

KŁADKI DLA PIESZYCH

Parametry analiz dynamicznych

Część 3.

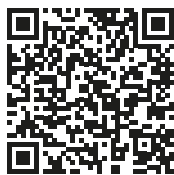
Konstrukcje podatne na oddziaływania dynamiczne, do których zalicza się również kładki dla pieszych, wymagają na etapie ich projektowania poświęcenia szerszej uwagi zagadnieniom analiz dynamicznych.



dr inż. Marek Pańtak
Politechnika Krakowska
Katedra Budowy Mostów
i Tuneli

KONKURS
DLA MŁODYCH
INŻYNIERÓW

20
17
EDYCJA I



wskazówka



Analizy dynamiczne obejmują na ogół następujące etapy:

- Etap 1. Wyznaczenie postaci i częstotliwości drgań własnych konstrukcji
- Etap 2. Wyznaczenie krytycznego zakresu częstotliwości drgań własnych
- Etap 3. Określenie parametrów analizy
- Etap 4. Określenie wartości tłumienia drgań konstrukcji
- Etap 5. Określenie wartości obciążeń dynamicznych
- Etap 6. Wyznaczenie amplitud drgań konstrukcji
- Etap 7. Ocena amplitud drgań i komfortu użytkownika konstrukcji

W dalszej części artykułu przedstawiono charakterystykę poszczególnych etapów pozwalającą wprowadzić czytelnika w złożoną tematykę analiz dynamicznych kładek dla pieszych.

Etap 1. – Wyznaczenie postaci i częstotliwości drgań własnych konstrukcji

Znajomość częstotliwości drgań własnych konstrukcji jest niezbędna do wykonania analiz dynamicznych. W przypadku analiz aerodynamicznych znajomość czę-

stotliwości drgań własnych konstrukcji pozwala m.in. na ustalenie krytycznych prędkości wiatru wywołujących drgania konstrukcji. Przykładowo w celu oceny wystąpienia efektu flutter (efektu, który doprowadził do zniszczenia mostu Tacoma Narrows w 1940 r.) istotna jest znajomość częstotliwości pierwszej postaci drgań pionowych f_V oraz pierwszej postaci drgań skrętnych f_T . W celu uniknięcia efektu flutter iloczyn częstotliwości drgań skrętnych do częstotliwości pionowych drgań giętych powinien być większy od 2,5 ($f_T f_V \geq 2,5$) [1]. Z uwagi na obszerność zagadnień dotyczących aerodynamiki mostów ich przedstawienie w krótkim artykule nie jest możliwe. Szczegółowe informacje przedstawione są m.in. w pracach [2 i 3]. Przytoczyć jednak warto istotną uwagę przedstawioną w pracy [3], stwierdzającą, że konstrukcje podatne na dynamiczne oddziaływanie wiatru to konstrukcje, których podstawowa częstotliwość drgań własnych jest mniejsza od 1,0 Hz. Znając ten warunek, pamiętać jednak należy, iż odpowiedź dynamiczna konstrukcji nie jest zależna wyłącznie od jej częstotliwości drgań własnych. Innymi słowy: występowanie częstotliwości drgań własnych

$f < 1,0$ Hz nie oznacza jeszcze obligatoryjnego wzbudzenia nadmiernych drgań konstrukcji przez wiatr. Istotną rolę w analizach dynamicznych konstrukcji odgrywają takie parametry, jak masa, sztywność i tłumienie. Rozstrzygnięcie kwestii poziomu drgań konstrukcji wymaga wyznaczenia wartości jej drgań wymuszonych z uwzględnieniem warunków środowiskowych panujących w miejscu budowy obiektu oraz ustalenia krytycznej prędkości wiatru i oszacowania ryzyka jej występowania w miejscu budowy. Jeżeli wyznaczona prędkość krytyczna ma duże prawdopodobieństwo wystąpienia w miejscu budowy, obiekt należy zabezpieczyć przed drganiami poprzez zmianę jego parametrów dynamicznych (masy, sztywności, tłumienia – montaż tłumików drgań) i/lub zmianę jego właściwości aerodynamicznych bądź w ostateczności przeprojektować go, zmieniając przekroje poprzeczne przęsła i ich rozpiętości.

W przypadku projektowania konstrukcji podwieszonych (z pomostem podwieszonym do pylonów lub łuków) konieczne jest także wyznaczenie częstotliwości drgań własnych cięgien podwieszających/wieszaków. Znajomość tych częstotliwości jest nie-

zbędna do oceny możliwości wystąpienia drgań parametrycznych ciągnięć lub ich wzbudzeń wirowych i wiatrowo-deszczowych [4, 5].

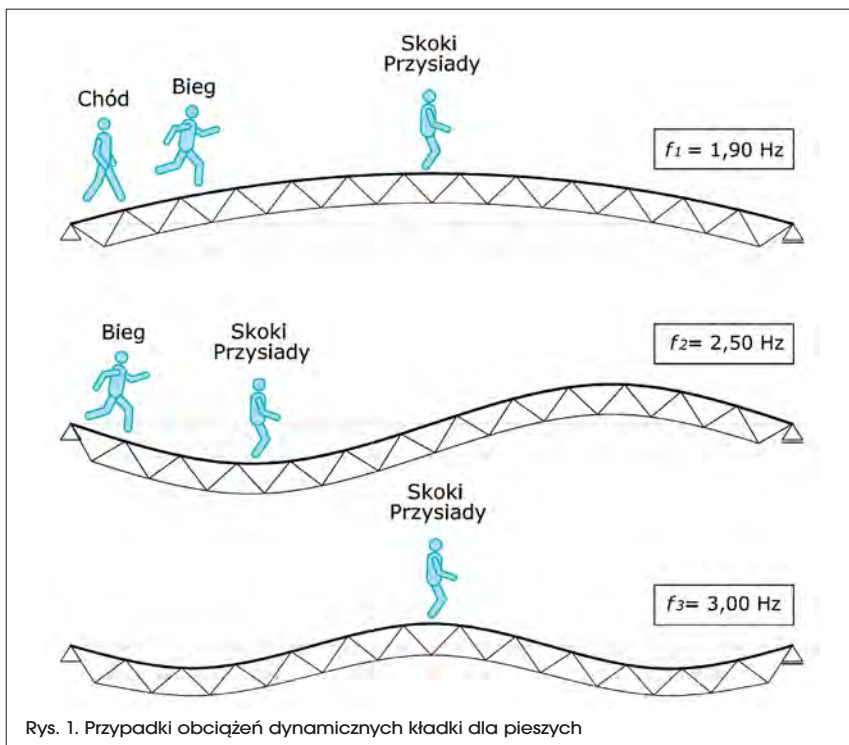
Znajomość częstotliwości i postaci drgań własnych konstrukcji jest także niezbędna w analizach drgań konstrukcji, w szczególności kładek dla pieszych, wzbudzanych przez jej użytkowników (pieszych). W analizach tych istotne są obciążenia dynamiczne (siły reakcji podłoża) powstające podczas chodu, biegu, skoków lub przysiadów. Wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań własnych konstrukcji pozwala na wyznaczenie krytycznego zakresu częstotliwości oraz ocenę ryzyka wystąpienia drgań rezonansowych konstrukcji.

Etap 2. – Wyznaczenie krytycznego zakresu częstotliwości drgań własnych

Wybór krytycznego zakresu częstotliwości drgań wymaga porównania częstotliwości drgań własnych konstrukcji z częstotliwościami podstawowych typów dynamicznych oddziaływań użytkowników. W analizach dynamicznych rozróżnić należy dwa podstawowe kierunki drgań: drgania pionowe i drgania poziome. Związane jest to z powstawaniem różnych sił reakcji podłoża podczas chodu (siły pionowe i poziome). Zauważyć należy, iż podczas chodu każde postawienie stopy na podłożu generuje siłę zwróconą ku dołowi – niezależnie od tego, czy kontakt z podłożem ma stopa prawa czy lewa. Odmienne sytuacja ta wygląda w przypadku sił poziomych. Zwroty sił poziomych, powstających podczas chodu, zależne są od tego, która stopa ma kontakt z podłożem. Siły poziome skierowane są w prawo, gdy kontakt z podłożem ma stopa prawa, lub w lewo, gdy kontakt z podłożem ma stopa lewa. Oznacza to, iż częstotliwość generowania sił poziomych f_h o tych samych zwrotach (np. sił zwróconych w prawo) jest równa połowie częstotliwości, z jaką generowane są siły pionowe f_v ($f_h = 0,5f_v$).

Przedziały częstotliwości pionowych składowych sił reakcji podłoża charakteryzujące podstawowe typy dynamicznych oddziaływań użytkowników na konstrukcję określono m.in. w pracy [6]:

- chód (zakres całkowity – 1,4–2,4 Hz):
 - wolno – 1,4–1,7 Hz,
 - normalnie – 1,7–2,2 Hz,
 - szybko – 2,2–2,4 Hz,
- bieg (zakres całkowity – 1,9–3,3 Hz):
 - wolno – 1,9–2,2 Hz,
 - normalnie – 2,2–2,7 Hz,
 - szybko – 2,7–3,3 Hz,
- skoki lub przysiady (zakres całkowity: 1,3–3,4 Hz):
 - wolno – 1,3–1,9 Hz,
 - normalnie – 1,9–3,0 Hz,
 - szybko – 3,0–3,4 Hz.



Rys. 1. Przypadki obciążeń dynamicznych kładki dla pieszych

Ryzyko rezonansu	Drgania pionowe Częstotliwość drgań własnych konstrukcji [Hz]					
	0	1,0	1,7	2,2	2,6	5,0
Maksymalne						
Średnie						
Małe						
Bardzo małe						

Tabela 1. Przedziały ryzyka rezonansu w przypadku drgań pionowych (7)

Ryzyko rezonansu	Drgania poziome Częstotliwość drgań własnych konstrukcji [Hz]					
	0	0,3	0,5	1,1	1,3	2,5
Maksymalne						
Średnie						
Małe						
Bardzo małe						

Tabela 2. Przedziały ryzyka rezonansu w przypadku drgań poziomych (7)

Częstotliwości sił poziomych powstających podczas chodu wynoszą odpowiednio: zakres całkowity 0,7–1,2 Hz, wolny chód: 0,7–0,85 Hz, chód w normalnym tempie 0,85–1,1 Hz, szybki chód: 1,1–1,2 Hz.

Jak wskazują na to liczne przykłady analiz dynamicznych oraz dynamicznych badań terenowych różnych typów kładek dla pieszych, konstrukcje o rozpiętościach przęsł przekraczających 30,0 m często charakteryzują się częstotliwościami drgań własnych pionowych mieszczącymi się w przedziałach częstotliwości pionowych oddziaływań użytkowników. W konstrukcjach o dużych rozpiętościach przęsł (np. konstrukcje podwieszane i wiszące) wzrasta ryzyko występowania drgań poziomych, poprzecznych do osi kładki, o częstotliwościach równych częstotliwościom powstawania poziomych sił reakcji podłoża podczas chodu. W ten sposób zwiększa się ryzyko wzbudzenia poziomych drgań rezonansowych pomostu. UWAGA: Poziome drgania pomostu, w kierunku po-

przecznym do kierunku ruchu pieszych, powodują zaburzenie równowagi osób idących, doprowadzając do znacznego pogorszenia komfortu użytkownika konstrukcji. Z tego powodu drgania poziome w kierunku poprzecznym do osi pomostu są groźniejsze niż drgania w kierunku pionowym. Niemniej jednak drgania pionowe występujące na konstrukcji posiadającej punkty widokowe lub miejsca do odpoczynku (np. ławki), na których przebywać mogą osoby stojące nieruchomo lub siedzące, równie mocno oddziałują na stojących lub siedzących użytkowników obiektu, powodując znaczne zaburzenie komfortu użytkownika konstrukcji. Osoby przebywające na konstrukcji nieruchomo (nieprzemierzające się) są 2-, 3-krotnie bardziej wrażliwe na drgania niż osoby będące w ruchu (osoby idące lub biegnące).

W celu oceny ryzyka wstąpienia drgań rezonansowych pionowych i poziomych oraz wyboru krytycznych zakresów częstotliwości drgań konstrukcji skorzystać można także

z zaleceń przedstawionych w pracy [7]. Zdefiniowano w niej przedziały ryzyka wzbudzeń drgań o charakterze rezonansowym kładek dla pieszych obciążonych oddziaływaniem użytkowników (tab. 1 i 2.). Porównując obliczone częstotliwości drgań własnych projektowanej konstrukcji z przedziałami ryzyka rezonansu, wyznaczyć można krytyczne zakresy częstotliwości drgań konstrukcji.

Konstrukcję należy zaprojektować tak, by ryzyko wzbudzenia jej drgań rezonansowych było małe lub bardzo małe. Jednakże przy dużej rozpiętości przeszła osiągnięcie częstotliwości drgań własnych konstrukcji $f > 2,6$ Hz (drżania pionowe) może być nieosiągalne. Z kolei obniżenie częstotliwości drgań pionowych do wartości $f < 1,0$ Hz może narazić konstrukcję na wzbudzenie drgań przez dynamiczne działanie wiatru. Równie trudne lub niemożliwe może okazać się uniknięcie przedziału rezonansowego w przypadku drgań poziomych, jeśli drżania takie wystąpią w konstrukcji. Ich uniknięcie wiąże się z koniecznością zmiany sztywności poziomej pomostu (w kierunku poprzecznym do osi kładki). Może to prowadzić do konieczności wprowadzenia istotnych zmian projektowych.

Jeśli konstrukcja charakteryzuje się częstotliwościami drgań własnych mieszczącymi się w przedziale rezonansowym, nie oznacza to jeszcze, że jej drżania będą przekraczały wartości dopuszczalne. Jak wspomniano wcześniej, amplitudy drgań konstrukcji zależne są od jej masy, sztywności i tłumienia. Znajomość częstotliwości drgań własnych konstrukcji pozwala stwierdzić możliwość wystąpienia rezonansu, nie dostarcza jednak informacji o wartościach amplitud drgań. W celu wyznaczenia amplitud drgań konieczne jest wykonanie obliczeń drgań wymuszonych.

Etap 3. – Określenie parametrów analizy

Przed przystąpieniem do analiz drgań wymuszonych należy ustalić przypadki obciążeń związane z podwyższonym ryzykiem wystąpienia rezonansu. Należy dokonać porównania częstotliwości drgań własnych konstrukcji z częstotliwościami pionowych i poziomych składowych sił reakcji podłoża dla chodu i biegu, a niekiedy także dla skoków lub przysiadów w celu wyodrębnienia typów oddziaływań mogących wywołać drżania rezonansowe. Przy tym obciążenia w postaci skoków i przysiadów traktować należy jako obciążenia intencjonalne, związane z oddziaływaniem wandalii. Tego typu zdarzenia wywołują duże wartości amplitud drgań, występują jednak rzadko i z tego powodu nie zalicza się ich do miarodajnych przypadków obciążeń dynamicznych. W analizach istotniejsze są oddziaływania osób idących lub biegnących.

Przykładowo jeśli kładka dla pieszych charakteryzuje się częstotliwościami $f_1 =$

Konstrukcje podatne na dynamiczne oddziaływanie wiatru to konstrukcje, których podstawowa częstotliwość drgań własnych jest mniejsza od 1,0 Hz, ale odpowiedź dynamiczna konstrukcji nie jest zależna wyłącznie od jej częstotliwości drgań własnych.

1,90 Hz, $f_2 = 2,50$ Hz i $f_3 = 3,00$ Hz, w dalszych analizach najistotniejsze będą oddziaływania związane z normalnym tempem chodu i biegu. Uwzględnić można także oddziaływanie w postaci skoków lub przysiadów, rozpatrując je jako zdarzenia wyjątkowe, dające obraz zachowania się konstrukcji w sytuacjach ekstremalnych (oddziaływania wandalii). Oddziaływania dynamiczne istotne w analizie dynamicznej rozważanej kładki dla pieszych przedstawiono na rys. 1. Pierwsza postać drgań własnych konstrukcji, o częstotliwości $f_1 = 1,90$ Hz, może zostać wzbudzona podczas chodu biegu i skoków. Jej częstotliwość drgań własnych mieści się w przedziale częstotliwości tych trzech typów dynamicznych oddziaływań użytkowników. Oceniając w ten sam sposób pozostałe postacie drgań, należy stwierdzić, iż druga postać drgań własnych, o częstotliwości $f_2 = 2,50$ Hz, może zostać wzbudzona podczas oddziaływań w postaci biegu lub skoków. Trzecia postać drgań własnych kładki, o częstotliwości $f_3 = 3,00$ Hz, może zostać wzbudzona za pomocą skoków oraz szybkiego biegu. Częstotliwości drugiej i trzeciej postaci drgań własnych kładki nie należą do przedziału częstotliwości chodu, co wyklucza ten typ oddziaływania z analiz dynamicznych postaci nr 2 i 3.

Powyższy przykład ilustruje oddziaływanie na kładkę pojedynczych pieszych. W analizach dynamicznych uwzględnić jednak należy również oddziaływania grup użytkowników oraz tłumy. Zalecenia dotyczące przypadków obciążenia większymi grupami pieszych przedstawiono w normie [8] w rozdziale A2.4.3 oraz w normie [9] w załączniku C, punkt C.1.2.

Realizacja etapu 3. analiz dynamicznych wymaga również ustalenia dopuszczalnych wartości drgań konstrukcji – kryterium komfortu użytkownika. Kryteria komfortu użytkownika kładek dla pieszych definiowane są jako dopuszczalne wartości przyspieszeń drgań pomostu kładki niepowodujące pogorszenia jej komfortu użytkownika. Zagadnienie kryteriów komfortu wibracyjnego i odbioru drgań przez człowieka jest problemem złożonym, zależnym od wielu czynników. Szersze informacje dotyczące tego zagadnienia zainteresowany czytelnik znajdzie m.

in. w pracy [10]. W celu oceny dopuszczalności drgań kładek dla pieszych wykorzystać można zalecenia przedstawione w rozdziale A2.4.3 normy [8], zalecenia normy [9] (załącznik C, punkt C.1.2) lub zalecenia przedstawione w pracach [7, 11, 12]. Podczas ustalania dopuszczalnych wartości przyspieszeń drgań rozróżnić należy kierunki tych drgań (pionowy i poziomy) oraz uwzględnić możliwość występowania na obiekcie osób stojących nieruchomo, narażonych na drżania (zalecenie normy [9]). Ponadto, w przypadku występowania poziomych drgań pomostu kładki (poprzecznych do osi kładki), pamiętać należy, iż przyspieszenia drgań pomostu należy ograniczyć w celu zminimalizowania możliwości wystąpienia efektu „lock-in”, polegającego na sprzężeniu zwrotnym amplitudy drgań i wartości siły wymuszającej ([7], rozdział 4.2.2). Efekt „lock-in” to główna przyczyna dużych drgań zaobserwowanych na londyńskiej kładce Millennium Bridge, wywołanych przez gęsty tłum podczas ceremonii jej otwarcia.

Etap 4. – Określenie wartości tłumienia drgań konstrukcji

W przypadku drgań o charakterze rezonansowym parametr tłumienia drgań ma istotny wpływ na wartość amplitud drgań. Amplitudy drgań konstrukcji w rezonansie są bowiem odwrotnie proporcjonalne do tłumienia drgań [13, 14]. Oznacza to, że zwiększenie tłumienia drgań konstrukcji prowadzi do redukcji amplitud jej drgań. W pracach [15, 16] wykazano, iż kładki dla pieszych charakteryzują się małym tłumieniem. W związku z tym amplitudy ich drgań rezonansowych mogą osiągać duże wartości. Wartość tłumienia drgań wykorzystaną w analizach należy ustalić rozważnie, zachowując możliwie dużą dokładność jej oszacowania.

Najczęściej wykorzystuje się w tym celu zalecenia literatury określające przedziały tłumienia drgań dla różnych typów kładek dla pieszych (stalowe, betonowe, zespolone, sprężone). Zalecenia takie odnaleźć można np. w pracach [17, 18]. Ich zestawienie przedstawiono w tabeli 3.

Wartość tłumienia drgań wykorzystywana w analizach dynamicznych może być określona jako logarytmiczny dekrement tłumienia (δ), ułamek tłumienia krytycznego ($\xi \approx \delta/2\pi$) lub jako tłumienie sztywnościowo-bezwładnościowe (tłumienie Rayleigha). W literaturze odnaleźć można najczęściej wartości δ lub ξ . W przypadku konieczności zastosowania modelu tłumienia Rayleigha wyznaczyć należy współczynniki α i β występujące w modelu. W tym celu wykorzystać można znane zależności opisujące współczynniki α i β jako funkcje częstotliwości drgań własnych konstrukcji i logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań [19, 20]. Wykonując analizy dynamiczne z wykorzystaniem pro-

Tabela 3. Ułamek tłumienia krytycznego ξ dla różnych typów kładek dla pieszych (17, 18)

Typ konstrukcji	Ułamek tłumienia krytycznego ξ		
	Wartość minimalna	Wartość średnia	Wartość maksymalna
Żelbetowa	0,8%	1,3%	1,8%
Sprężona	0,5%	1,0%	1,5%
Zespolona (stal-beton)	0,3%	0,6%	0,9%
Stalowa	0,2%	0,4%	0,6%
Drewniana	1,0%	1,5%	2,0%
Wstęgowa	0,7%	1,0%	1,3%

gramów obliczeniowych MES, bardzo ważne jest rozpoznanie i uwzględnienie w analizie właściwego parametru tłumienia drgań występującego w wykorzystywanym programie obliczeniowym (δ lub ξ). Uwzględnienie w obliczeniach niewłaściwej wartości parametru tłumienia drgań prowadzi do dużych błędów obliczeniowych.

I co dalej?

Kolejne kroki analizy dynamicznej obejmują ustalenie wartości obciążeń dynamicznych, wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji oraz ocenę wyznaczonych amplitud drgań i komfortu użytkownika konstrukcji. Etapy te zostaną scharakteryzowane w kolejnej części artykułu pt. Kładki dla pieszych – obciążenia dynamiczne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Strasky J.: Stress Ribbon and cable-supported pedestrian bridges, Thomas Telford, 2005.
- [2] Flaga A., Michalowski T.: Aerodynamika lekkich kładek dla pieszych, (on-line: <http://footbridge.pl/bibl/016.pdf>).
- [3] Flaga A.: Mosty dla pieszych, WKŁ, Warszawa, 2011.
- [4] PN-EN 1993-1-11:2008 Eurokod 3:Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-11: Konstrukcje cięgnowe, PKN, Warszawa 2008.
- [5] SETRA: Cable stays, Recommendations of French Interministerial Commission on Prestressing, SETRA, Paris 2002.
- [6] Bachmann H.: "Lively" Footbridges – a real challenge. Proc. of the 1st International Conference on Design and Dynamic Behavior of Footbridges – Footbridge 2002, OTUA, Paris, 2002.
- [7] SETRA: Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading. Service d'études techniques des routes et autoroutes – SETRA, Paris 2006.
- [8] PN-EN 1990:2004/A1:2008 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [9] ISO 10137:2007: Base for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration. 2nd ed., International Organization for Standardization, 2007.

- [10] Flaga A.: Problemy oceny wpływu drgań na ludzi znajdujących się na mostach, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3-4/2002, Warszawa 2002.
- [11] Pańtak, M., Flaga A.: Weryfikacja doświadczalna własnych kryteriów komfortu wibracyjnego użytkowników kładek dla pieszych, seminarium Wrocławskie Dni Mostowe: „Kładki dla pieszych. Architektura, projektowanie, realizacja, badania”, DWE, Wrocław 2007.
- [12] Pańtak M.: Drgania jako stan graniczny użyteczności kładek dla pieszych, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2015, Warszawa 2015.
- [13] Lewandowski R.: Dynamika konstrukcji budowlanych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [14] Pańtak M.: O dynamice i kryteriach oceny komfortu użytkownika kładek dla pieszych, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11/2017, Warszawa 2017.
- [15] Salamak M.: Doświadczalne metody określania poziomu tłumienia drgań w kładkach dla pieszych, rozprawa doktorska, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2003 (on-line: https://www.researchgate.net/profile/Marek_Salamak).
- [16] Salamak M.: Rola tłumienia drgań w kładkach dla pieszych oraz metody jego identyfikacji, Seminarium: Projektowanie, budowa i estetyka kładek dla pieszych, Politechnika Krakowska, 2003 (on-line: https://www.researchgate.net/profile/Marek_Salamak).
- [17] Heinemeyer Ch., Butz Ch. i inni: Design of lightweight footbridges for human induced vibrations. JRC Scientific and Technical Reports, Luxembourg, JRC-ECCS, 2009.
- [18] Bachmann H., Amman W., Deischi F., et al.: Vibration problems in structures – practical guidelines, 2nd edition, Birkhäuser Verlag, Basel Berlin Boston, 1997.
- [19] Kawecki J., Kowalska A.: Tłumienie drgań w opisie sztywnościowo-bezwładnościowym, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, „Czasopismo Techniczne: Budownictwo”, 3-B/2010, Zeszyt 11, 2010 (on-line: <https://suw.biblos.pk.edu.pl>).
- [20] Chopra A.K.: Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, 4 edition, Pearson, 2011.

REKLAMA

24/7 Automatyczny Monitoring Drgań

OBIEKTÓW W OTOCZENIU BUDOWY

www.SHMsystem.pl



Pierwszy na rynku
Zintegrowany System Monitorowania Drgań

DRGANIA POD PEŁNĄ KONTROLĄ!

- Zautomatyzowana kontrola drgań dowolnej liczby obiektów w otoczeniu budowy
- Prosty system finansowania – abonament za czas prowadzonych pomiarów



SHM System Sp. z o.o. Sp.k.
Libertów, ul. Jana Pawła II 82A, 30-044 Kraków
tel. +48 12 336 52 13, +48 797 185 758
e-mail: biuro@shmsystem.pl

Badanie
i Monitorowanie
Konstrukcji



SHM
SYSTEM