

Badania porównawcze przyspieszeń i przemieszczeń konstrukcji mostowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym



PIOTR OLASZEK

Instytut Badawczy
Dróg i Mostów
polaszek@ibdim.edu.pl



LUCJAN JANAS

Politechnika Rzeszowska
ljanas@prz.edu.pl



MAREK SALAMAK

Politechnika Śląska
marek.salamak@polsl.pl



ANDRZEJ MATYSEK

Instytut Badawczy
Dróg i Mostów
amatysek@ibdim.edu.pl

Badania obiektów mostowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym są jednym z najistotniejszych elementów odbioru końcowego konstrukcji. Są one szczególnie ważne w przypadku ustrojów podatnych na oddziaływania dynamiczne. Należą do nich przede wszystkim wiotkie kładki dla pieszych oraz obiekty kolejowe położone na liniach dużych prędkości. Ocenę odpowiedzi dynamicznej konstrukcji mostowej najczęściej wykonuje się na podstawie pomiarów przemieszczeń i przyspieszeń, rzadziej – prędkości lub odkształceń. Znajomość amplitudy przyspieszeń pozwala sprawdzić kryteria komfortu użytkownika obiektu, wnioskować o jego odporności zmęczeniowej, a nawet o bezpieczeństwie w kontekście zjawiska rezonansu lub sprzężenia. Przetworniki służące do pomiaru przyspieszeń charakteryzują się w większości przypadków inercyjną zasadą działania i nie wymagają zewnętrznych punktów odniesienia. Pozwala to na łatwy i szybki montaż na konstrukcji i zapewnia odporność na wpływy atmosferyczne, jak wiatr, deszcz czy temperatura. Z tego względu są one często i chętnie stosowane przez laboratoria badające obiekty mostowe. W artykule zwrócono uwagę na konieczność standaryzacji pomiarów przyspieszeń w badaniach mostów pod próbnym obciążeniem dynamicznym oraz metod przetwarzania zarejestrowanych sygnałów. Możliwość porównywania w sposób jednoznaczny wyników uzyskanych przez różne laboratoria i przy zastosowaniu

gają się o akredytację potwierdzającą spełnienie wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025 [9]. Jednostką uprawnioną do akredytacji laboratoriów badawczych na terenie naszego kraju jest Polskie Centrum Akredytacji (PCA) [6]. Przeprowadzenie miarodajnych badań porównawczych, w przypadku konstrukcji mostowych pod obciążeniem statycznym lub dynamicznym, wymaga wykonania badań na tym samym obiekcie jednocześnie przez wszystkie biorące udział w porównaniu laboratoria, w tych samych punktach pomiarowych i przy tym samym wymuszeniu oraz w tych samych warunkach środowiskowych.

Wyposażenie pomiarowe powinno być okresowo poddawane kontroli metrologicznej, a szczególnie wzorcowaniu, co ma odzwierciedlenie w wymaganiach normy [9]. Jednak taka kontrola nie jest elementem wystarczającym do uzyskania zadowalającej wartości niepewności pomiaru. Wpływ na wyniki badań ma wiele innych czynników występujących przy instalacji sprzętu. Ważne jest, aby weryfikowany był cały tor pomiarowy, poczynając od punktu pomiarowego na konstrukcji, a skończywszy na ręcznym odczycie lub automatycznej rejestracji. Dużą rolę odgrywa również metodologia prowadzenia pomiarów i analizy wyników.

Prezentowane porównania międzylaboratoryjne zostały zrealizowane przez cztery laboratoria:

- Laboratorium Badań Konstrukcji Mostowych Zakładu Mostów z Instytutu Badawczego Dróg i Mostów;
- Wydziałowe Laboratorium Badań Konstrukcji, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska z Politechniki Rzeszowskiej;
- Zespół Badań Terenowych z Politechniki Śląskiej;
- Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji Mostowych Ośrodka Badań Mostów filia Kielce z Instytutu Badawczego Dróg i Mostów.

W dalszej części artykułu, ze względu na poufność wyników porównań międzylaboratoryjnych, zastosowane metody badawcze przedstawiane są bez wskazywania laboratoriów, które je stosowały.

Badania odbywały się podczas próbnego obciążenia odbiorczego realizowanego przez pierwsze laboratorium. Przedmiotem badań był wiadukt o schemacie statycznym belki ciągłej z sześcioma przęsłami i przekroju składającym się z czterech stalowych dźwigarów oraz współpracującej z nimi żelbetowej płyty pomostu (rys. 1). Po uzyskaniu zgody Zamawiającego na przeprowadzenie porównania wybrano do badania drugie przęsło od skrajnej podpory o rozpiętości 25,50 m (fot. 1). Porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami pomiaru przemieszczeń pionowych pod obciążeniem statycznym i dynamicznym przedstawiono w artykule [3].

Skoncentrowano się jedynie na pomiarze przyspieszeń pod obciążeniem dynamicznym. Badania i analizę wyników przeprowadzono zgodnie z zasadami podanymi w normach [7,10]. Ocenę zarejestrowanych przez wszystkie laboratoria

różnego sprzętu przeanalizowano podczas międzylaboratoryjnych badań porównawczych z udziałem czterech laboratoriów. Wyprowadzone wnioski mogą być interesujące nie tylko dla laboratoriów, które zamierzają akredytować swoją działalność, ale także dla tych, którzy mierzą, podają wyniki pomiaru przyspieszeń i porównują je z innymi wynikami lub wartościami zawartymi w odpowiednich przepisach i zaleceniach.

Zasada badań porównawczych

Międzylaboratoryjne badania porównawcze prowadzone są przede wszystkim przez laboratoria, które mają lub ubie-



Fot. 1. Badane przęsło: widoczny sprzęt do pomiaru przemieszczeń pionowych w środku rozpiętości

przebiegów przyspieszeń wsparto analizą przebiegów przemieszczeń pionowych zarejestrowanych w tych samych punktach pomiarowych i wykonanych metodami, które uzyskały zadowalające wyniki [3].

Kolejnym ważnym elementem prezentowanego tu porównania wyników pomiaru przyspieszeń są metody obróbki zarejestrowanych sygnałów, a w szczególności filtracji w dziedzinie częstotliwości. W wielu opracowaniach, a zwłaszcza w tych związanych z oceną komfortu użytkownika konstrukcji (np. [1, 2, 5]), podaje się maksymalne dopuszczalne amplitudy przyspieszeń, uzyskiwane w określonych przedziałach częstotliwości drgań. Jednakże, jak wynika z doświadczeń autorów, w wielu sprawozdaniach z badań, a nawet publikacjach naukowych, podaje się zmierzone wartości amplitud przyspieszeń bez informacji o związanych z nimi częstotliwościach drgań, czy zastosowanych metodach obróbki sygnału. Na przykład użycia filtrów lub innych transformacji.

Porównywane metody pomiaru przyspieszeń

Pomiary przyspieszeń drgań w kierunku pionowym wykonano przy użyciu przyspieszeniomierzy (akcelerometrów) o różnych zakresach pomiarowych, które wykorzystywały w swym działaniu różne zjawiska fizyczne (tab.1).

Przetworniki przyspieszeń zamocowano do pasa dolnego dźwigarów stalowych wiaduktu w środku rozpiętości badanego przęsła (fot. 2).

Pomiar przyspieszeń prowadzono na trzech dźwigarach. Każde laboratorium dysponowało własnym komputerowym systemem rejestrującym. Trzy laboratoria miały wspólne systemy rejestracji przyspieszeń i przemieszczeń, a jedno systemy oddzielne. Częstotliwość próbkowania w poszczególnych laboratoriach wynosiła: 100, 200 i 2048 Hz. Dodatkowo, jedno z laboratoriów zastosowało filtr sprzętowy dolnoprzepustowy Bessela 4-rzędu [4].

Kolejne rejestracje prowadzono podczas przejazdów samochodu ciężarowego z różnymi prędkościami oraz przejazdu przez sztuczną nierówność w postaci progu o wysokości 5 cm. Wszystkie jazdy wykonywano w kierunku najbliższej

Tabela 1. Rodzaje i zakresy pomiarowe stosowanych przetworników przyspieszeń

Lp.	Rodzaj przetwornika	Zakres mierzonych przyspieszeń [m/s ²]	Zakres mierzonych częstotliwości [Hz]
1	Sejsmiczny piezoelektryczny	± 4,9	≤ 1 500
2	Z masą drgającą, indukcyjny	± 200	≤ 100
3	Z masą drgającą, elektrooporowy	± 20	≤ 55
4	Piezoelektryczny	± 140	≤ 6 000
5	Piezoelektryczny	± 500	≤ 50 000
6	W technologii MEMS (ang. <i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>)	± 40	≤ 40

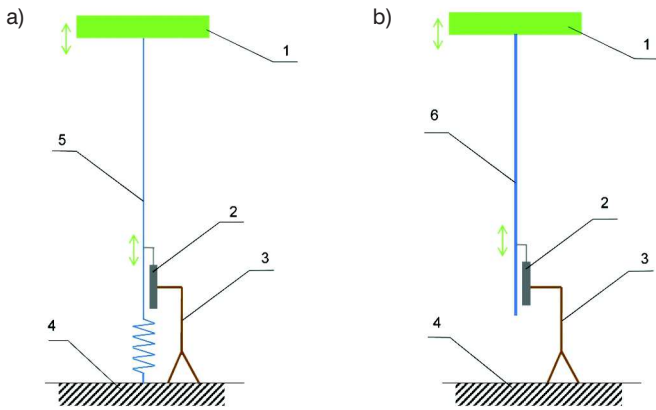


Fot. 2. Jeden z badanych dźwigarów w środku rozpiętości; widoczne przewody łączące zamocowane na górnej powierzchni dolnej półki przetworniki przyspieszeń z systemami rejestrującymi oraz różne systemy mocowania do konstrukcji drutu i sztywnej rurki do pomiaru przemieszczeń pionowych oraz przyrządy do tachimetrii (wyłącznie do badań pod obciążeniem statycznym)

podpory skrajnej. Tor jazdy zlokalizowany był przy skrajnym dźwigarze, a jedynie przy jeździe przez próg – na osi jezdni. W eksperymencie porównywano ze sobą zarejestrowane przez poszczególne zespoły ekstremalne wartości przyspieszeń. Wzięto pod uwagę również przejazdy przez próg, które w standardowych badaniach odbiorczych należą do prób specjalnych, w których można uzyskać zbliżone do impulsowego wymuszenie, dające większą niż w zwykłych przejazdach amplitudę początkową. Pozwoliło to na sprawdzenie systemów pomiarowych również w ekstremalnych warunkach z dużymi i gwałtownymi drganiami.

Do analiz porównawczych wykorzystano również wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych uzyskane pod obciążeniem dynamicznym z zastosowaniem przetworników indukcyjnych (rys 1). Wykonując dwukrotną operację liczenia pochodnej z zarejestrowanego przebiegu przemieszczeń $p(t)$ uzyskano wykres przyspieszeń $p''(t)$, który mógł być porównany z zarejestrowanym sygnałem z akcelerometrów.

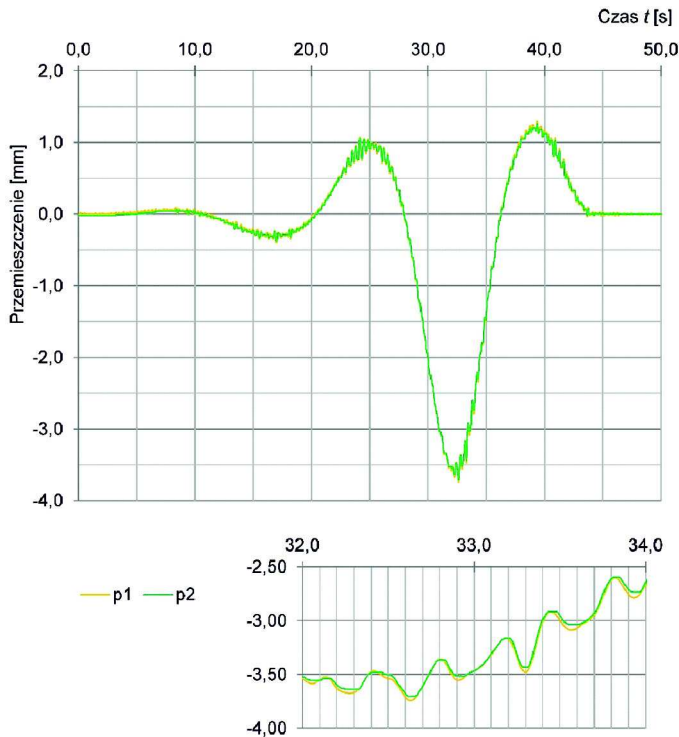
$$p'(t) = \frac{d^2 p(t)}{dt^2}$$



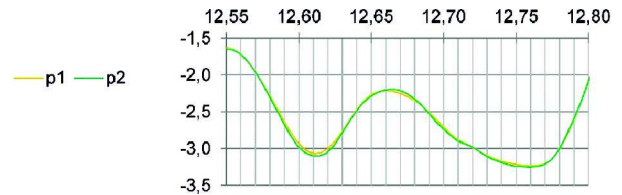
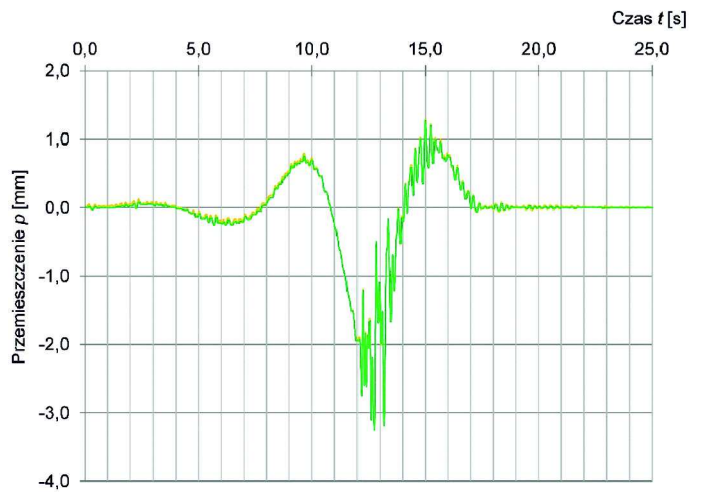
Rys. 1. Systemy przekazywania przemieszczeń badanego dźwigara do punktu lokalizacji przetwornika: a) z zastosowaniem drutu i sprężyny zamocowanej do podłoża, b) z zastosowaniem sztywnej rurki; 1- badany dźwigar, 2- przetwornik indukcyjny, 3- statyw, 4- podłoże pod badaną konstrukcją, 5- drut i sprężyna, 6- sztywna rurka

Analiza zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń i przemieszczeń

Szczegółową analizę zarejestrowanych przebiegów przedstawiono na przykładzie porównania przebiegów przyspieszeń i przemieszczeń zarejestrowanych podczas przejazdu samochodu ciężarowego z prędkością 10 km/h oraz przejazdu przez próg. Na rys. 2 i 3 pokazano przebiegi przemieszczeń pionowych punktu na skrajnym dźwigarze uzyskane przez dwa laboratoria z zastosowaniem różnych systemów



Rys. 2. Przejazd z prędkością 10 km/h; zestawienie 2 zarejestrowanych przebiegów przemieszczeń pionowych z zastosowaniem różnych systemów przekazywania przemieszczeń: sztywnej rurki ($p_1(t)$) oraz drutu i sprężyny ($p_2(t)$); w dolnej części powiększenie fragmentu, w którym zarejestrowano ekstremalne przyspieszenia

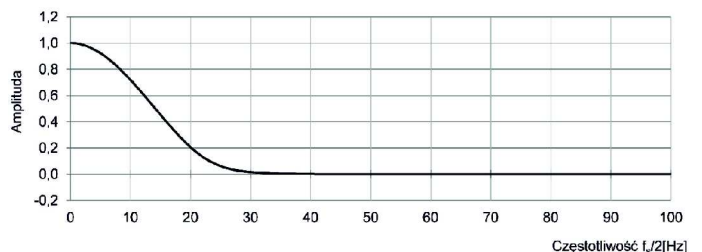


Rys. 3. Przejazd przez próg na badanym przęśle; zestawienie 2 zarejestrowanych przebiegów przemieszczeń pionowych z zastosowaniem różnych systemów przekazywania przemieszczeń: sztywnej rurki ($p_1(t)$) oraz drutu i sprężyny ($p_2(t)$); w dolnej części powiększenie fragmentu, w którym zarejestrowano ekstremalne przyspieszenia

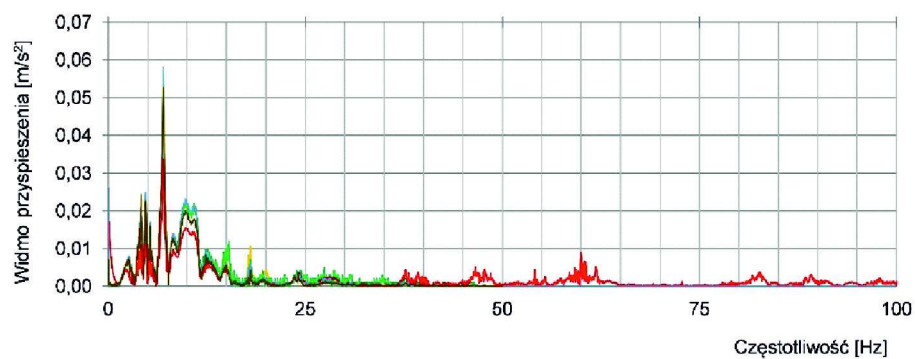
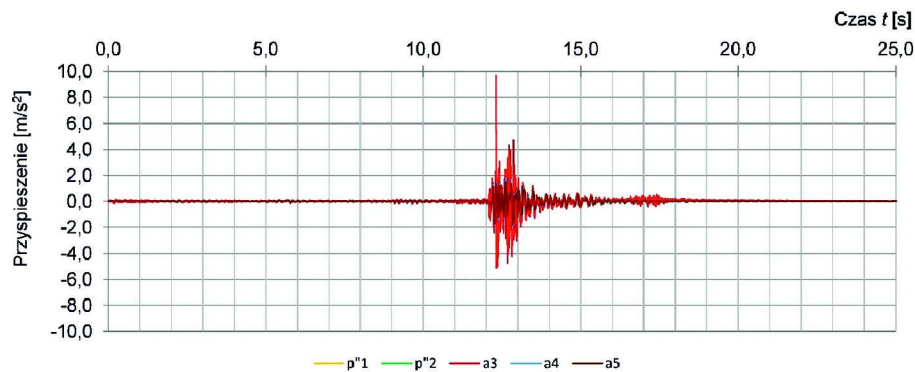
przekazywania przemieszczeń za pomocą: sztywnej rurki ($p_1(t)$) oraz drutu i sprężyny ($p_2(t)$). W przypadku systemu z drutem i sprężyną we wszystkich prezentowanych rejestracjach zastosowano poprawkę związaną z eliminacją błędów systematycznych wynikającą ze zmiany siły naciągu drutu.

Przedstawione przebiegi charakteryzują się dużą zgodnością wyznaczonych ekstremalnych (ujemnych i dodatnich) amplitud. Różnice w stosunku do wartości średnich z obu pomiarów nie przekraczają 1,6% przy próbie 10 km/h i 0,8% przy próbie z progiem.

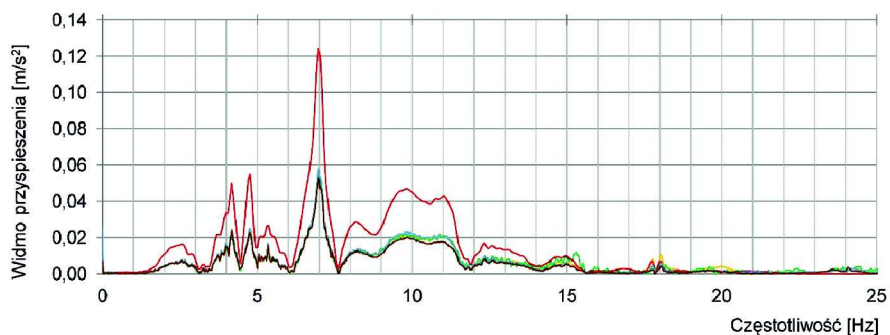
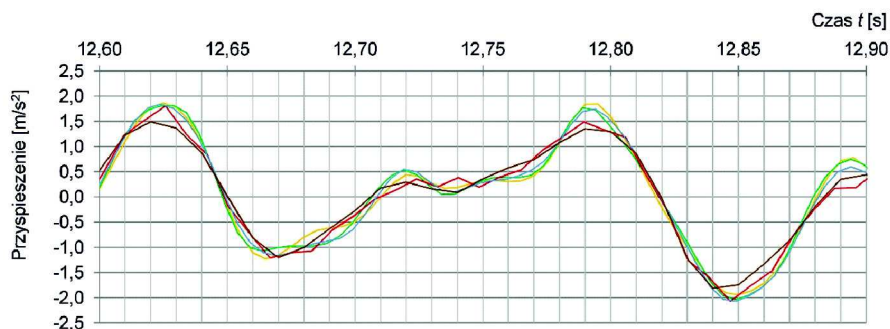
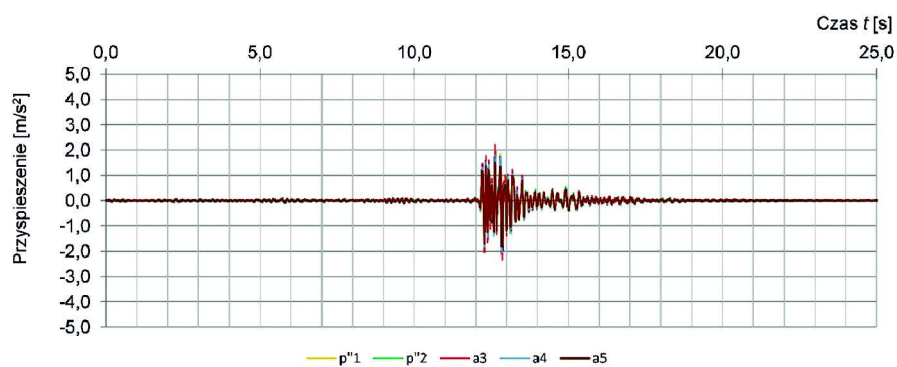
Do przetwarzania rejestrowanych sygnałów przyspieszeń zastosowano filtr Bessela rzędu 8. Jest to filtr dolnoprzepustowy charakteryzujący się brakiem zafalowań. Ma bardzo szerokie pasmo przejściowe, w którym przesunięcie fazowe jest liniowe (proporcjonalne do częstotliwości [4]). Na rys. 4 przedstawiono przykładową charakterystykę amplitudową zależności wzmocnienia od częstotliwości stosowanego filtra otrzymaną z wykorzystaniem programu Matlab [8].



Rys. 4. Charakterystyka amplitudowa zależności wzmocnienia od częstotliwości filtra dolnoprzepustowego Bessela 20 Hz, otrzymana z wykorzystaniem programu Matlab



Rys. 5. Zestawienie przebiegów przyspieszeń: bez filtracji ($a_3(t)$) i z filtracją dolnoprzepustową Bessela 20 Hz ($a_4(t)$, $a_5(t)$, $p_1''(t)$ i $p_2''(t)$) wraz z wykresem analizy widmowej



Rys. 6. Zestawienie przebiegów przyspieszeń $a_3(t)$, $a_4(t)$, $a_5(t)$, $p_1''(t)$ i $p_2''(t)$ z filtracją dolnoprzepustową Bessela 20 Hz (zastosowano dwa razy większą skalę wykresu w stosunku do rys. 5); na dole powiększony fragment przebiegów oraz wykres analizy widmowej

W celu zobrazowania wpływu filtracji zestawiono następujące przebiegi:

- $a_3(t)$ – zarejestrowany z częstotliwością próbkowania 2048 Hz bez filtracji,
- $a_4(t)$ – zarejestrowany z częstotliwością próbkowania 200 Hz oraz $a_5(t)$ z częstotliwością próbkowania 100 Hz i przetworzone filtrem dolnoprzepustowym Bessela 20 Hz,
- $p''1(t)$ i $p''2(t)$ – przebiegi przyspieszeń wyznaczone na podstawie przebiegów przemieszczeń zarejestrowane z częstotliwością próbkowania 200 Hz i przetworzone filtrem dolnoprzepustowym Bessela 20 Hz.

Zestawienie przebiegów przy przejeździe samochodu ciężarowego przez próg przedstawiono na rys. 5.

Na rys. 6 pokazano wszystkie przebiegi poddane filtracji dolnoprzepustowej 20 Hz.

Analiza wyników porównań

Wyniki porównania przy przejeździe przez próg, gdzie wystąpiły największe wartości przyspieszenia przedstawiono w tabeli 2. W przypadku braku filtracji przebiegu $a_3(t)$ występują znaczne różnice między przebiegiem $a_3(t)$ i przebiegami $a_4(t)$, $a_5(t)$, $p''1(t)$ i $p''2(t)$ – względne odchyłki przy wartościach ekstremalnych przekraczają wartość 400%. Na wykresie analizy widmowej $a_3(t)$ widoczne są składowe o częstotliwościach powyżej 20 Hz. Po zastosowaniu identycznej filtracji dolnoprzepustowej w stosunku do wszystkich przebiegów odchyłki przy $a_3(t)$ zmalały do 3%.

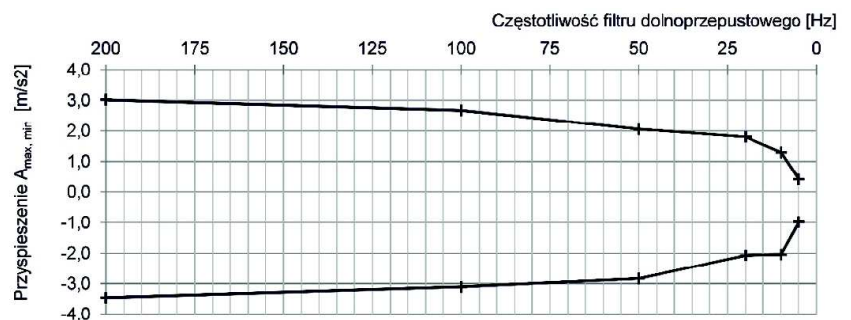
Tabela 2. Zestawienie ekstremalnych amplitud przyspieszeń wyznaczonych w czasie przejazdu przez próg.

Stosowany filtr	Jednostka	a3	a3	a4	a5	p''1	p''2
		bez filtru	Dolnoprzepustowy Bessela 20 Hz				
Wartość maksymalna	[m/s ²]	9,69	1,80	1,84	1,49	1,86	1,81
Wartość minimalna	[m/s ²]	-5,11	-2,07	-2,07	-1,81	-1,94	-2,04
Średnia max*)	[m/s ²]					1,84	
Średnia min*)	[m/s ²]					-2,02	
Względna odchyłka od średniej – max		427%	-2%	0%	-19%	1%	-1%
Względna odchyłka od średniej – min		153%	3%	3%	-10%	-4%	1%

*) przy wyznaczaniu wartości średniej odrzucono a_5

Wpływ filtru dolnoprzepustowego na wartości ekstremalnych amplitud na przykładzie analizowanego przebiegu przyspieszeń $a_1(t)$ przeanalizowano stosując filtr dolnoprzepustowy o częstotliwościach granicznych 200, 100, 50, 20, 10 i 5 Hz. Wyniki przedstawiono na rys. 7. Jak widać zastosowanie filtru o różnych częstotliwościach w wypadku badanej konstrukcji istotnie zmieniało wynik pomiaru.

Badania porównawcze w zakresie stosowanych metod pomiaru przyspieszeń wykazały, że po zastosowaniu filtru dol-



Rys. 7. Zależność maksymalnej i minimalnej amplitudy przy przebiegu przyspieszeń $a_3(t)$ w zależności od zastosowanej częstotliwości filtra dolnoprzepustowego

noprzepustowego 20 Hz wszystkie zastosowane metody pomiaru przyspieszeń dały zgodne wyniki.

Podsumowanie

Wykonane badania porównawcze przyniosły uczestniczącym laboratoriom znaczne korzyści. Umożliwiły weryfikację stosowanych przez laboratoria metod pomiaru przemieszczeń i przyspieszeń. Badania wykazały jak duże znaczenie ma stosowanie filtracji przy pomiarach przyspieszeń. Podawanie wartości przyspieszeń bez informacji o zastosowanej filtracji lub o rejestrowanym widmie częstotliwości ma niską wartość porównawczą. Dotyczy to nie tylko porównania wyników pomiarów z innymi, ale i z wynikami obliczeń teoretycznych. Dlatego ważne jest, aby opracować taki sposób obróbki i prezentacji wyników z badań dynamicznych mostów, aby były one jednoznaczne i powtarzalne. Przyjęcie tych zasad do powszechnego stosowania wśród laboratoriów, pozwoliłoby na sukcesywne tworzenie bazy wiedzy na temat przebadanych i eksploatowanych obiektów, która w przyszłości może stać się podstawą nowoczesnych systemów gospodarki mostowej.

Bibliografia

- [1] A. Flaga, *Problemy oceny wpływu drgań na ludzi znajdujących się na mostach*, Inżynieria i Budownictwo, 3-4, 2002
- [2] A. Flaga, M. Pańtak, *Kryteria komfortu w projektowaniu kładek dla pieszych*, Monografia. Projektowanie, budowa i estetyka kładek dla pieszych, Katedra Budowy Mostów i tuneli Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003
- [3] P. Olszok, M. Mazanek, L. Janas, M. Salamak, A. Matysek, *Istota porównań międzylaboratoryjnych - jakość badań pod próbnym obciążeniem*, Mosty nr 2, 2014
- [4] T. P. Zieliński, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKiŁ, Warszawa 2009.
- [5] K. Zóltowski, *Pieszcy na kładkach. Obciążenia i odpowiedź konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Monografia 82, Gdańsk 2007
- [6] DA-05 *Polityka dotycząca uczestnictwa w badaniach biegłości*, PCA, wyd. 5 Warszawa, 17.11.2011 r.
- [7] ISO 13528:2005 *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison*
- [8] *MATLAB - The Language of Technical Computing*. Online dostępne: <http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html>. [22-05-2014]
- [9] PN-EN ISO/IEC 17025:2005 *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących*
- [10] PN-EN ISO/IEC 17043:2011 *Ocena zgodności – Ogólne wymagania dotyczące badania biegłości*