

# Ocena komfortu pieszego na kładkach.

## Case study

Przeprowadzone analizy i badania pokazują, że jednym z kluczowych elementów etapu projektowania kładek dla pieszych jest analiza dynamiczna. Pozwala ona na ocenę ryzyka wystąpienia nadmiernych drgań w trakcie eksploatacji.



dr inż.  
**ANNA BANAS**  
Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Katedra Transportu Szynowego i Mostów  
**ORCID: 0000-0003-4760-4592**

Projektanci muszą mierzyć się z panującymi aktualnie trendami projektowania coraz bardziej „wyszukanych” kładek dla pieszych, które zachwycają swoją lekkością. Pozwala na to użycie nowoczesnych materiałów, a także przeprowadzenie zaawansowanych analiz numerycznych na etapie projektowania. Bardzo często jednak obiekty te mają pierwszą częstotliwość giętną pomostu zbliżoną do wymuszenia chodem pieszego.

### Potrzeba badań i analiz

Znanymi przypadkami kładek z ostatnich lat, które w trakcie swojej eksploatacji doświadczyły nadmiernych drgań pomostu, są między innymi Millenium Bridge w Londynie [1] oraz most Solferino w Paryżu [2]. Z tego powodu pojawiła się konieczność wprowadzenia norm, które określałyby odpowiednie poziomy drgań mogące wystąpić na obiektach. Istnieje tylko kilka wytycznych i norm, które uwzględniają wpływ tłumy na komfort użytkownika kładek. Do najczęściej używanych należą francuskie wytyczne Sétrea [3], europejski przewodnik *Human-induced vibration of steel structures* (HiVoss) [4] oraz europejskie wytyczne *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations* (DoLFfHIV) [5]. Pewne wytyczne znajdziemy również w Eurokodzie 1 [6], są one jednak bardziej ogólne.

W celu oceny zachowania się konstrukcji i ryzyka wystąpienia rezonansu trzeba znać jej podstawowe parametry dynamiczne. Są to między innymi częstotliwości drgań własnych, liczby tłumienia oraz postacie drgań. Można je uzyskać poprzez wykonanie analiz numerycznych bądź w wyniku przeprowadzonych na wykonanej już konstrukcji badań eksperymentalnych. Badania przeprowadzone na konstrukcji dają nam pełną wiedzę na temat jej dynamicznego zachowania. Otrzymane w wyniku badań eksperymentalnych parametry dynamiczne możemy wykorzystywać do aktualizacji modeli numerycznych [7], diagnostyki nieniszczącej [8] bądź do systemów monitoringu konstrukcji [9]. Podejście to ma

jednak jedną wadę. Na tym etapie istnieją już duże trudności w modyfikacji konstrukcji w przypadku wystąpienia nadmiernych drgań. Wymaga to zwykle wprowadzenia dodatkowych urządzeń tłumiących, np. w postaci masowych tłumików drgań [10–12].

Drugie podejście opiera się na oszacowaniu parametrów dynamicznych konstrukcji na etapie projektowania. Wykorzystywane są w tym celu zwykle modele numeryczne konstrukcji. Pozwalają one przewidzieć oczekiwany poziom przyspieszeń spowodowanych przez obciążenie wywołane chodem człowieka. Na tym etapie, jeśli poziom komfortu zostanie przekroczony, możliwa jest modyfikacja konstrukcji. Istnieje jednak również wada takiego rozwiązania. Stworzenie modelu numerycznego, który wystarczająco wiarygodnie opisuje dynamiczne właściwości rzeczywistej konstrukcji, jest zagadnieniem złożonym [7]. Jest to spowodowane dużą liczbą niewiadomych, szczególnie poprawnym oszacowaniem współczynnika tłumienia, zadaniem odpowiednich warunków brzegowych, modelowaniem połączeń, właściwościami materiałów oraz wpływem elementów niekonstrukcyjnych na parametry dynamiczne [13]. Dlatego najlepszą praktyką jest opracowanie modelu numerycznego, a następnie przeprowadzenie testów dynamicznych w celu potwierdzenia założeń [14, 15].

W artykule przedstawiono przegląd najczęściej stosowanych wytycznych dotyczących klas komfortu kładek dla pieszych. Następnie opisano konstrukcje trzech kładek. Modele numeryczne stworzone na potrzeby wykonania badań odbiorczych pozwoliły na oszacowanie, że każda z konstrukcji znajduje się w grupie ryzyka wystąpienia rezonansu wywołanego oddziaływaniem pieszego. Z tego powodu należało zbadać poziom przyspieszeń konstrukcji od różnych scenariuszy wymuszenia. Na podstawie przeprowadzonych testów dynamicznych dokonano oceny kryterium komfortu każdej z konstrukcji i wyciągnięto wnioski.

W artykule przedstawiono przegląd najczęściej stosowanych wytycznych dotyczących klas komfortu kładek dla pieszych. Następnie opisano konstrukcje trzech kładek. Modele numeryczne stworzone na potrzeby wykonania badań odbiorczych pozwoliły na oszacowanie, że każda z konstrukcji znajduje się w grupie ryzyka wystąpienia rezonansu wywołanego oddziaływaniem pieszego. Z tego powodu należało zbadać poziom przyspieszeń konstrukcji od różnych scenariuszy wymuszenia. Na podstawie przeprowadzonych testów dynamicznych dokonano oceny kryterium komfortu każdej z konstrukcji i wyciągnięto wnioski.

### Przegląd wytycznych do projektowania kładek dla pieszych

Wytyczne do projektowania Sétrea, HiVoss i DoLFfHIV [3–5] oraz Eurokod [6] bazują na innym podejściu i na założeniach, jeżeli chodzi o sposób modelowania obciążenia pie-

Przyspieszenia pionowe [m/s <sup>2</sup> ]				
	0,5	1,0	2,5	
Setra	max	średni	min	krytyczny
HiVoss/DoLFfHIV	max	średni	min	krytyczny
Eurokod	max	krytyczny		
0,7				
Przyspieszenia poziome [m/s <sup>2</sup> ]				
	0,15	0,3	0,8	
Setra	max	średni	min	krytyczny
HiVoss/DoLFfHIV	max	średni	min	krytyczny
Eurokod	max	krytyczny		
0,1 0,2				

Rys. 1. Porównanie wytycznych i normy w zakresie kryterium komfortu na podstawie przyspieszeń konstrukcji

szymi oraz prognozowanie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. Jednak proces oceny dynamicznej kładek zawarty w tych dokumentach składa się z dwóch takich samych etapów. Pierwszy krok obejmuje sprawdzenie częstotliwości drgań własnych konstrukcji. W przypadku gdy znajdują się one poza krytycznym zakresem, zakłada się, że konstrukcja spełnia wymagania maksymalnego komfortu. Tym samym nie jest konieczne prowadzenie dalszych analiz dynamicznych. W tabeli 1. przedstawiono krytyczne i dopuszczalne zakresy częstotliwości drgań pionowych oraz poziomych. W przypadku wytycznych Sétra, HiVoss i DoLFfHIV występuje kilka poziomów drgań, w zależności od ryzyka wystąpienia rezonansu. I tak, jako obarczony największym ryzykiem powstania nadmiernych drgań pionowych, podają one przedział 1,7–2,1 Hz. Eurokod zaś nakazuje sprawdzenie dynamiczne wszystkich konstrukcji o częstotliwościach giętnych pomostu nie większych niż 5 Hz. Przy poziomie drgań wyższym niż 5 Hz i niższym niż 1 Hz wg wytycznych Sétra ryzyko wzbudzenia konstrukcji jest pomijalnie małe. Podobne zakresy częstotliwości zawarte są w wytycznych HiVoss i DoLFfHIV. Jako górną granicę częstotliwości przyjmuje się 4,6 Hz, a jako dolną 1,25 Hz. Zakresy wprowadzono także dla drgań poziomych. Za bezpieczną granicę drgań poziomych Eurokod przyjmuje częstotliwość wyższą niż 2,5 Hz. Wytyczne Sétra, HiVoss i DoLFfHIV w tym przypadku również podają kilka przedziałów częstotliwości, rozważając ryzyko wystąpienia rezonansu jako wysokie, średnie, niskie i pomijalnie małe. Za najbardziej niebezpieczny zakres częstotliwości uważa się przedział 0,5–1,1 wg Sétra oraz 0,7–1,0 Hz wg HiVoss i DoLFfHIV

W przypadku gdy częstotliwości drgań konstrukcji znajdują się w zakresie, w którym istnieje ryzyko wystąpienia drgań rezonansowych, należy przeprowadzić szczegółową analizę dynamiczną. Jej celem jest wyznaczenie przyspieszeń, które mogą wystąpić w trakcie eksploatacji obiektu. Odczuwanie wibracji jest subiektywne. Zależy ono od wielu czynników, w tym między innymi od czasu ich trwania, kierunku wibracji, a także od aktywności i pozycji człowieka odczuwającego drganie [16–18]. Eurokod podaje jako graniczną wartość przyspieszeń 0,7 m/s<sup>2</sup> dla drgań pionowych i 0,2 m/s<sup>2</sup> dla drgań poziomych (rys. 1). Poniżej tej granicy drgania powinny zapewnić komfort użytkownika, powyżej uznawane są za nieakceptowalne. Zarówno wytyczne Sétra, jak i HiVoss oraz DoLFfHIV proponują wprowadzenie czterech poziomów komfortu (rys. 1). W przypadku drgań pionowych granice między poziomami są takie same i wynoszą 0,5 m/s<sup>2</sup>, 1 m/s<sup>2</sup> i 2,5 m/s<sup>2</sup>, odpowiednio dla maksymalnego, średniego i minimalnego komfortu. Przyspieszenie przekraczające wartość

Tabela 1. Krytyczne zakresy częstotliwości zgodnie z wytycznymi Sétra, HiVoss i DoLFfHIV oraz Eurokodem 1

Dokument	Poziom ryzyka rezonansu			
	Wysokie	Średnie	Niskie	Pomijalne
	Częstotliwości drgań pionowych [Hz]			
Sétra	1,7–2,1	1,0–1,7; 2,1–2,6	2,6–5,0	0–1,0; >5
HiVoss/ DoLFfHIV	1,7–2,1	1,25–1,7; 2,1–2,3	2,3–4,6	0–1,25; >4,6
Eurokod	0,0–5,0	–	–	>5
	Częstotliwości drgań poziomych [Hz]			
Sétra	0,5–1,1	0,3–0,5; 1,1–1,3	1,3–2,5	0,0–0,3 >2,5
HiVoss/ DoLFfHIV	0,7–1,0	0,5–0,7; 1,0–1,2	–	0,0–0,5 >1,2
Eurokod	0,0–2,5	–	–	>2,5



Rys. 2. Widok z boku kładki nad drogą S8



Rys. 3. Widok z boku kładki nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy

pionową 2,5 m/s<sup>2</sup> uważa się za niedopuszczalne. Poziom przyspieszeń poziomych powinien uwzględnić możliwość wystąpienia efektu *lock-in* [4]. Zakłada się, że w przypadku przyspieszeń konstrukcji mniejszych niż 0,15 m/s<sup>2</sup> według Sétra i 0,1 m/s<sup>2</sup> według HiVoss oraz DoLFfHIV efekt *lock-in* nie wystąpi z powodu losowości obciążenia i braku synchronizacji pieszych. Przyspieszenie poziome przekraczające wartość 0,8 m/s<sup>2</sup> uważa się za niedopuszczalne.

### Opis analizowanych konstrukcji. Case study

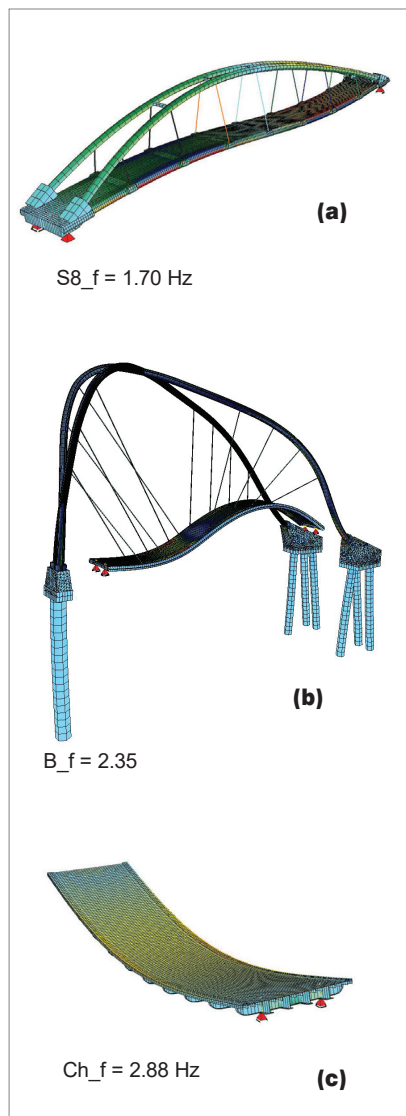
Pierwszą konstrukcją jest kładka tukuwa znajdująca się nad drogą S8 w Polsce (rys. 2). Została ona wybudowana w 2013 r. jako połączenie pomiędzy miejscami obsługi podróźnych. Konstrukcja nośna składa się z dwóch stalowych łuków, żelbetowej płyty pomostu i 14 pionowych wieszaków. Całkowita długość kładki wynosi 50,0 m, szerokość 4,5 m, a wysokość 7,5 m. Konstrukcja opiera



Rys. 4. Widok z boku kładki nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni



Rys. 5. Modele MES kładki (a) nad drogą S8 (b) nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy (c) nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni



Rys. 6. Pierwsze gięte postaci drgań wraz z odpowiadającymi im częstotliwościami dla kładki (a) nad drogą S8 (b) nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy (c) nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni

się na żelbetowych przyczółkach za pomocą łożysk elastomerowych.

Druga konstrukcja to kładka zlokalizowana nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy (rys. 3.). Jest to konstrukcja o nietypowym kształcie stalowego dźwigara, do którego za pomocą 14 wieszaków podwieszony jest żelbetowy pomost. Stalowe dźwigary opierają się na blokach oporowych posadowionych na palach. Konstrukcja pomostu opiera się, niezależnie od dźwigarów, na żelbetowych przyczółkach. Długość konstrukcji wynosi 34,4 m, szerokość 4,5, a wysokość w najwyższym miejscu 20 m.

Ostatnią z omawianych konstrukcji jest stalowa kładka nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni (rys. 4.). Ustrój nośny kładki stanowią cztery podłużne dźwigary i poprzecznice blachownicowe, w których w płaszczyźnie pasów górnych znajduje się pozioma blacha wzmocniona dodatkowo podłużnymi żebrami otwartymi z płaskowników. Konstrukcja przęsła oparta jest na filarach za pośrednictwem łożysk elastomerowych. Podstawowe parametry geometryczne konstrukcji nośnej kładki to: rozpiętość 21 m, szerokość całkowita 4,97 m i wysokość konstrukcyjna wahająca się w przedziale 0,53–0,55 m.

### Analizy numeryczne

Modele obliczeniowe obiektów utworzono w formalizmie Metody Elementów Skończonych (MES) jako przestrzenne układy belkowo-powłokowe. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem komercyjnego programu SOFiSTiK.

Konstrukcję płyty pomostu modelowano 4-węzłowymi powłokowymi elementami skończonymi typu Timoshenko-Reissnera (QUAD). Dźwigary łukowe, stężenia łuku oraz dźwigary, poprzecznice i żebra płyty ortotropowej modelowano 2-węzłowymi elementami belkowymi z uwzględnieniem mimośrodków (BEAM). Wieszaki modelowano elementami ciągnowymi – kablowymi (CABL). Bloki oporowe modelowano elementami bryłowymi (BRIC). Parametry geometryczne i materiałowe konstrukcji przyjęto na podstawie rysunków konstrukcyjnych oraz badań polowych wykonanych w trakcie budowy obiektów. Wykonane modele numeryczne przedstawiono na rysunku 5. W analizach numerycznych sztywności elementów niekonstrukcyjnych, takich jak izolacje i bariery, zostały pominięte, jednak ich masy uwzględniono.

W celu wyznaczenia postaci i częstotliwości drgań własnych konstrukcji posłużono się metodą Lanchos'a zaimplementowaną w programie SOFiSTiK. Zidentyfikowane pierwsze gięte częstotliwości i postacie drgań dla wszystkich konstrukcji przedstawiono na rysunku 6. Wszystkie wartości częstotliwości są mniejsze od 5 Hz, co według wymagań opisanych w Eurokodzie nakazuje przeprowadzenie pełnej analizy dynamicz-

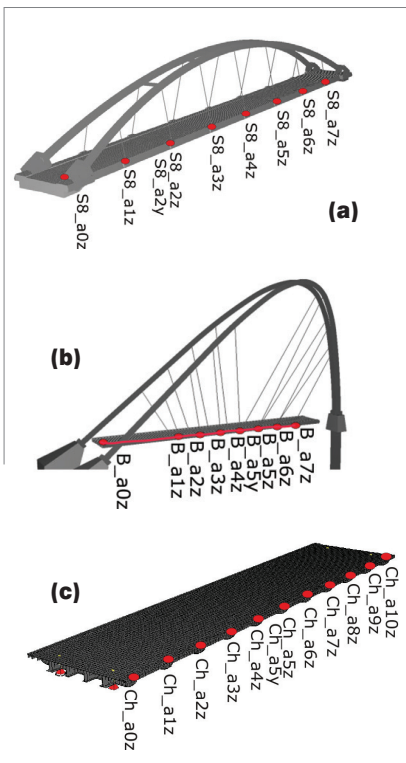


Rys. 7. Metody wzbudzenia dynamicznego kładek dla pieszych a) marsz b) bieg c) podskoki

nej. Porównując te wartości do stref zawartych w wytycznych Sétra, można zauważyć, że kładka nad drogą S8 znajduje się w strefie zagrożonej wysokim ryzykiem wystąpienia nadmiernych drgań, kładka w Bydgoszczy w średnim, a kładka w Gdyni niskim ryzykiem wystąpienia rezonansu.

### Badania eksperymentalne

Najczęściej stosowane metody wzbudzenia drgań kładek dla pieszych to testy dynamiczne bazujące na ruchu człowieka lub grupy ludzi w formie marszu, biegu lub podskoków (rys. 7.). Dają one obraz zachowania się konstrukcji pod rzeczywistym obciążeniem eksploatacyjnym. Podczas przeprowadzonych na wszystkich konstrukcjach badań wykorzystano wiele scenariuszy obciążenia: marsz swobodny i synchroniczny, bieg swobodny oraz synchroniczny, jak również podskoki w określonych punktach konstrukcji. Przy prowadzonych testach wykorzystywano grupy pieszych o różnej liczebności. Umożliwiło to zbadanie wpływu rosnącej liczby pieszych na wartości otrzymanych przyspieszeń.



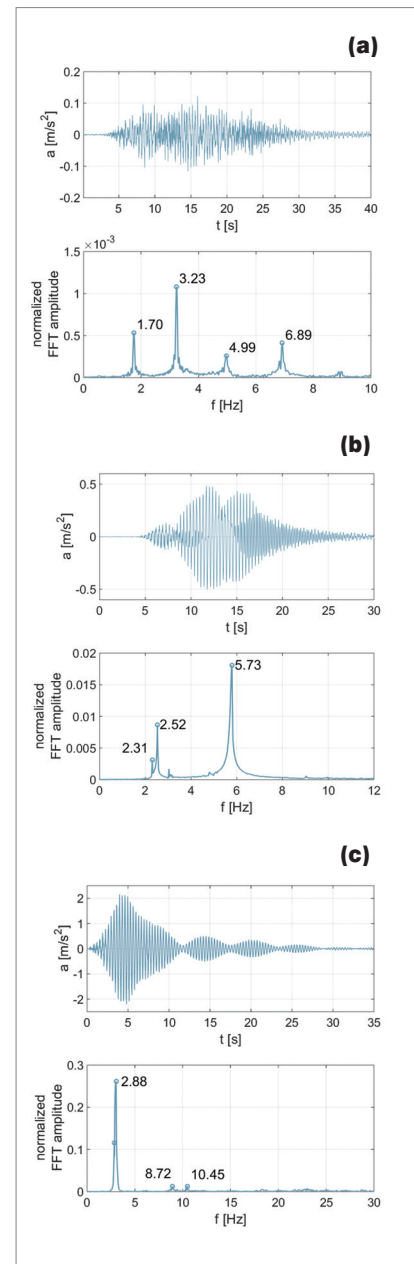
Rys. 8. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na kładce (a) nad drogą S8 (b) nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy (c) nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni

Do pomiarów przyspieszeń konstrukcji wykorzystywano wykonywane w technologii MES akcelerometry pojemnościowe LIS344ALH wyprodukowane przez STMicroelectronics [19]. Wszystkie otrzymane przebiegi poddano filtracji przy użyciu filtra Butterwortha odcinającego z sygnału składowe o częstotliwościach wyższych od 30 Hz. Dane pomiarowe były rejestrowane przy użyciu 8-kanalowych wzmacniaczy pomiarowych QUANTUM HBM 840a. Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla każdej z omawianych konstrukcji przedstawiono na rysunku 8.

Wyznaczono przebiegi czasowe przyspieszeń konstrukcji. Na ich podstawie przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) otrzymano częstotliwości drgań własnych (rys. 9.). Uzyskane podczas badań i analiz numerycznych częstotliwości drgań własnych zestawiono w tabeli 2. Wartości obliczone podczas analiz numerycznych i otrzymane z badań eksperymentalnych okazały się zbliżone. Różnica w wartościach otrzymanych częstotliwości w żadnym z przypadków nie przekroczyła 5%.

### Ocena kryterium komfortu

Przeprowadzone na wszystkich obiektach badania eksperymentalne potwierdziły ryzyko wystąpienia rezonansu, z uwagi na zbliżność pierwszej postaci drgań pomostu z wymuszeniem chodem człowieka. W celu ustalenia poziomów przyspieszeń, które mogą wystąpić na każdej z konstrukcji w trakcie eksploatacji, przeprowadzono serię testów. Kryteria komfortu dla każdej z konstrukcji określono na podstawie wytycznych Sétra. Maksymalne zarejestrowane przyspieszenia poziome i pionowe przedstawiono w tabelach 3–5. Na podstawie danych z tabeli 3. możemy stwierdzić, że pomimo częstotliwości drgań znajdującej się w przedziale wysokiego ryzyka wystąpienia drgań rezonansowych uzyskane wartości przyspieszeń kładki nad drogą S8 są na niskim poziomie. Bez względu na rodzaj przeprowadzonego testu i liczbę pieszych przyspieszenia kształtują się zazwyczaj na poziomie mniejszym niż 0,5 m/s<sup>2</sup>, co klasyfikuje konstrukcję do kategorii zapewniającej najwyższy komfort. Przyspieszenia kładki w Bydgoszczy, pomimo częstotliwości drgań znajdującej się w przedziale średniego ryzyka wystąpienia drgań rezonansowych, są znacznie większe. Największe wartości przyspieszeń występują podczas marszu zsynchronizowanego i skoków. Należy tu jednak podkre-



Rys. 9. Reprezentatywne przebiegi przyspieszeń wraz z odpowiadającymi im transformatami Fouriera dla kładki (a) nad drogą S8 w punkcie a5z od wymuszenia biegiem swobodnym grupy 12 osób (b) nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy w punkcie a1z od biegu synchronicznego grupy 9 osób (c) nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni w punkcie a5z od wymuszenia marszem synchronicznym grupy 3 osób

ślić, że wartości te znacznie spadają w przypadku niesynchronizowanych grup pieszych. W takich warunkach komfort pieszych na kładce spełnia najwyższe kryterium. Kładka, dla której, z uwagi na pierwszą częstotliwość drgań pomostu, ryzyko wystąpienia rezonansu było najmniejsze, okazała się konstrukcją najbardziej podatną na drgania. W przypadku marszu nawet 1 osoby przyspieszenia są tu znaczne i zapewnią jedynie minimalny komfort jej użytkownikom. W przypadku większych grup pieszych przyspieszenia wykraczają po-

Tabela 2. Porównanie czterech pierwszych częstotliwości drgań uzyskanych podczas badań i podczas analiz numerycznych

Często- tliwość	Kładka S8			Kładka Bydgoszcz			Kładka Gdynia		
	Eksp.	MES	$\Delta f$	Eksp.	MES	$\Delta f$	Eksp.	MES	$\Delta f$
	[Hz]		[%]	[Hz]		[%]	[Hz]		[%]
1	1,76	1,70	3,5	2,31	2,35	1,7	2,88	2,88	0,0
2	3,23	3,27	-1,2	2,52	2,65	5,2	8,72	8,53	2,2
3	4,99	4,94	1,0	4,99	5,18	3,8	10,45	10,94	4,7
4	6,86	6,81	0,7	5,73	5,90	3,0	23,00	21,96	4,5

Tabela 3. Maksymalne zarejestrowane przyspieszenia podczas wymuszeń oddziaływaniem pieszego na kładce nad drogą S8

Liczba pieszych	Marsz		Bieg		Skoki
	Synchr.	Swobodny	Synchr.	Swobodny	Synchr.
Pionowe przyspieszenia [m/s <sup>2</sup> ]					
6 pieszych	0,24	0,17	0,40	0,13	0,48
12 pieszych	0,32	0,14	0,53	0,20	–
Poziome przyspieszenia [m/s <sup>2</sup> ]					
6 pieszych	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
12 pieszych	0,02	0,01	0,02	0,01	–

Tabela 4. Maksymalne zarejestrowane przyspieszenia podczas wymuszeń oddziaływaniem pieszego na kładce nad Trasą Uniwersytecką w Bydgoszczy

Liczba pieszych	Marsz		Bieg		Skoki
	Synchr.	Swobodny	Synchr.	Swobodny	Synchr.
Pionowe przyspieszenia [m/s <sup>2</sup> ]					
6 pieszych	0,93	0,09	0,45	0,23	1,31
9 pieszych	1,84	–	0,68	–	–
12 pieszych	1,19	0,08	0,70	0,48	2,23
Poziome przyspieszenia [m/s <sup>2</sup> ]					
6 pieszych	0,18	0,02	0,12	0,04	0,31
9 pieszych	0,24	–	0,13	–	–
12 pieszych	0,17	0,02	0,13	0,06	0,37

Tabela 5. Maksymalne zarejestrowane przyspieszenia podczas wymuszeń oddziaływaniem pieszego na kładce nad ulicą Chwarznieńską w Gdyni

Liczba pieszych	Marsz	Bieg	Skoki
	Synchr.	Synchr.	Synchr.
Pionowe przyspieszenia [m/s <sup>2</sup> ]			
1 pieszy	1,45	0,82	–
3 pieszych	2,69	1,02	–
6 pieszych	2,55	1,32	3,35
Poziome przyspieszenia [m/s <sup>2</sup> ]			
1 pieszy	0,12	0,08	–
3 pieszych	0,21	0,10	–
6 pieszych	0,15	0,12	0,34

za wartość graniczną 2,5 m/s<sup>2</sup>. Mniejsze wartości przyspieszeń uzyskano podczas wymuszenia biegiem. W tym wypadku, bez względu na liczebność grupy, kładka zapewniała co najmniej minimalny komfort. Należy jednak podkreślić, że kładka z uwagi na swoje położenie jest mało obciążona ruchem i nie istnieje duże ryzyko wzbudzenia jej przez grupę pieszych.

### Podsumowanie

Obecnie coraz więcej nowo budowanych kładek dla pieszych, z uwagi na swoją smukłą konstrukcję i niewielką masę, ma pierwszą częstotliwość drgań własnych zbliżoną do wymuszenia generowanego przez pieszego. Przy projektowaniu takich konstrukcji powinno się zwracać uwagę przede wszystkim na dwa aspekty: częstotliwości drgań własnych

i przyspieszenia. Z reguły przyjmuje się, że jeżeli częstotliwość jest mniejsza niż 5 Hz, należy przeprowadzić szczegółową analizę dynamiczną. Pozwala ona na porównanie występujących od wymuszenia chodem pieszego przyspieszeń z wartościami definiowanymi przez Eurokod bądź wytyczne Sétra i Hivoss.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań *in situ* przyspieszeń trzech konstrukcji kładek dla pieszych wywołanych różnymi scenariuszami oddziaływania pieszego. Każda z nich znalazła się w innej grupie narażenia na wystąpienie drgań rezonansowych, z uwagi na pierwszą częstotliwość drgań giętnych pomostu. Przeprowadzone badania pokazały, że kładka nad drogą S8, która znajdowała się w wysokiej grupie ryzyka, bez względu na sposób obciążenia spełnia najwyższy poziom komfortu. W przypadku kładki w Bydgoszczy, która znalazła się w średniej grupie ryzyka, poziomy przyspieszeń były znacznie większe. Przy wymuszeniach synchronicznych zapewniały często tylko minimalny komfort jej użytkownikom. W przypadku kładki w Gdyni, mimo stosunkowo wysokiej wartości częstotliwości drgań własnych i niskiego ryzyka wystąpienia rezonansu, nawet dla bardzo małych grup pieszych przyspieszenia były na bardzo wysokim poziomie. Kładka w normalnych warunkach eksploatacji zapewnia użytkownikom minimalny komfort. Przy wymuszeniach synchronicznych poziom komfortu jest już jednak nieakceptowalny.

Przeprowadzone analizy i badania pokazują, że jednym z kluczowych elementów etapu projektowania kładki jest analiza dynamiczna. Pozwala ona na ocenę ryzyka wystąpienia nadmiernych drgań w trakcie eksploatacji. Należy jednak podkreślić, że dla konstrukcji o pierwszej częstotliwości drgań giętnych mniejszej od 5 Hz zawsze wskazane jest przeprowadzenie szczegółowej analizy dynamicznej, która pozwoli na pokazanie rezerw bezpieczeństwa lub, przy występowaniu nadmiernych przyspieszeń, na modyfikację konstrukcji na etapie projektowym. Wykonanie takich analiz w przypadku dwóch przedstawionych powyżej kładek, zwłaszcza w przypadku konstrukcji nad ulicą Chwarznieńską, pozwoliłoby prawdopodobnie na wykonanie w nich zmian konstrukcyjnych, które zwiększyłyby komfort ich użytkowania.

### Literatura

- [1] Dallard P., Fitzpatrick T., Flint A., Low A., Smith R.R., Willford M., Roche M., London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration, „Journal of Bridge Engineering” 2001, 6, 412–417, doi:10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(412).
- [2] Blekherman Alexander N., Autoparametric Resonance in a Pedestrian Steel Arch Bridge: Solferino Bridge, Paris, „Journal of Bridge Engineering” 2007, 12, 669–676, doi:10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:6(669).
- [3] Sétra/Aigc Sétra Technical guide Footbridges Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, Paris, France, 2006.
- [4] Feldmann M., Human-induced vibration of steel structures (Hivoss): Designing of footbridges; Reaserch Fund for Coal and Steel, Publications Office of the European Union: Luxembourg 2010.
- [5] Heinemeyer C., Butz C., Keil A., Schlaich M., Goldbeck A., Trometer S., Lukic M., Chabrolin B., Lemaire A., Martin P.-O. et al. Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations; European Commission, 2009.

- [6] Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji; PN-EN 1990:2004; Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa 2004.
- [7] Živanović S., Pavic A., Reynolds P., Finite element modelling and updating of a lively footbridge: The complete process, „Journal of Sound and Vibration” 2007, 301, 126–145, doi:10.1016/j.jsv.2006.09.024.
- [8] Banaś A., Wilde K., Vibration diagnostics of footbridge with use of rotation sensor. Applied „Computer Science” 2014, 10, 38–49.
- [9] Cross E.J., Koo K.Y., Brownjohn J.M.W., Worden K., Long-term monitoring and data analysis of the Tamar Bridge, „Mechanical Systems and Signal Processing” 2013, 35, 16–34, doi:10.1016/j.ymsp.2012.08.026.
- [10] Lievens K., Lombaert G., De Roeck G., Van den Broeck P., Robust design of a TMD for the vibration serviceability of a footbridge, „Engineering Structures” 2016, 123, 408–418, doi:10.1016/j.engstruct.2016.05.028.
- [11] Wang D., Wu C., Zhang Y., Li S., Study on vertical vibration control of long-span steel footbridge with tuned mass dampers under pedestrian excitation, „Journal of Constructional Steel Research” 2019, 154, 84–98, doi:10.1016/j.jcsr.2018.11.021.
- [12] Meng F., Wan J., Xia Y., Ma Y., Yu J., A Multi-Degree of Freedom Tuned Mass Damper Design for Vibration Mitigation of a Suspension Bridge „Applied Sciences” 2020, 10, 457, doi:10.3390/app10020457.
- [13] Jiménez-Alonso J.F., Pérez-Aracil J., Hernández Díaz A.M., Sáez A., Effect of Vinyl Flooring on the Modal Properties of a Steel Footbridge, „Applied Sciences” 2019, 9, 1374, doi:10.3390/app9071374.
- [14] Flaga A., Pańtak M., Kryteria komfortu w projektowaniu kładek dla pieszych, „Inżynieria i Budownictwo” 2004, R. 60, nr 5, 253–258.
- [15] Zóltowski K., Binczyk M., Kalitowski P., Footbridges. Dynamic Design – Selected Problems Available online: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/footbridges-dynamic-design-selected-problems> (accessed on Jul 13, 2020).
- [16] Zóltowski K., Pieszy na kładkach. Obciążenia i odpowiedź konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej: Gdańsk 2007.
- [17] Flaga A., Mosty dla pieszych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ: Warszawa 2011.
- [18] Matsumoto Y., Maeda S., Iwane Y., Iwata Y., Factors affecting perception thresholds of vertical whole-body vibration in recurrent subjects: Gender and age of subjects, and vibration duration, „Journal of Sound and Vibration” 2011, 330, 1810–1828, doi:10.1016/j.jsv.2010.10.038.
- [19] Van Emmerik T., Steele-Dunne S., Hut R., Gentine P., Guerin M., Oliveira R.S., Wagner J., Selker J., Van de Giesen N., Measuring Tree Properties and Responses Using Low-Cost Accelerometers, „Sensors” 2017, 17, 1098, doi:10.3390/s17051098.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.3240

#### PRAWIDŁOWY SPOŚÓB CYTOWANIA

Banaś Anna, 2020, Ocena komfortu pieszego na kładkach. Case study, „Builder” 08 (277). DOI: 10.5604/01.3001.0014.3240

**Streszczenie.** Trend w projektowaniu nowych kładek dla pieszych wymaga, aby były one coraz bardziej „wyszukane” i lekkie. Bardzo często jednak z tego powodu obiekty te mają pierwszą częstotliwość giętną pomostu zbliżoną do wymuszenia chodem pieszego. W niniejszej pracy przedstawiono trzy konstrukcje kładek dla pieszych. Każda z nich znalazła się w innej grupie narażenia na wystąpienie drgań rezonansowych, z uwagi na pierwszą częstotliwość drgań giętnych pomostu. Przeprowadzone badania pokazały, że kładka nad drogą S8, która znajdowała się w wysokiej grupie ryzyka, bez względu na sposób wymuszenia spełnia najwyższy poziom komfortu. W przypadku kładki w Bydgoszczy, która znalazła się w średniej grupie ryzyka, poziomy przyspieszeń były znacznie większe. Przy wymuszeniach synchronicznych zapewniały często tylko minimalny komfort jej użytkownikom. W przypadku kładki w Gdyni, mimo stosunkowo wysokiej wartości częstotliwości drgań własnych i niskiego ryzyka wystąpienia rezonansu, nawet dla bardzo małych grup pieszych, przyspieszenia były na bardzo wysokim poziomie. Kładka w normalnych warunkach eksploatacji zapewnia użytkownikom minimalny komfort. Przy wymuszeniach synchronicznych poziom komfortu jest już jednak nieakceptowalny. Przeprowadzone analizy i badania pokazują, że jednym z kluczowych elementów etapu projektowania jest analiza dynamiczna.

**Słowa kluczowe:** kładki, dynamika kładek, badania eksperymentalne, analizy MES, drgania generowane przez człowieka, kryteria komfortu

**Abstract.** ASSESSMENT OF COMFORT ON THE FOOTBRIDGES. CASE STUDY. The trend in designing new footbridges requires them to be more slender and light.

This is due to the fact that the vibration frequencies of the modern footbridges are often close to the frequencies which are induced by pedestrians. This work presents experimental tests and numerical analysis of three footbridges. Each of them was in a different group of risk of the occurrence of resonance, due to the first bending frequency of the deck. The conducted experimental research showed that the footbridge over the S8 expressway, which was in the risk group, regardless of the way of excitation, fulfilled the highest level of comfort. In the case of the footbridge in Bydgoszcz, which was in the medium risk group, the acceleration levels were much higher. For synchronous excitations, the only minimal comfort level was provided to its users. For the footbridge in Gdynia, despite the relatively high value of frequencies and low resonance risk, even for very small pedestrian groups accelerations were at a very high level. The footbridge exhibited a minimum level of comfort during normal exploitation. However, the level of comfort is unacceptable for synchronous excitations. The conducted numerical analyses and experimental test show that one of the key elements at the design stage is dynamic analysis.

**Keywords:** footbridges, footbridge dynamics, experimental test, FEM analysis, human-induced vibration, comfort criteria

#### Podziękowania:

Autorka dziękuje pracownikom Laboratorium Badań Terenowych za pomoc w przeprowadzeniu badań eksperymentalnych.

**WWW.BUILDERSCIENCE.PL**