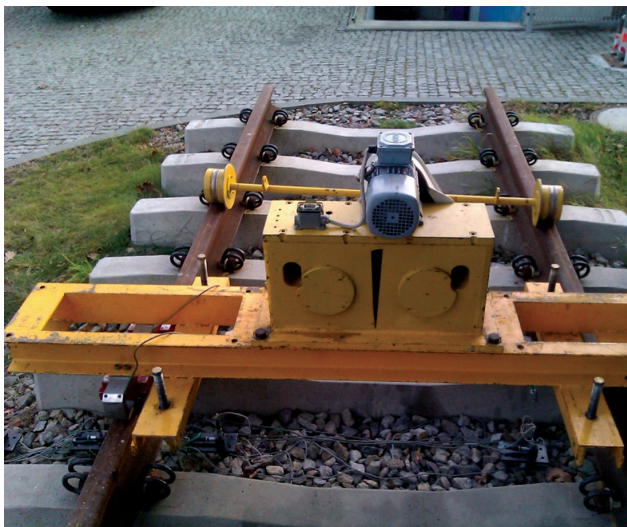


Ewelina Kwiatkowska

Innowacyjne badania podtorza kolejowego

Badania podtorza kolejowego na eksploatowanych liniach kolejowych stanowi ważne zagadnienie na etapie projektowania i modernizacji dróg szynowych. Metody badań podtorza kolejowego dzielimy na geotechniczne i geofizyczne. Najczęściej badania podtorza kolejowego mają szerszy zakres i obejmują kilka metod badawczych: ocenę wizualną podtorza, badania polowe, laboratoryjne[1]. Wskazane badania podtorza kolejowego wykonuje się poprzez demontaż nawierzchni kolejowej wydłużając czas prowadzonych badań i zwiększa koszty prowadzonej inwestycji. Demontaż nawierzchni kolejowej przy prowadzeniu prac badawczych podtorza kolejowego można znacznie zmniejszyć między innymi przez zastosowanie innowacyjnej metody badawczej obciążeń podtorza. Prezentowana innowacyjna metoda badawcza została opracowana w zespole badawczym: prof. Marek Krużyński, Ewelina Kwiatkowska i dr Jarosław Zwolski na Politechnice Wrocławskiej Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego.

Opracowana metoda ma na celu stworzenie nowej techniki pomiarów podtorza, pozwalającej na projektowanie podtorza kolejowego dostosowanego do obciążeń dynamicznych w zależności od zastosowanego typu nawierzchni kolejowej i projektowanej prędkości jazdy. Projektowanie parametrów technicznych podtorza kolejowego na podstawie metod geotechnicznych, geofizycznych oraz analizy dynamicznej zastosowanej nawierzchni pozwoli na projektowanie i budowanie linii kolejowych o dłuższych okresach eksploatacyjnych, wydłużając okresy międzynaprawcze.



Rys. 1. Zestaw pomiarowy w testach laboratoryjnych

Opis metody badawczej

Opracowanie metody badawczej zostało podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap prac obejmował testy laboratoryjne na odcinku toru kolejowego przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, w drugim etapie przeprowadzono badania na Torze Doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Bychowo koło Żmigrodu.

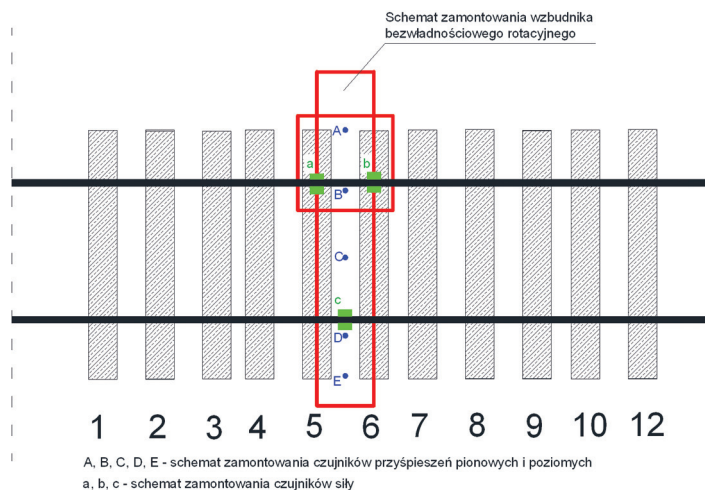
Zastosowana metoda badawcza obciążeń dynamicznych przekazywanych przez konstrukcję nawierzchni kolejowej na podtorze kolejowe realizuje zestaw pomiarowy zbudowany z:

- wzbudnika bezwładnościowego rotacyjnego,
- czujników przyspieszeń,
- siłomierzy pałkowych,
- falownika,
- osi z kołami jezdnyymi,
- podstawy z obudową do czujników przyspieszeń.

Wzbudnik bezwładnościowy rotacyjny wykorzystano jako źródło wymuszenia drgań nawierzchni kolejowej symulujące przejazd pojazdu szynowego. Konstrukcja wzbudnika została zaprojektowana i zbudowana przez Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji we współpracy z Instytutem Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej [2]. Konstrukcja wzbudnika umożliwia



Rys. 2. Falownik



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego zrealizowanego w badaniach wstępnych z podkładami strunobetonowymi

określenie amplitud siły wymuszającej, w zależności od częstości obrotowej masy.

Falownik pozwala przeliczać ustawienia częstotliwości (w [Hz]) w programie komputerowym na częstość obrotową wirnika silnika (rys. 2). W okienku między podkładami zamontowano w warstwie podsypki czujniki przyspieszeń rejestrujące drgania podtorza.

Testy laboratoryjne

Pierwszy etap badań został przeprowadzony w Laboratorium Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej na odcinku toru kolejowego w listopadzie 2011 r. Badania miały na celu sprawdzenie prototypowej techniki pomiarowej z wykorzystaniem wzbudnika drgań symulującego przejazd pojazdu szynowego.

Analizowany tor kolejowy składa się z 12 podkładów strunobetonowych PS 94 ułożonych na 10 cm warstwie tłucznia, szyna typu S60, przytwierdzenia typu SP. Obudowy do czujników przyspieszeń zamontowano w osi okienka między podkładami nr 5 i 6 (rys. 3)

W pierwszym etapie badań zastosowano pięć punktów pomiarowych – schemat ułożenia czujników umożliwił pomiary przyspieszeń pionowych i poziomych drgań przekazywanych na podtorze przez wzbudnik drgań.

Punkty pomiarowe oznaczono literami: A, B, C, D, E składające się dziesięciu czujników: pięciu pionowych i pięciu poziomych. Przykładowo w punkcie A zamontowano czujnik pionowy o numerze 6 i czujnik poziomy o numerze 3 (rys. 4). Czujniki zostały zabudowane w podtorzu badanego odcinka w osi okienka między podkładami w odległości co 40 cm (rys. 5).

Wzbudnik drgań zamontowano w okienku między podkładami nr 5 i nr 6, na stalowej ramie przymocowanej do szyn przy użyciu trzech siłomierzy pałkowych (rys. 1, rys. 5). Układ pomiarowy został podłączony do falownika, a czujniki przyspieszeń pionowe i poziome wraz z czujnikami siły do stacji rejestrującej SPIDER (rys. 6)

Wyniki testów laboratoryjnych

W pierwszym etapie pracy nad zastosowaniem innowacyjnej metody badawczej podtorza kolejowego zastosowano 10 czujników do pomiarów przyspieszeń (oznaczenie od data 1 do data 10).



Rys. 4. Schemat układu czujników pomiarowych w punktach A, B, C, D, E: numer 6, 5, 4, 10, 9 (odpowiednio data 6 – data 9) wskazują czujniki przyspieszeń pionowych, numery 3, 8, 7, 2, 1 (odpowiednio data 3 – data 1) wskazują czujniki przyspieszeń poziomych



Rys. 5. Czujniki przyspieszeń pionowe i poziome w okienku między podkładami



Rys. 6. Stacja rejestrująca SPIDER

Pomiary wykonano w pięciu próbach w zakresie częstotliwości drgań generowanych przez wzbudnik od 5 Hz do 25 Hz.

W celu sprawdzania odpowiedzi częstotliwościowej układu pomiarowego przeprowadzono analizę funkcji odpowiedzi częstotliwościowej dla dziesięciu czujników. Wynik uśrednianej pracy układu z pięciu przeprowadzonych prób przedstawiono na rysunku 7.

Wyniki pomiarów przyspieszeń pionowych przekazywanych na podtorze kolejowe, oznaczonych jako data 6, data 5, data 4, data 10, data 9, wykazują poziom w zakresie od 0,1 m/Ns² do 0,001 m/Ns². Poziom akceleracji przy czujnikach przyspieszeń oznaczonych jako data 1, data 2, data 3, data 7, data 8 w konfiguracji poziomej znajduje się w zakresie od 0,04 m/Ns² do 0,008 m/Ns².

Prezentowany wzbudnik drgań generuje zakres częstotliwości drgań w zakresie od 5 Hz do 25 Hz. Prototypowy charakter wykorzystanego wzbudnika drgań powoduje, że zakres od 5 Hz do 12 Hz charakteryzuje się dużym zaszumieniem odczytów, w związku z czym nie został poddany analizie. Częstotliwości drgań powyżej 23 Hz zostały zinterpretowane również jako szum.

Szczegółowej analizie zostały poddane wartości maksymalne i minimalne akceleracji układu. Czujnik nr 6 z rysunku 4, oznaczony jako data 6 na rysunku 7, znajdujący się w puknie pomiarowym oznaczonym jako A (rys. 3), wykazuje największą wartość akceleracji w kierunku pionowym w zakresie częstotliwości od 8 do 23 Hz. Czujnik nr 10 z rysunku 4, oznaczony jako data 10 na rysunku 7, znajdujący się w punkcie D badanego schematu, wykazuje najmniejsze wartości akceleracji w zakresie częstotliwości od 15 do 23 Hz (rys. 3), również w kierunku pionowym.

Badania testowe wykazały wpływ zastosowanego zakresu drgań generowanych przez wzbudnik w odniesieniu do analizowanego punktu pomiarowego. Wyniki funkcji odpowiedzi częstotliwościowej dla czujników nr 6 i 10 (rys. 4) wykazują konieczność w dalszym fazie badań poddania punktów oznaczonych jako A i D (rys. 3) dokładnej analizie.

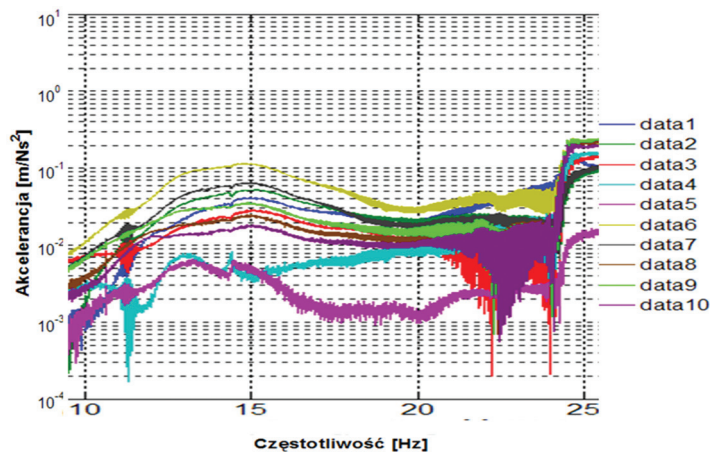
Badania na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa

W drugim etapie prac badawczych nad innowacyjną metodą badań podtorza kolejowego wykonano testy na eksploatowanym odcinku drogi szynowej na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Bychowo koło Żmigrodu. Miejsce przeprowadzania badań zostało wytypowane ze względu na doświadczalny charakter badań wymagających toru kolejowego o porównywalnych i niezmiennych parametrach gruntowo-wodnych. Tor doświadczalny Instytutu Kolejnictwa do celów prowadzonych prac został zmodernizowany przez wbudowanie podkładów strunobetonowych PS 94 z wibroizolacją typu CDM USP-I-10b. Podkłady strunobetonowe z wibroizolacją zostały nieodpłatnie przekazane przez Firmę CDM i Trac Tec.

W celu przetestowania, opracowanej w wyniku prac laboratoryjnych, metody pomiarów dynamicznych podtorza kolejowego podjęto decyzję o przeprowadzeniu badań na trzech odcinkach badawczych. Wytypowane do badań odcinki testowe znajdowały się na torze typu podsypkowego, zbudowanego z szyn typu 60 E1, przytwierzeń szyn typu K i SB, pokładów drewnianych, strunobetonowych typu PS 94 i strunobetonowych PS 94 z wibroizolacją typu CDM-USP-I-10b (rys. 8), o właściwościach przedstawionych na rysunku 9 [4].

Testy metody badawczej przeprowadzono w maju 2012 r. na trzech odcinkach badawczych znajdujących się w kilometrze:

- 6+020 o nawierzchni z podkładami strunobetonowymi, oznaczonym na rysunku 10 jako 1;
- 6+120 o nawierzchni z podkładami strunobetonowymi z wibroizolacją, oznaczonym na rysunku 10 jako 2;
- 3 +300 o nawierzchni z podkładami drewnianymi, oznaczonym na rysunku 10 jako 3.



Rys. 7. Średniona funkcja odpowiedzi częstotliwościowej dla wszystkich czujników na badanym odcinku laboratoryjnym



Rys. 8. Podkład strunobetonowy z wibroizolacją typu PS94 147 z panelem wibroizolacyjnym typu CDM -USP-I-10b

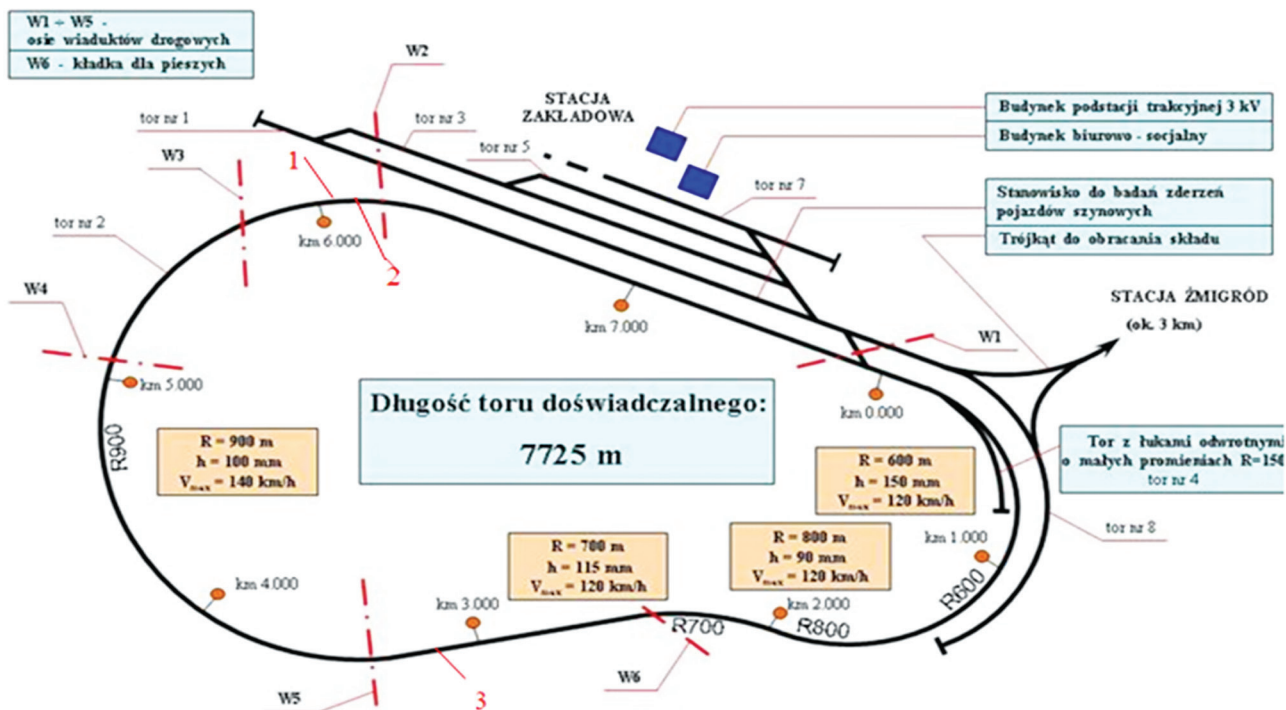
własność	
Grubość bez / z warstwą łączącą	10 mm / 10,2 mm*
Ciężar	9,9 kg/m ²
Wytrzymałość na rozciąganie	> 0,9 MPa

Rys. 9. Właściwości panelu wibroizolacyjnego CDM -USP-I-10b

Badania przeprowadzono na łuku i krzywej przejściowej, gdzie nachylenie poprzeczne toru w stosunku do poziomu wynosi odpowiednio 4° i 2° 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 takie same na prostej, łuku i krzywej przejściowej.

Stanowiska badawcze na trzech wytypowanych odcinkach toru kolejowego zbudowano zgodnie z jednym schematem badawczym. Przyjęty schemat metody badawczej zostanie omówiony na przykładzie odcinka zbudowanego z podkładów strunobetonowych z wibroizolacją na spodniej powierzchni.

Odcinek testowy składał się z: dwunastu podkładów strunobetonowych z wibroizolacją, przytwierzeń szyn do podkładów typu SB, szyn S60 i podsypki z tłuczniwa bazaltowego o grubości



Rys. 10. Schemat budowy toru doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie; stanowiska badawcze oznaczono czerwonymi liczbami: 1 - podkłady strunobetonowe, 2 - podkłady strunobetonowe z wibroizolacją, 3 - podkłady drewniane

warstwy 30 cm. Górna warstwę podtorza stanowią: kliniec 10 cm i niesort granitowy 20 cm.

Czujniki zamontowano tak, jak w badaniach laboratoryjnych. Do podstawy dla czujników składającej się z pręta stalowego $\varnothing 20$ mm, długości 50 cm, i prostokątnej płytki, przykręcono czujnik przyspieszeń w układzie pionowym. Na tym etapie prac nie przeprowadzono analizy przyspieszeń poziomych. Ze względu na wieloaspektowy charakter pomiarów przyspieszeń poziomych zostaną poddane analizie w kolejnym fazie.

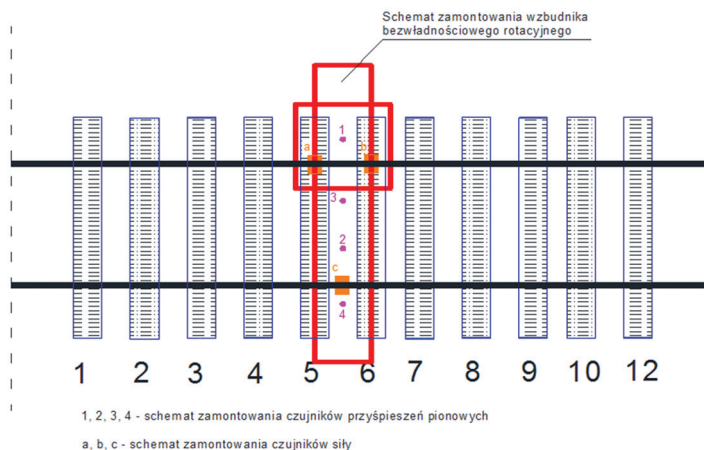
W okienku między podkładami nr 5 i 6 zamontowano czujniki pomiarowe przyspieszeń pionowych, oznaczone jako 1, 2, 3, 4 (rys. 11).

Montaż czujników rozpoczęto od wybrania 15 cm warstwy podsypki tłuczniowej znajdującej się między podkładami, tak aby nie naruszyć konstrukcji podtorza kolejowego (rys. 12). Tak przygotowane okienko między podkładami umożliwiało zabudowanie



Rys. 12. Stanowisko badawcze

podstawy czujników przyspieszeń. Cztery podstawy czujników wbito w podtorze kolejowe w osi okienka między podkładami nr 5 i 6, w odległości co 40 cm (rys. 12 i 13).



Rys. 11. Schemat stanowiska badawczego na odcinku toru zbudowanego z podkładów strunobetonowych z wibroizolacją.

Wyniki badań na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa

W drugim etapie pracy nad innowacyjną metodą badawczą podtorza kolejowego zastosowano 4 czujniki do pomiarów przyspieszeń pionowych. Pomiarów wykonano w pięciu próbach w zakresie częstotliwości drgań generowanych przez wzbudnik od 5 Hz do 25 Hz. Wyniki badań propagacji drgań w podtorzu kolejowym, generowanych przez rotacyjny wzbudnik drgań, przeprowadzone innowacyjną metodą badawczą dla podkładów drewnianych, strunobetonowych i strunobetonowych z wibroizolacją przedstawiono na rysunku 14 [3].

Zakres drgań, generowanych przez wzbudnik rotacyjny, dostosowano do zakresu generowanego przez jadący z prędkością od 140 km/h do 160 km/h pociąg o rozstawie osi wózków: 2,5 m i 3,2 m z zakresu od 12 Hz do 19 Hz [4, 5]. Pozostałe zakresy generowanych częstotliwości pominięto z powodu deformacji sygnału przez zarejestrowane szумы.

Zakres drgań wzbudnika od 17 Hz do 19 Hz generuje najniższy poziom akceleracji dla podkładów strunobetonowych 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. 14).

Wyniki badań trzech typów nawierzchni kolejowej, przeprowadzone z wykorzystaniem opracowanej metody badawczej obciążeń dynamicznych podtorza kolejowego, wykazują celowość prowadzenia dalszych prac badawczych. Przeprowadzone badania umożliwiają symulacje drgań odpowiadających obciążeniu pojazdem szynowym jadącym z prędkością do 160 km/h.

Podsumowanie

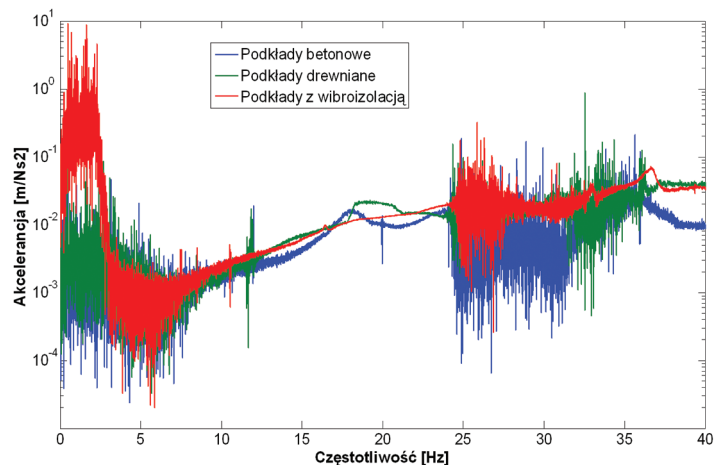
W realizowanej fazie badań wykazano, że zaprezentowana metoda badawcza pozwala na ocenę poziomu tłumienia drgań generowanych przez obciążenie dynamiczne wzbudnikiem przy zastosowaniu trzech typów podkładów kolejowych: drewnianych, strunobetonowych i strunobetonowych z wibroizolacją, pozwalając na ocenę wielkości obciążenia dynamicznego podtorza kolejowego w zależności od zastosowanej nawierzchni kolejowej na badanym odcinku toru.

Prezentowana innowacyjna metoda badawcza obciążeń dynamicznych podtorza kolejowego umożliwia analizę obciążeń, jakim poddawane jest podtorze kolejowe. Uwzględnianie obciążenia dynamicznego jest istotne ze względu na rozwój w Polsce kolei dużych prędkości, generujących kilkakrotnie większe zakresy częstotliwości drgań, niż linie kolejowe typu konwencjonalnego [5].

W dalszym etapie pracy badawczej zostanie przeprowadzona druga seria badań na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Bychowo koło Żmigrodu w celu porównania wyników po roku eksploatacji odcinków badawczych. Zostaną przeprowadzone badania obciążeń dynamicznych podtorza kolejowego, generowanych przez: rotacyjny wzbudnik drgań, pojazd szynowy i wzbudnik udarowy.



Rys. 13. Wzbudnik bezwładnościowy rotacyjny wraz z silownikami pałkowymi



Rys. 14. 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

Literatura

- [1] Skrzyński E.: *Podtorze kolejowe*
- [2] Zwolski J.: *Wyznaczenie cech dynamicznych konstrukcji mostowych za pomocą wzbudników drgań (autoreferat rozprawy doktorskiej)*. Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Wrocławska.
- [3] Krużyński M., Kwiatkowska E.: *Ochrona torowiska w efekcie stosowania wibroizolacji podkładów kolejowych*. Przegląd Komunikacyjny 9-10/2012.
- [4] Krużyński M., Kwiatkowska E., Gisterek I.: *Możliwości przystosowania podsypkowej nawierzchni kolejowej do eksploatacji z dużymi prędkościami*.
- [5] Müller-Borutta F., Breitsamter N.: *Elastische Elemente im Gleisverringern die Fahrwegbeanspruchung*. www.imb-dynamik.de

mgr inż. Ewelina Kwiatkowska
 Politechnika Wrocławska
 Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
 Zakład Infrastruktury Transportu Szynowego
 tel. 691 416 230
 ewelina.kwiatkowska@pwr.wroc.pl
 olig20@interia.pl