podsypką uzyskując lepsze tłumienie drgań, mniejsze obciążenia dynamiczne podsypki i ochronę przed przeciążeniami dynamicznymi podtorza.

Przeprowadzone badania mają na celu opracowanie metody badawczej pozwalającej na identyfikację obciążeń dynamicznych przekazywanych przez nawierzchnie kolejową na podtorze. Badaniom poddano nawierzchnię kolejową zbudowaną z podkładów strunobetonowych, drewnianych i strunobetonowych z wibroizolacją.

Teżą prowadzonych badań jest wykazanie skuteczności stosowania wibroizolacji na spodniej powierzchni strunobetonowych podkładów kolejowych w celu zmniejszenie obciążeń dynamicznych przekazywanych przez pojazd szynowy na podkład i podtorze kolejowe. Zastosowanie sprężystej warstwy izolacyjnej na dolnej części strunobetonowego

wego podkładu kolejowego ma na celu zbliżenie parametrów technicznych podkładu strunobetonowego do podkładu drewnianego. Najwyższą skuteczność stosowania wibroizolacji podkładów strunobetonowych w celu ochrony podtorza kolejowego jest pożądana szczególnie na liniach przystosowanych do prędkości powyżej 150 km/h.

Zakres badań

Badania cech dynamicznych podtorza i nawierzchni kolejowej przeprowadzono na torze kolejowym o nawierzchni kolejowej typu klasycznego. Zakres prac objął podanie analizie trzech typów nawierzchni kolejowej zbudowanej z szyn typu 60 E1, przytwierdzenia szyn typu K i SB do podkładów, pokładów drewnianych, strunobetonowych typu PS 94 i strunobetonowych PS 94 z wibroizolacją typu CDM-USP-I-10b. Badania przeprowadzono we współpracy z Instytutem Kolejnictwa w Warszawie na Torze Doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Bychowie koło Żmigrodu.

Miejsce przeprowadzania badań zostało wytypowane ze względu na specyfikę metody badawczej. Metoda badawcza wymagała, aby na odcinakach pomiarowych występowały porównywalne i niezmiennie parametry gruntowo-wodne.

Badania były prowadzone z wykorzystaniem urządzenia do wzbudzania drgań ustawionego na torze kolejowym. Czujniki pomiarowe umieszczono w oknach między podkładami, stacja rejestrująca znajdowała się 2 metry od stanowiska badawczego. Ze

względu na przedstawioną budowę stanowiska badawczego i metody badawczej nie było możliwe przeprowadzanie badań na eksploatowanej linii kolejowej, ponieważ uniemożliwiają to zmiennie warunki gruntowo-wodne i eksploatacja linii kolejowych przez pociągi osobowe i towarowe.

Metoda badawcza

Opracowana innowacyjna metoda badawcza obciążeń dynamicznych przekazywanych przez konstrukcję nawierzchni kolejowej na podtorze kolejowe wykorzystuje zestaw pomiarowy zbudowany z: wzbudnika bezwładnościowego rotacyjnego, osi z kołami jezdny, siłomierzy pałkowych, czujników przyspieszeń, obudowy do czujników przyspieszeń zainstalowanej na podstawie osadzonej w górnej części warstwy podtorza oraz falownika.

Wzbudnik bezwładnościowy rotacyjny został wykorzystywany jako źródło wymuszenia drgań nawierzchni kolejowej symulujące przejazd pojazdu szynowego i obciążeń dynamicznych nawierzchni kolejowej. Wzbudnik jest prototypowym urządzeniem zaprojektowanym i zbudowanym przez Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji we współpracy z Instytutem Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej [1].

Budowa wzbudnika bezwładnościowego rotacyjnego rys. 1: wzbudnik drgań z silnikiem firmy Stöber o mocy 1.1 kW, rama wsporcza z 2 ceownikami 120, 3 pałkowe czujniki siły, 3 klamry zaciskowe służące do przymocowania ramy i siłomierzy do szyn,



1. Wzbudnik bezwładnościowy rotacyjny wraz z siłownikami pałkowymi



2. Falownik

2 osie z kołami do transportu zestawu po szynach, falownik do sterowania silnikiem wzbudnika rys. 2, generator trójfazowego prądu przemiennego o mocy 4 kW.

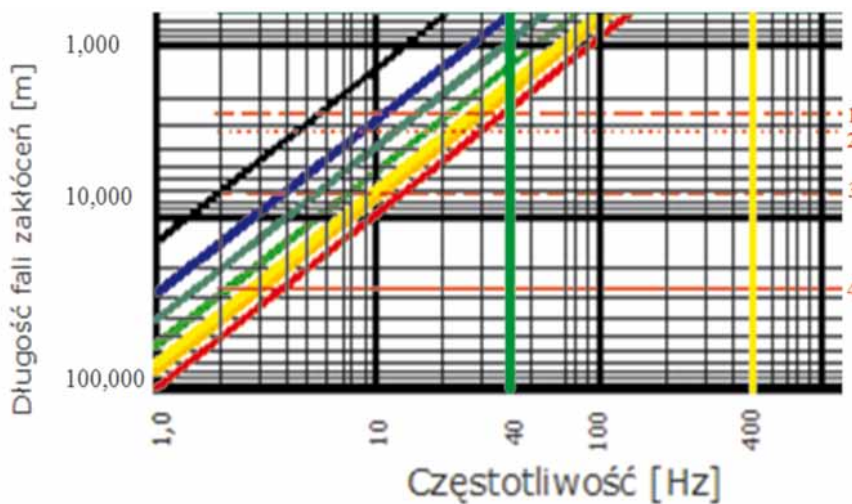
Siła wzbudzająca we wzbudniku rotacyjnym powstaje na skutek obracania się 2 mas zainstalowanych mimośrodowo naprzeciw siebie w jednej płaszczyźnie, a ich ruch jest wzajemnie sprzężony. Położenie mas jest skorelowane w ten sposób, aby składowe poziome siły odśrodkowe bezwładności, generowanych przez każdą z tych mas, miały taką samą wartość i przeciwne zwroty w wyniku czego składowe te niwelują się. W konstrukcji opisywanego wzbudnika przewidziano możliwość zmiany położenia mas aktywnych co umożliwia sterowanie kierunkiem siły wypadkowej. Sterowanie częstotliwością obrotową wirnika silnika jest możliwe dzięki zastosowaniu programowalnego cyfrowego falownika, przez który silnik wzbudnika jest zasilany w energię elektryczną. Falownik umożliwia zmianę częstotliwości obrotowej silnika z rozdzielczością 1 obr./min.

Obsługa falownika jest możliwa na dwa sposoby: manualnie lub za pomocą komputera wyposażonego w port RS232 (COM), za pośrednictwem specjalistycznego oprogramowania dostarczonego przez producenta. W niniejszej pracy przyjęto, że sterowanie będzie się odbywać w programie MANABRIS za pośrednictwem modułu komunikacji. Falownik jest zasilany trójfazowym prądem przemiennym z generatora o mocy 4 kW. Zestaw pomiarowy umożliwia określenie amplitudy siły wymuszającej, w zależności od częstotliwości obrotowej mas, oraz funkcji pozwalającej przeliczać ustawienia częstotliwości wzbudzania (w [Hz]) w programie komputerowym na częstotliwość obrotową wirnika silnika [1]

Badania źródła wzbudzania drgań i zakresów częstotliwości w odniesieniu do prędkości jazdy pojazdu szynowego

Prezentowane poniżej wyniki analizy prezentują źródła wzbudzania drgań i zakresy częstotliwości występujące na liniach kolejowych. Przedstawione wyniki studiów literaturowych obejmują analizę sześciu prędkości jazdy pociągów: 50 km/h, 100 km/h, 150 km/h, 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h i źródeł generowanych przez nie drgań. Prowadzona analiza ma na celu wskazanie zakresów częstotliwości drgań charakterystycznych dla linii kolejowych w tym również linii wysokich prędkości powyżej 150 km/h. [2].

Generowane drgania przez jadący pociąg, mogą mieć różną częstotliwość, w zależności od źródła wzbudzania. Na rys. 3 przedstawiono cztery źródła fal generowanych przez jadący pociąg. Długość fali wynikająca ze zróżnicowanego rozstawu sił obciążających



Oznaczenia źródła wzbudzenia:
 1 - rozstaw osi wózków 2,5 m
 2 - rozstaw osi wózków 3,2 m
 3 - rozstaw osi wózków 7,5 m
 4 - rozstaw osi w wagonie 26,4 m

Oznaczenia prędkości jazdy:
 — 50 km/h
 — 100 km/h
 — 150 km/h
 — 200 km/h
 — 250 km/h
 — 300 km/h
 — 350 km/h

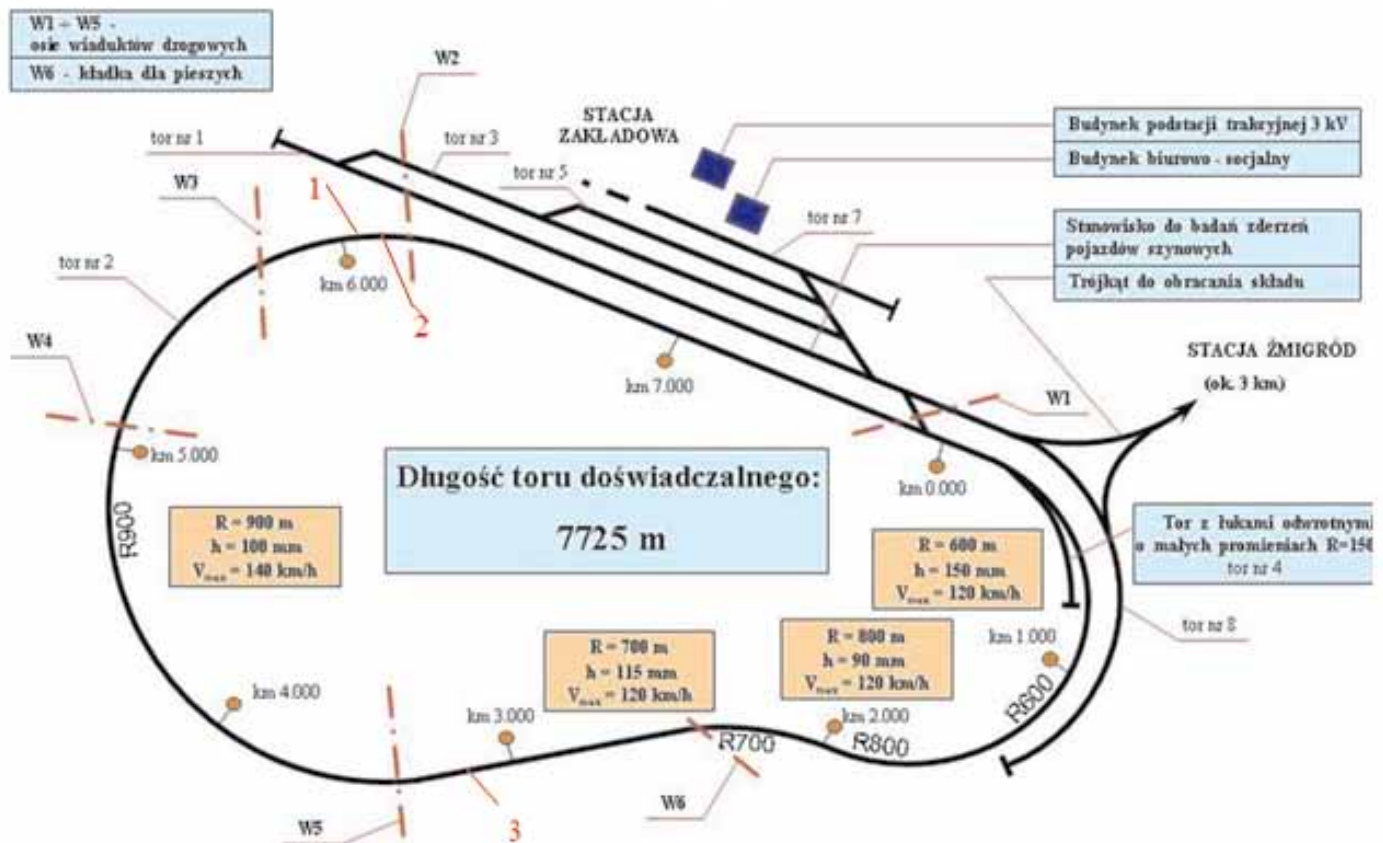
3. Zależność między prędkością jazdy, rozstawem sił obciążających tor (długością fali) i częstotliwością. Fale generowane przez wagon, wózek i pojazdy szynowe [2][3]

tor ulega zmianie ze względu na rodzaj badanego źródła. Analizie poddano pojazdy szynowe o rozstawie osi 26,4 m, rozstawie wózków na długości 7,5 m i dwa pojazdy o rozstawie osi w wózkach 3,2 m i 2,5 m. [3]

Minimalna długość fali wynosząca 2,5 m jest generowana przez pojazd o rozstawie osi 2,5 m. Najniższe częstotliwości generuje wagon – 26,4 m jednocześnie tworząc najdłuższą falę. Dla każdego z analizowanych źródeł fal najwyższe częstotliwości generuje pociąg jadący z prędkością 350 km/h. Zakres niskich częstotliwości od 1 Hz do 40 Hz drgań generowanych przez badane pojazdy szynowe wykazuje, że badany przedział drgań jest charakterystyczny dla wszystkich analizowanych prędkości. Należy zwrócić uwagę na to, że dla prędkości 150 km/h i rozstawu osi pojazdu 2,5 m zakres generowanych częstotliwości wynosi 16,67 Hz, a przy rozstawie osi pojazdów 3,2 m jest niższy i wynosi 13 Hz. Dla prędkości 350 km/h pojazd z wózkami w odległości 7,5 m generuje drgania z zakresu 13 Hz, podczas gdy pojazd o rozstawie osi 2,5 m generuje drgania na poziomie 39 Hz [4]



TOR DOŚWIADCZALNY INSTYTUTU KOLEJNICTWA SCHEMAT UKŁADU TOROWEGO



4. Schemat budowy Toru Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie. Stanowiska badawcze oznaczono czerwonymi liczbami 1, 2, 3.
 1 - podkłady strunobetonowe, 2 - podkłady strunobetonowe z wibroizolacją, 3 - podkłady drewniane

Budowa stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze zbudowano w maju 2012 roku na Torze Doświadczalnym IK w Żmigrodzie na trzech odcinkach toru kolejowego. Badania przeprowadzono na klasycznym torze kolejowym zbudowanym z podkładów drewnianych, strunobetonowych i strunobetonowych z wibroizolacją. W kilometrze:

- 6+020 przeprowadzono badania na podkładach strunobetonowych oznaczanych jako 1,
- 6+120 na podkładach strunobetonowych z wibroizolacją oznaczanych jako 2,
- 3+300 na podkładach drewnianych oznaczonych jako 3 przedstawionych na rys. 4.

Badania na przeprowadzono na łuku i na krzywej przejściowej w odcinkach oznaczonych na rys. 4 jako 1 i 2, gdzie nachylenie poprzeczne toru w stosunku do poziomu wynosi odpowiednio 4 stopnie i 2 stopnie na krzywej przejściowej w miejscu lokalizacji wzbudnika i czujników pomiarowych. Przyjęto, że nachylenie to jest tak małe, że nie ma wpływu na wyniki pomiarów i można je pominąć oraz przyjąć, że warunki prowadzenia badań były identyczne na prostej, łuku i krzywej przejściowej.

Stanowiska badawcze na trzech badanych odcinkach toru kolejowego zbudowane zostały zgodnie z przyjętym schematem, przedstawionym na przykładzie odcinka zbudowanego z podkładów stru-

nobetonowych z wibroizolacją na spodniej powierzchni.

Schemat budowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 5. Odcinek toru badanego składał się z dwunastu podkładów strunobetonowych z wibroizolacją, przytwierdzeń szyn do podkładów typu SB, szyn S60 i podsypki z tłuczniwa bazaltowego o grubości warstwy 30 cm. Górna warstwę podtorza stanowią: kliniec 10 cm i niesort granitowy 20 cm.

W okienku między podkładami nr 5 i 6 zamontowano czujniki pomiarowe przyspieszeń oznaczone na schemacie rys. 5 jako 1, 2, 3, 4. Montaż czujników rozpoczęto od wybrania 15 cm warstwy podsypki tłuczniowej znajdującej się między podkładami, tak aby nie naruszyć konstrukcji podtorza kolejowego. Tak przygotowane okienko między podkładami umożliwilo zabudowanie podstawy dla czujników przyspieszeń. Podstawy dla czujników składały się z pręta stalowego Φ 20 mm o długości 50 cm i nakręcaną płytki umożliwiającą przykręcenie czujnika przyspieszeń w układzie pionowym. Cztery podstawy czujników zostały wbite w podtorze kolejowe w osi okienka między podkładami nr 5 i 6 w odległości co 40 cm rys. 6 i rys 7.

Podkłady strunobetonowe z wibroizolacją wykorzystane w czasie badań zostały wytworzone w ramach nawiązanego porozumienia z firmą Trac Tec (dawniej Wytwórnia Podkładów strunobetonowych w

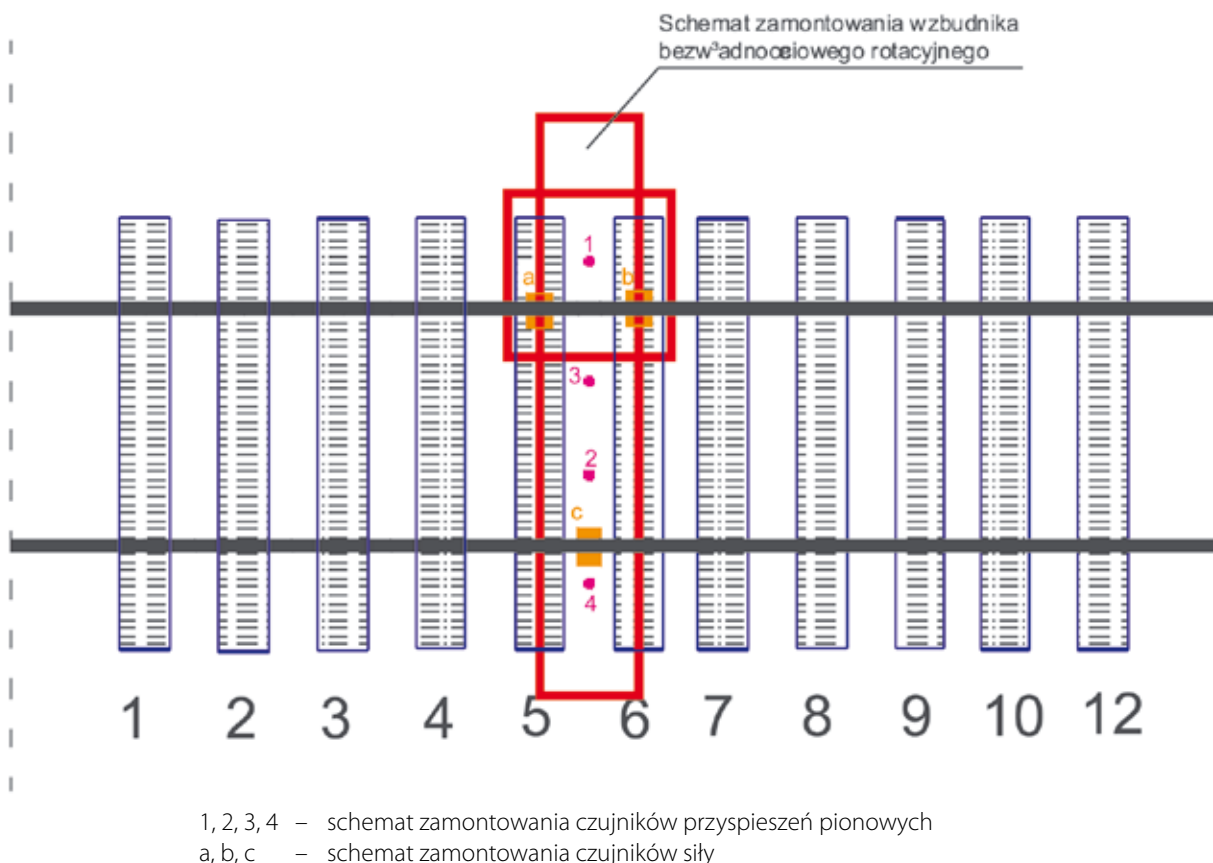
Goczałkowie) w ramach którego firma Trac Tec nieodpłatnie przekazała na potrzeby badań 12 sztuk podkładów strunobetonowych z wibroizolacją. Podkłady zostały wytworzone w maju 2012 roku w zakładzie produkcyjnym Trac Tec w Goczałkowie. Wykorzystana w badanych podkładach strunobetonowych warstwa wibroizolacji została przekazana również nieodpłatnie przez Firmę CDM i zamontowana na 12 pokładach strunobetonowych. Były to panele CDM-USP-I-10b wykonane z granulatu gumowego spajanego żywicą CDM-RR rys. 8 wraz z warstwą łączącą typu CDM-b zapewniającą przyczepność panelu do podkładu o parametrach technicznych przedstawionych w tabeli 1.

Tab.1: Właściwości warstwy wibroizalacyjnej

Własność	
Grubość bez / z warstwą łączącą	10 mm / 10,2 mm*
Ciężar	9,9 kg/m ²
Wytrzymałość na rozciąganie	> 0,9 MPa

Porównanie wyników badań dla podkładów drewnianych, strunobetonowych i strunobetonowych z wibroizolacją

Poniżej przedstawiono porównanie uśrednionych wartości akceleracji drgań górnej



5. Schemat stanowiska badawczego na podkładach strunobetonowych z wibroizolacją



6. Stanowisko badawcze na odcinku toru kolejowego zbudowanego z podkładów strunobetonowych z wibroizolacją



7. Czujnik przyspieszeń pionowych na poziomie wibroizolacji podkładu strunobetonowego



8. Podkład strunobetonowy z wibroizolacją typu PS94 147

strefy podtorza dla sygnałów pomierzonych za pomocą czujników nr: 1, 2, 3, 4 (po uśrednieniu dla wszystkich powtórzeń eksperymentu) na konstrukcji toru z podkładami drewnianymi, strunobetonowymi i strunobetonowymi z wibroizolacją rys. 10. Przeprowadzona analiza zakresu częstotliwości drgań generowanych przez jadący pociąg z prędkością od 140 km/h do 160 km/h o rozstawie osi w wózkach: 2,5 m i 3,2 m wykazuje że generowane drgania znajdują się w zakresie od 12 Hz do 19 Hz. Pozostałe zakresy częstotliwości pominięto z powodu deformacji sygnału przez zarejestrowane szumy. Zakres powyżej 23 Hz został pominięty ponieważ wzbudnik generował drgania w zakresie do 23 Hz. Porównanie uśrednionych wartości akceleracji dla sygnałów pomierzonych za pomocą wszystkich czujników, po uśrednieniu dla wszystkich powtórzeń eksperymentu, na konstrukcji toru z trzema typami podkładów kolejowych opracowano dla pięciu powtórzeń eksperymentu. Zakres od 17 Hz do 19 Hz w porównaniu z pozostałymi zakresami najdokładniej obrazuje odczyt z uśrednionych pięciu prób pomiarowych. W analizowanym zakresie najniższy poziom akceleracji przedstawiają podkłady strunobetonowe z wibroizolacją.

W zakresie od 17 Hz do 18 Hz poziom akceleracji podkładów strunobetonowych z wibroizolacją i drewnianych jest podobny. W zakresie od 18 Hz do 19 Hz poziom akceleracji dla podkładów strunobetonowych z wibroizolacją jest niższy niż dla podkładów drewnianych i strunobetonowych rys 9.

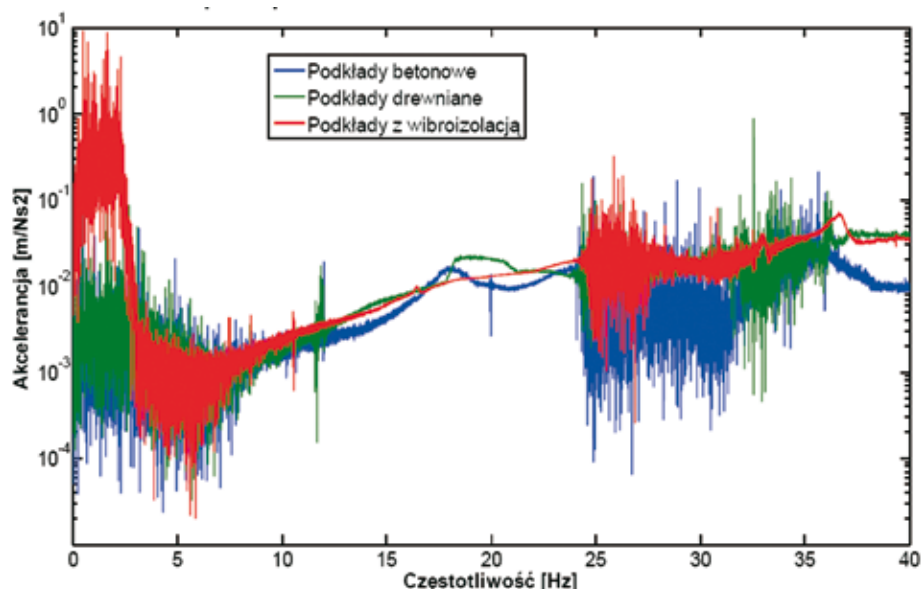
Porównanie uśrednionych wartości koherencji dla sygnałów pomierzonych za pomocą wszystkich czujników (po uśrednieniu dla wszystkich powtórzeń eksperymentu) na konstrukcji toru z podkładów drewnianych i strunobetonowych i strunobetonowych z wibroizolacją obrazuje, że w zakresie 17 Hz do 19 Hz, gdzie najniższy poziom akceleracji wykazuje tor kolejowy zbudowany z podkładów strunobetonowych z wibroizolacją, koherencja wynosi 1 (rys.10).

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazują skuteczność stosowania wibroizolacji podkładów strunobetonowych w celu ochrony podtorza kolejowego. W analizowanym zakresie częstotliwości drgań torowiska od 16 Hz do 18 Hz, podkłady strunobetonowe z wibroizolacją wykazują skuteczność stosowania ich w celu ochrony przed przeciążeniami dynamicznymi podtorza kolejowego. Badania wykazują możliwość uzyskania zbliżonych paramet-

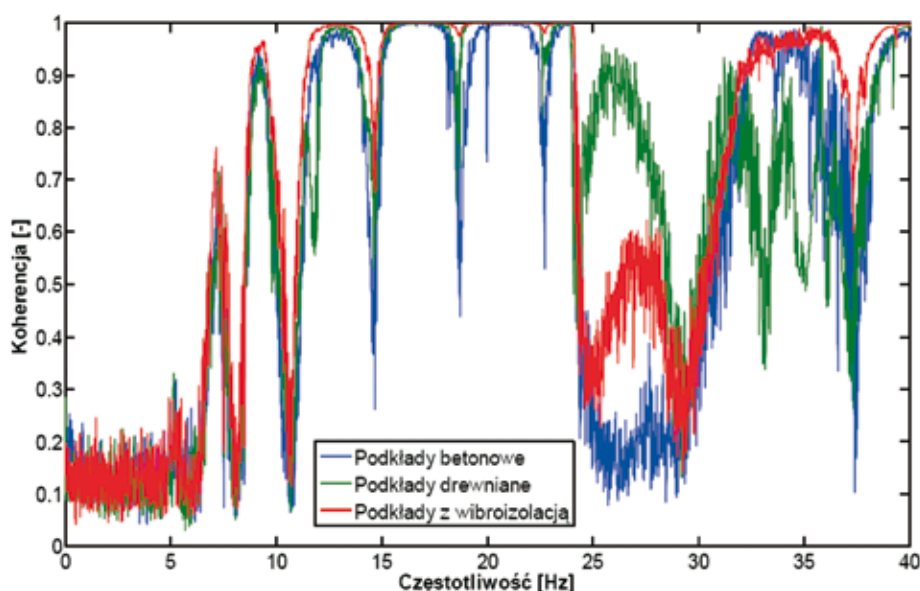
trów tłumiących podkładów strunobetonowych do drewnianych przez zastosowanie wibroizolacji. Zastosowanie warstwy wibroizolacji na spodniej powierzchni podkładów strunobetonowych może nawet zwiększyć właściwości tłumiące podkładów strunobetonowych w porównaniu do podkładów drewnianych.

Podsumowanie

Przeprowadzone prototypowe badania terenowe obciążen dynamicznych podtorza kolejowego z wykorzystaniem wzbudnika drgań pionowych umożliwiają symulację obciążen dynamicznych toru kolejowego. Zastosowane urządzenie badawcze umożliwiło wygenerowanie zakresu drgań charakterystycznego dla przyjętego do analizy układu pojazdu szynowego o rozstawie osi w wózkach wynoszącym 2,5 m i 3,2 m. Wzbudnik drgań umożliwił badania częstotliwościowe w analizowanym zakresie drgań od 16 Hz do 18 Hz. Przyjęty zakres częstotliwości jest charakterystyczny dla prędkości jazdy 140 km/h i 160 km/h, typowych dla polskich kolei InterCity. Przeprowadzone badania w przyjętym zakresie częstotliwości wykazały pozytywne oddziaływanie zasto-



9. Porównanie uśrednionych wartości akceleracji dla sygnałów pomierzonych za pomocą wszystkich czujników (po uśrednieniu dla wszystkich powtórzeń eksperymentu) na konstrukcji toru z podkładami drewnianymi, strunobetonowymi i strunobetonowymi z wibroizolacją



10. Porównanie uśrednionych wartości koherencji dla sygnałów pomierzonych za pomocą wszystkich czujników

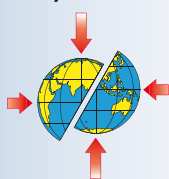
sowanej wibroizolacji firmy CDM o grubości 10 mm zamontowanej na podkładach kolejowych wyprodukowanych w przedsiębiorstwie Trac Tec w zakładzie produkcyjnym w Goczałkowie. Następnym etapem prac będzie przeprowadzenie drugiej tury badań na analizowanych odcinkach Toru Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie z wykorzystaniem wzbudnika drgań, po ustabilizowaniu się nawierzchni wymienionymi podkładami. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Zwolski J.: Autoreferat rozprawy doktorskiej pt. "Wyznaczenie cech dynamicznych konstrukcji mostowych za pomocą wzbudników drgań", Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Wrocławska.
- [2] Müller-Borutta F., Breitsamter N.: Elastische Elemente im Gleis verringern die Fahrwegbeanspruchung, www.imb-dynamik.de
- [3] Krużyński M., Kwiatkowska E.: Ochrona torowiska w efekcie stosowania wibroizolacji podkładów kolejowych"
- [4] Krużyński M., Kwiatkowska E., Gisterek I.: Możliwości przystosowania podsypkowej nawierzchni kolejowej do eksploatacji z dużymi prędkościami"

Patronat medialny Przeglądu Komunikacyjnego

Instytut Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej



**XXXVI Zimowa Szkoła Mechaniki
Górotworu i Geoinżynierii**

Kudowa Zdrój, marzec 2013

www.zsmgig.pwr.wroc.pl