



Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa
Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

DYPLOM

w konkursie autorskim artykułów wyróżniających się
ujęciem tematyki i przydatnością praktyczną, opublikowanych
na łamach miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” w roku 2021

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

przyznała

I NAGRODĘ

za artykuł pt. „Tłumienie drgań i wybrane metody modyfikacji
parametrów dynamicznych stalowych kładek dla pieszych” (nr 5-6/2021).

Laureatami zostali

Dr inż. MAREK PAŃTAK
Mgr inż. KINGA MARECIK

SERDECZNIE GRATULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego


Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

W imieniu Rady Programowej


Prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Przewodnicząca Rady

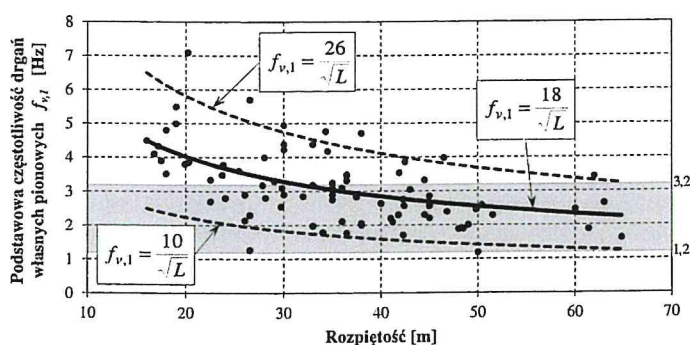
Warszawa, czerwiec 2022 r.

Tłumienie drgań i wybrane metody modyfikacji parametrów dynamicznych stalowych kładek dla pieszych

Projektowanie kładek dla pieszych wiąże się z koniecznością weryfikacji wymagań stanów granicznych nośności i użyteczności. Stany graniczne użyteczności uważa się za przekroczone, jeżeli w konstrukcji wystąpią nadmierne ugięcia, zarysowania lub nadmierne drgania, dokuczliwe dla użytkowników (powodujące dyskomfort ludzi, ograniczające przydatność użytkowania konstrukcji) lub powodujące uszkodzenia konstrukcji obiektu oraz jego wyposażenia [1÷4]. W celu spełnienia wymagań użytkowych konstrukcja powinna zachowywać się właściwie pod działaniem obciążeń statycznych i dynamicznych. Projektowanie konstrukcji wyłącznie według zasad statyki budowli może prowadzić do błędów w ocenie jej właściwości użytkowych. W skrajnych przypadkach użytkowanie konstrukcji może się okazać niemożliwe z powodu nadmiernych drgań.

Podatność dynamiczna stalowych kładek dla pieszych

Na rysunku 1 zestawiono podstawowe częstotliwości pionowych drgań własnych stalowych kładek dla pieszych (104 kładki o zróżnicowanych układach konstrukcyjnych) w odniesieniu do przedziału częstotliwości kroków chodu i biegu, odpowiednio: $f_v = 1,20 \div 2,40$ Hz; $f_v = 2,40 \div 3,20$ Hz (opracowanie własne na podstawie tabl. 1 oraz prac [5, 6]).



Rys. 1. Podstawowe częstotliwości pionowych drgań własnych stalowych kładek dla pieszych w funkcji rozpiętości przęsła w odniesieniu do przedziału częstotliwości kroków chodu i biegu $1,20 \div 3,20$ Hz (opracowanie własne na podstawie badań własnych (tabl. 1) oraz [5, 6])

Należy nadmienić, że w przedziale częstotliwości $f_v = 1,20 \div 3,20$ Hz znajduje się duża liczba kładek o rozpiętości przęsła $L \geq 25,0$ m. W przypadku tych konstrukcji jest zwiększone ryzyko wzbudzenia drgań o charakterze rezonansowym. Zawężenie rozpatrywanego przedziału do częstotliwości kroków chodu w normalnym tempie $f_v = 1,80 \div 2,20$ Hz wskazuje, że podatne na takie oddziaływanie mogą się okazać kładki o rozpiętości przęsła $L \geq 35,0$ m.

Należy jednak zauważyć, że analiza częstotliwości drgań własnych konstrukcji jest wyłącznie pierwszym etapem oceny jej podatności dynamicznej na oddziaływania dynamiczne generowane przez użytkowników. Częstotliwość mieszcząca się w przedziale częstotliwości kroków wskazuje wyłącznie na podwyższone ryzyko wzbudzenia drgań konstrukcji, nie może jednak być jedyną podstawą oceny konstrukcji. W celu poprawnej oceny podatności dynamicznej konstrukcji i weryfikacji wymagań stanów granicznych użyteczności z uwagi na drgania jest wymagane wykonanie analizy drgań wzbudzonych konstrukcji i wyznaczenie jej odpowiedzi dynamicznej, tj. wyznaczenie wartości maksymalnych lub wartości skutecznych amplitud przyspieszeń drgań. W tych analizach jest istotne przyjęcie właściwej wartości współczynnika tłumienia drgań.

Tłumienie drgań w stalowych kładkach dla pieszych

Jak wykazano w pracach [7, 8], w kładkach dla pieszych jest widoczna wyraźna dominacja małego tłumienia (logarytmiczny dekrement tłumienia $\delta < 10\%$). W przypadku wymuszenia dynamicznego o charakterze rezonansowym (np. wymuszenie generowane przez osoby idące lub biegnące na kładkach dla pieszych) wartość tłumienia drgań ma zasadnicze znaczenie. Jeżeli częstotliwość siły wymuszającej jest równa częstotliwości drgań własnych układu ($f_p = f_u$, rezonans), to amplituda drgań układu zależy w sposób odwrotnie proporcjonalny od wartości tłumienia drgań układu (1) [9]

$$A_u = \frac{P}{2\pi f_p C}, \quad (1)$$

gdzie:

A_u – amplituda drgań wymuszonych układu,
 P – amplituda siły wymuszającej,
 f_p – częstotliwość siły wymuszającej,
 C_u – współczynnik tłumienia drgań układu ($C_u = 4\pi\xi_u M_u f_u$;
 ξ_u – ułamek tłumienia krytycznego układu, M_u – masa układu, f_u – częstotliwość drgań własnych układu).

W praktyce inżynierskiej są stosowane różne metody opisu właściwości tłumiących układu drgającego. Szersze omówienie tych zagadnień można znaleźć m.in. w pracach [9÷19]. Jako miary tłumienia używa się przykładowo logarytmicznego dekrementu tłumienia δ , ułamka tłumienia krytycznego $\xi \approx \delta/2\pi$, współczynnika rozpraszania ψ zdefiniowanego jako iloraz energii rozproszonej w trakcie jednego okresu drgań i maksymalnej energii potencjalnej układu drgającego. Często jest także wykorzystywany model tłumienia Rayleigha (model tłumienia masowo-szywnościowego), wymagający wyznaczenia współczynników proporcjonalności określających wpływ masy

Tablica 1

Podstawowe częstotliwości drgań własnych i logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań δ 30 kładek dla pieszych o różnych układach konstrukcyjnych (wyniki badań własnych, fot. własne)

Lp.	Lokalizacja kładki	Widok konstrukcji	Charakterystyka konstrukcji	Logarytmiczny dekrement tłumienia drgań δ , %
1.	Brno, Czechy		trzy przęsła $L = 8,5+27,5+8,5$ m, pomost ortotropowy (uźebrowana płyta stalowa), przęsła boczne zakotwione w przyczółkach, $f = 5,83$ Hz – drgania pionowe	4,6÷5,4
2.	Beroun, Czechy		trzy przęsła $L = 21+42+21$ m, dwa stalowe dźwigary skrzynkowe $1,15 \times 0,35$ m, pomost ażurowy (krata pomostowa), $f = 2,88$ Hz – drgania pionowe	4,0÷4,8
3.	Kraków, Polska		dwa przęsła $L = 35+32,5$ m, stalowy dźwigar skrzynkowy, nawierzchnia epoksydowa, $f = 2,68$ Hz – drgania pionowe	9,0÷12,0
4.	Ludźmierz, Polska		trzy przęsła $L = 16+36+16$ m, dwa dźwigary kratowe, nawierzchnia asfaltowa 4,0 cm $f = 3,19$ Hz – drgania pionowe	2,9–4,8
5.	Eberswalde, Niemcy		trzy przęsła $L = 13,5+30+13,5$ m, dwie belki <i>Vierendeela</i> (kratownice bez krzyżulców), stalowy pomost ortotropowy (uźebrowana płyta stalowa), $f = 4,98$ Hz – drgania pionowe	5,7÷6,6
6.	Kassel, Niemcy		sześć przęseł $L = 19,2+24+21+36+21+12$ m, stalowa kratownica przestrzenna z pomostem z betonu UHPC, $f = 3,47$ Hz – drgania pionowe	2,2÷3,2
7.	Trstena, Słowacja		jedno przęsło $L = 35$ m, dwa dźwigary kratowe, pomost stalowy – płyta stalowa bez zeber podłużnych i bez nawierzchni, $f = 2,98$ Hz – drgania pionowe	3,6÷4,1
8.	Kraków, Polska		jedno przęsło $L = 35$ m, dwa dźwigary kratowe, pomost ortotropowy (uźebrowana płyta stalowa), nawierzchnia epoksydowa $f = 2,71$ Hz – drgania pionowe	6,8÷9,2
9.	Frydek Mistek, Czechy		jedno przęsło $L = 45$ m, dwa dźwigary kratowe, pomost zespolony (blacha trapezo- wa wypełniona betonem), nawierzchnia asfaltowa, przęsło zakotwione w przyczółkach, $f = 3,30$ Hz – drgania pionowe	5,1÷6,2
10.	Svatava, Czechy		jedno przęsło $L = 34$ m, pomost drewniany oparty na ruszcie stalowym, przęsło zakotwione w przyczółkach, $f = 4,88$ Hz – drgania pionowe	9,6÷11,0
11.	Rožnov pod Radhoštěm, Czechy		jedno przęsło $L = 42$ m, dwa dźwigary kratowe, pomost zespolony (blacha trapezo- wa wypełniona betonem), nawierzchnia asfaltowa, $f = 3,76$ Hz – drgania pionowe	2,6÷3,3

cd. tablicy 1

Lp.	Lokalizacja kładki	Widok konstrukcji	Charakterystyka konstrukcji	Logarytmiczny dekrement tłumienia drgań δ , %
12.	Brno-Obřany, Czechy		jedno przęsło $L = 33$ m, dwa dźwigary kratowe, pomost betonowy zespolony z pasami dolnymi kratownic, nawierzchnia epoksydowa, $f = 4,30$ Hz – drgania pionowe	5,7÷6,6
13.	Biecz, Polska		jedno przęsło $L = 47$ m, dźwigar – kratownica przestrzenna, pomost stalowy – płyta stalowa na podłużnych belkach walcowanych, nawierzchnia epoksydowa, $f = 2,38$ Hz – drgania pionowe	3,9÷4,8
14.	Sławice, Polska		Jedno przęsło $L = 44,8$ m, dźwigar – kratownica przestrzenna, pomost stalowy – płyta stalowa na podłużnych belkach walcowanych, nawierzchnia asfaltowa 4,0 cm, $f = 2,50$ Hz – drgania pionowe	2,1÷2,6
15.	Osjaków, Polska		jedno przęsło $L = 50$ m, dźwigar – kratownica przestrzenna, pomost stalowy – płyta stalowa na podłużnych belkach walcowanych, nawierzchnia epoksydowa, $f = 2,39$ Hz – drgania pionowe	0,72÷1,33
16.	Kraków, Polska		jedno przęsło $L = 30$ m, dźwigar – kratownica przestrzenna, pomost stalowy – płyta ortotropowa nawierzchnia epoksydowa, $f = 4,21$ Hz – drgania pionowe	4,9÷6,3
17.	Jaroměř, Czechy		jedno przęsło $L = 60,4$ m, konstrukcja stalowa z pasem dolnym z liny stalowej, pomost ażurowy (krata pomostowa), $f = 0,98$ Hz – drgania poprzeczne, $f = 2,48$ Hz – drgania skrętne	1,9÷2,3 (poprzeczne), 0,25÷0,32 (skrętne)
18.	Węgierska Górka, Polska		jedno przęsło $L = 51,3$ m, pomost drewniany na ruszcie stalowym, $f = 1,44$ Hz – drgania pionowe	2,6÷3,3
19.	Wola Wieruszycka, Polska		jedno przęsło $L = 63$ m, pomost betonowy (prefabrykowane płyty betonowe) na ruszcie stalowym, $f = 2,68$ Hz – drgania pionowe	3,6÷4,8
20.	Korwinów, Polska		jedno przęsło $L = 32,0$ m, pomost ortotropowy (uźebrowana płyta stalowa), nawierzchnia epoksydowa, $f = 3,11$ Hz – drgania pionowe	7,1÷10,5
21.	Beroun, Czechy		jedno przęsło $L = 37,5$ m, konstrukcja typu network arch, pomost drewniany na ruszcie stalowym, $f = 4,88$ Hz – drgania pionowe	17,6÷23,3
22.	Włocławek, Polska		jedno przęsło $L = 41,8$ m, pomost drewniany na ruszcie stalowym wspartym od spodu na sprężonej linie stalowej, $f = 2,44$ Hz – drgania pionowe	17,4÷19,8
23.	Cieszyn (granica polsko-czeska)		cztery przęsła $L = 17+45+18+13$ m, dźwigar główny skrzynkowy, $f = 2,85$ Hz – drgania pionowe	2,4÷3,5

cd. tablicy 1

Lp.	Lokalizacja kładki	Widok konstrukcji	Charakterystyka konstrukcji	Logarytmiczny dekrement tłumienia drgań δ , %
24.	Łapanów, Polska		jedno przęsło $L = 45$ m, pomost drewniany na ruszcie stalowym, $f = 2,14$ Hz – drgania pionowe	4,4÷5,8
25.	Plzeň, Czechy		jedno przęsło $L = 46$ m, pomost ortotropowy (uźebrowana płyta stalowa), nawierzchnia asfaltowa, $f = 3,98$ Hz – drgania pionowe	4,8÷6,4
26.	Řež, Czechy		trzy przęsła $L = 37,3+62,3+37,3$ m, pomost drewniany na ruszcie stalowym, $f = 3,32$ Hz – drgania pionowe	1,7÷2,4
27.	Tvrdošín, Słowacja		jedno przęsło $L = 65$ m, pomost drewniany na ruszcie stalowym, $f = 1,60$ Hz – drgania pionowe	1,3÷1,6
28.	Kielce, Polska		dwa przęsła $L = 12,7+29$ m, pomost stalowy – płyta stalowa na podłużnych belkach walcowanych, nawierzchnia epoksydowa, $f = 2,52$ Hz – drgania pionowe	3,7÷4,5
29.	Piwniczna Zdrój, Polska		jedno przęsło $L = 102$ m, konstrukcja wisząca, pomost ortotropowy (uźebrowana płyta stalowa), $f = 2,18$ – drgania pionowe	2,5÷3,2
30.	Beroun, Czechy		trzy przęsła $L = 31,2+61,4+31,2$ m, konstrukcja wisząca, pomost drewniany na ruszcie stalowym, drewniane balustrady, $f = 1,90$ Hz – drgania skrętne	3,0÷5,8

i sztywności układu na wartość tłumienia. Współczynniki te można wyznaczyć, znając częstotliwości drgań własnych układu ($\omega_u = 2\pi f_u$) oraz wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia δ lub ułamka tłumienia krytycznego ξ .

W celu ustalenia wartości δ lub ξ najczęściej wykorzystuje się zalecenia literaturowe określające przedziały tych wartości w przypadku różnych rodzajów kładek dla pieszych (stalowe, betonowe, zespolone, sprężone itd.). Zalecenia takie odnaleźć można przykładowo w pracach [5, 20, 21], a ich zestawienie przedstawiono w tabl. 2.

Wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia δ ustalone na podstawie badań własnych 30 kładek stalowych o zróżnicowanych układach konstrukcyjnych zestawiono w tabl. 1. Wartości te zostały wyznaczone na podstawie zapisów drgań swobodnych każdej konstrukcji zarejestrowanych po wzbudzeniu drgań przez jedną osobę biegnącą z częstotliwością kroków odpowiadającą częstotliwości drgań własnych konstrukcji wyznaczanej przez metronom elektroniczny. W trakcie rejestracji drgań

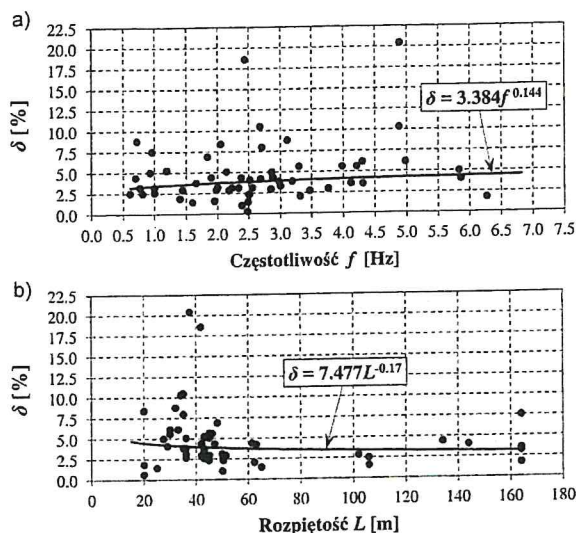
Tablica 2

Logarytmiczny dekrement tłumienia δ różnych rodzajów kładek dla pieszych [5, 20, 21]

Typ konstrukcji	Wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia δ , %		
	minimalna	średnia	maksymalna
Żelbetowa	5,0	8,2	11,3
Sprężona	3,1	6,3	9,4
Zespolona (stal-beton)	1,9	3,8	5,7
Stalowa	1,3	2,5	3,8
Drewniana	6,3	9,4	12,6
Wstęgowa	4,4	6,3	8,2

konstrukcja była zamknięta dla ruchu pieszych i nie przebywały na niej żadne osoby.

Na rysunku 2 przedstawiono wartości δ (por. tabl. 1) uzupełnione o wartości δ przedstawione w pracy [20] dla kładek stalowych w funkcji częstotliwości drgań (rys. 2a) i w funkcji rozpiętości przęsła (rys. 2b). Logarytmiczny



Rys. 2. Średnie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań 58 stalowych kładek dla pieszych przyjmując wartość $\delta \leq 5\%$ ($\approx 72\%$ wyników badań; por. rys. 2). Dwie wartości wyraźnie odbiegające od pozostałych wyników zostały zarejestrowane na łukowych kładkach dla pieszych z pomostem podwieszonym do łuków (konstrukcje nr 21 i 22; por. tabl. 1). Konstrukcja nr 21 w mieście Beroun to konstrukcja z siatkowym układem wieszaków typu network arch z pomostem drewnianym ułożonym na ruszcie stalowym opartym na obu końcach na łożyskach elastomerowych i dodatkowo połączonych z przyczółkami za pomocą tłumików ciernych (tarcowych) zlokalizowanych w środku poprzecznic podporowych (rys. 3). Konstrukcja nr 22, zlokalizowana we Wrocławku, to kładka o nietypowym układzie konstrukcyjnym zawierającym złożony system podwieszenia i podparcia pomostu (rys. 4) oraz podwieszone do pomostu izolowane rury ciepłownicze połączone z korpusem przyczółka. Rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w tych obiektach wpłynęły na wyraźne zwiększenie tłumienia drgań.

dekrement tłumienia w przypadku znacznej części stalowych kładek dla pieszych przyjmuje wartość $\delta \leq 5\%$ ($\approx 72\%$ wyników badań; por. rys. 2). Dwie wartości wyraźnie odbiegające od pozostałych wyników zostały zarejestrowane na łukowych kładkach dla pieszych z pomostem podwieszonym do łuków (konstrukcje nr 21 i 22; por. tabl. 1). Konstrukcja nr 21 w mieście Beroun to konstrukcja z siatkowym układem wieszaków typu network arch z pomostem drewnianym ułożonym na ruszcie stalowym opartym na obu końcach na łożyskach elastomerowych i dodatkowo połączonych z przyczółkami za pomocą tłumików ciernych (tarcowych) zlokalizowanych w środku poprzecznic podporowych (rys. 3). Konstrukcja nr 22, zlokalizowana we Wrocławku, to kładka o nietypowym układzie konstrukcyjnym zawierającym złożony system podwieszenia i podparcia pomostu (rys. 4) oraz podwieszone do pomostu izolowane rury ciepłownicze połączone z korpusem przyczółka. Rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w tych obiektach wpłynęły na wyraźne zwiększenie tłumienia drgań.

Przy zwiększonym ryzyku wzbudzenia drgań o charakterze rezonansowym przez użytkowników (por. rys. 1) oraz wyraźnej dominacji małego tłumienia w kładkach dla pieszych o konstrukcji stalowej (por. rys. 2) potwierdza się teza o ich większej podatności dynamicznej w porównaniu z innymi obiektami mostowymi.

Modyfikacja parametrów dynamicznych kładek dla pieszych

Z matematycznego punktu widzenia drgania można zmniejszyć trzema metodami [10]:

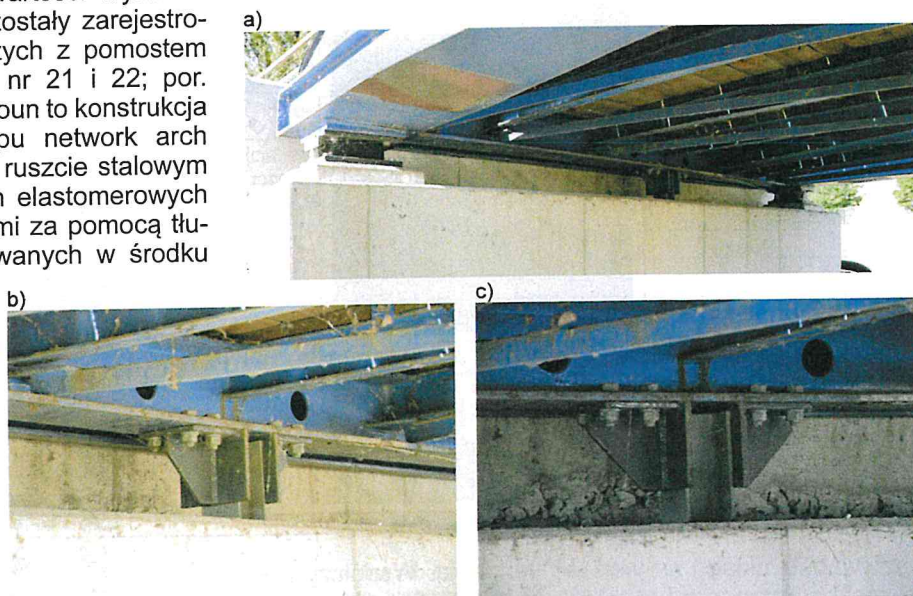
1) zmniejszając amplitudę siły wymuszającej;

2) zwiększając różnicę między częstotliwością drgań swobodnych i częstotliwością wymuszenia, aby nie wywoływać drgań rezonansowych;

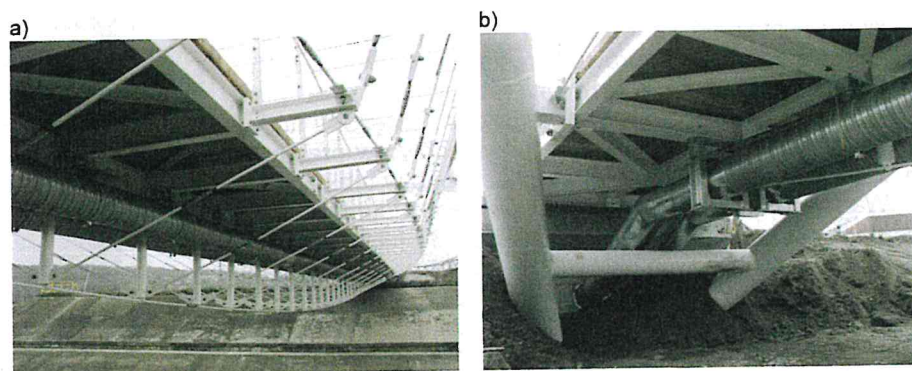
3) zwiększając tłumienie układu.

Realizacja pierwszej metody w przypadku kładek dla pieszych wiązałaby się z koniecznością wprowadzenia ograniczeń ruchu na konstrukcji, zmniejszając w ten sposób jej przydatność użytkową. Takie rozwiązanie mogłoby być rozwiązaniem tymczasowym (np. na czas modernizacji konstrukcji), jednak nie powinno być rozwiązaniem docelowym (długoterminowym).

Drugą metodę można zrealizować przez zmianę ogólnego schematu konstrukcji, zmianę długości przęsła (jeżeli jest to dopuszczalne), zwiększenie masy kładki (jeżeli nie doprowadzi to do zwiększenia podatności obiektu na dynamiczne oddziaływanie wiatru) lub przez usztywnienie konstrukcji [22÷25]. Decydując się na modyfikację masy lub sztywności konstrukcji, należy pamiętać, że w przypadku wzbudzeń dynamicznych o charakterze rezonansowym, zmiany masy lub sztywności konstrukcji, stosunkowo łatwe do wprowadzenia na etapie projektowania obiektu, nie prowadzą do istotnego zmniejszenia amplitud drgań rezonansowych. Modyfikacje masy i sztywności obiektu efektywnie wpływają na zmianę częstotliwości drgań własnych obiektu. Tego rodzaju modyfikacje



Rys. 3. Widok tłumika ciernego zastosowanego w kładce dla pieszych w miejscowości Beroun, Czechy (fot. własne)



Rys. 4. Detale konstrukcyjne kładki we Wrocławku: a) widok rusztu stalowego i cięgien tworzących pomost kładki wraz z rurami ciepłowniczymi, b) połączenie izolowanych rur ciepłowniczych z przyczółkiem (fot. własne)

znacznie mniej efektywnie wpływają na redukcję amplitud drgań w rezonansie.

Na przykładzie dwóch kładek dla pieszych zrealizowanych w Republice Czeskiej przedstawiono przykłady modyfikacji masy konstrukcji (rys. 5 i 6).

W przypadku kładki w miejscowości Hýskov (kładka dwuprzęsłowa, rozpiętości przęseł 17,17 + 68,83 m) pod pomostem kładki umieszczono zestaw płyt żelbetowych grubości 20 cm, o wymiarach 250×250 cm (w ¼ i ¾ roz-

piętości przęsła głównego, masa płyty $G \approx 3,1$ t), 350×250 cm (w połowie rozpiętości przęsła głównego, masa płyty $G \approx 4,4$ t), 230×250 cm (w pobliżu przyczółka, masa płyty $G \approx 2,9$ t) oraz 450×250 cm (w strefie przypylonowej, masa płyty $G \approx 5,6$ t). W tej kładce zastosowano również strojony tłumik masowy zlokalizowany w przęśle głównym (w odległości 25,8 m od przyczółka, masa drgająca $m_t = 1,5$ t) oraz cztery tłumiki cierne: dwa zlokalizowane na przyczółku, na końcu przęsła głównego (por. rys.

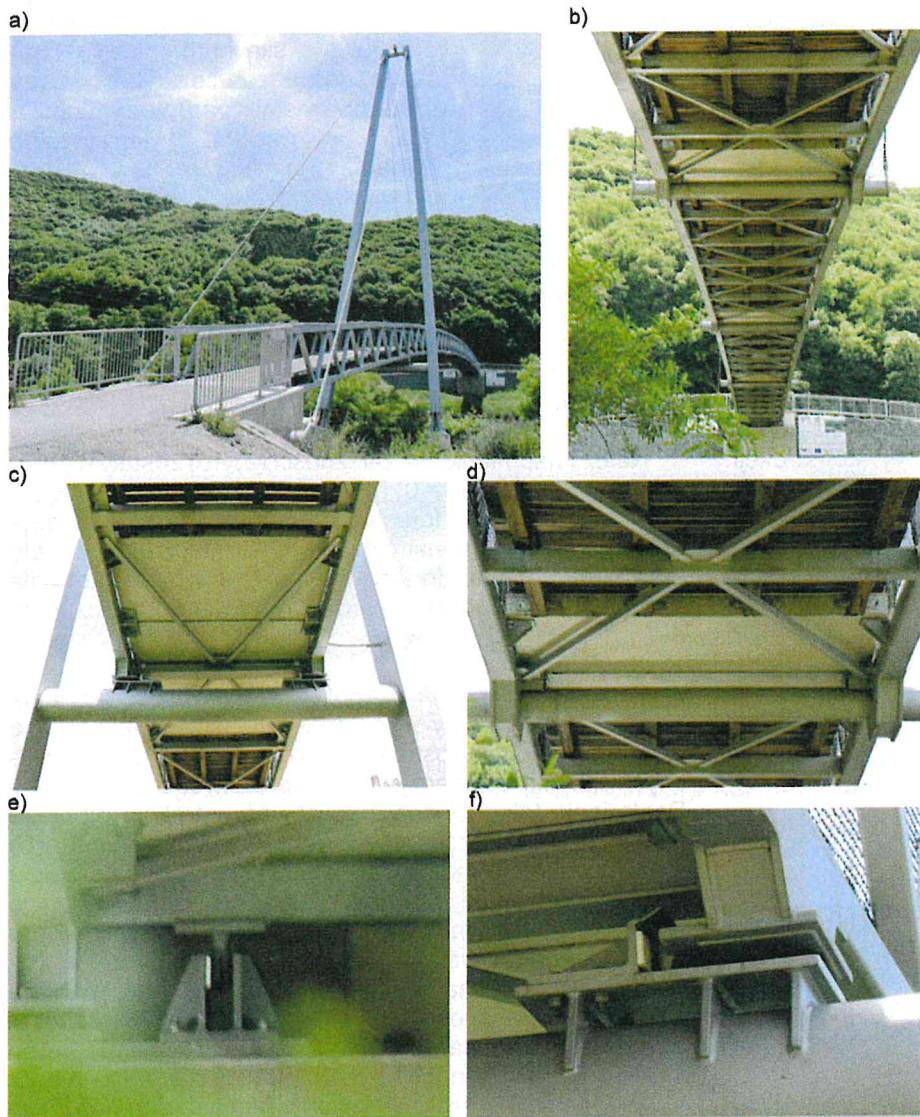
5e) oraz dwa w miejscu podparcia pomostu na poprzecznej belce w obrębie pylonu (por. rys. 5f).

Kładka wisząca w miejscowości Týnec nad Sázavou (konstrukcja trójpřesłowa 32,5 + 65,0 + 32,5 m, dźwigary z drewna klejonego, pomost drewniany; por. rys. 6) stanowi kolejny przykład modyfikacji masy konstrukcji. W tej kładce masę pomostu zmodyfikowano, umieszczając pod pomostem (w obrębie przęseł bocznych i przęsła głównego) cztery zestawy belek żelbetowych. Jeden zestaw składał się z dwóch belek o wymiarach 21×12×700 cm (masa jednej belki $G = 440$ kg) oraz dwóch belek o wymiarach 31×10×700 cm (masa jednej belki $G = 540$ kg; por. rys. 6b). Takie zestawy belek umieszczono w strefie maksymalnych rzędnych pionowej postaci drgań własnych konstrukcji, tzn. w połowie rozpiętości przęseł bocznych oraz w okolicach ¼ i ¾ rozpiętości przęsła głównego. Łączna masa belek w jednej lokalizacji wyniosła $\Sigma G = 2 \cdot 440 + 2 \cdot 540 = 1960$ kg ($\approx 2,0$ t).

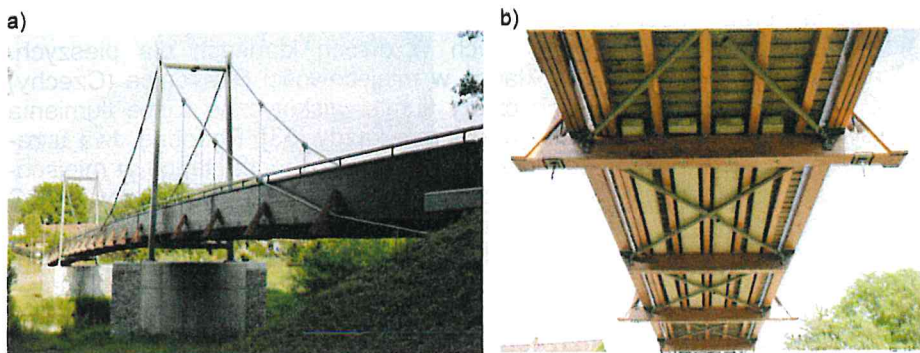
W przypadku wzbudzeń rezonansowych najbardziej efektywna jest realizacja trzeciej koncepcji redukcji drgań układu przez zwiększenie tłumienia drgań. Ta koncepcja jest zazwyczaj związana z instalacją na konstrukcji pomocniczych urządzeń tłumiących w postaci strojonych tłumików masowych (Tuned Mass Damper – TMD). Innym sposobem jest wykorzystanie tłumików wiskotycznych (w formie rurowych amortyzatorów) montowanych w obrębie podpór pomostu.

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe konstrukcje tłumików masowych przeznaczonych do tłumienia drgań pionowych (por. rys. 7a) oraz poziomych (por. rys. 7b).

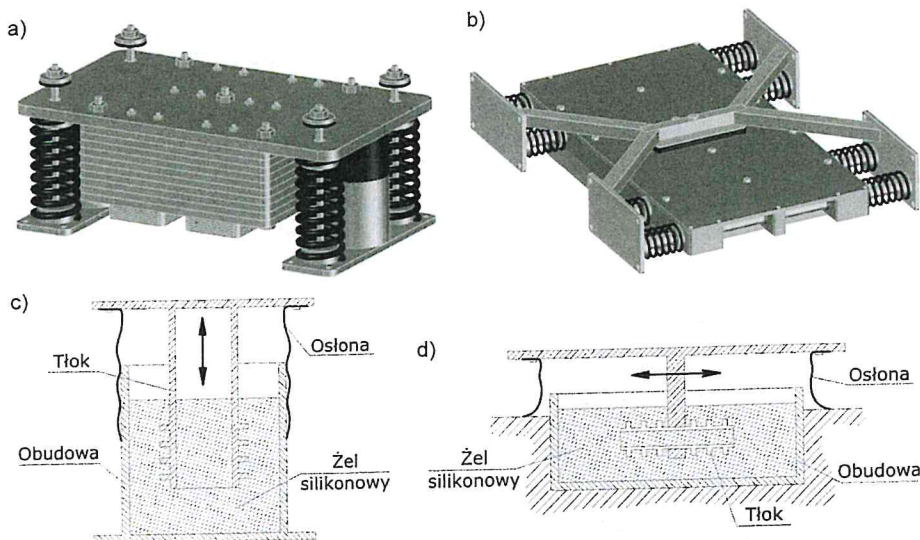
Tłumiki te składają się z przemieszczającej się masy, zestawu sprężyn o odpowiednim współczynniku sprężystości oraz z elementu tłumiącego, np. tłumika wiskotycznego (por. rys. 7c, d) wykonanego z wykorzystaniem żelu (oleju) silikonowego o bardzo dużej lepkości dynamicznej.



Rys. 5. Widok i detale konstrukcyjne kładki w miejscowości Hýskov, Czechy (opis w tekście, fot. własne)

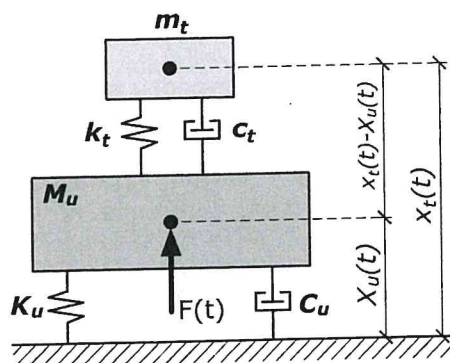


Rys. 6. Widok i detale konstrukcyjne kładki w miejscowości Týnec nad Sázavou, Czechy (opis w tekście, fot. własne)



Rys. 7. Przykłady strojonych tłumików masowych przeznaczonych do tłumienia drgań: a) pionowych, b) poziomych, c) i d) schematy tłumików wiskotycznych (opracowanie własne na podstawie [9, 10, 22, 23, 26÷29])

Projektowanie strojonych tłumików masowych jest oparte na analizie układu o dwóch stopniach swobody (rys. 8). Pierwszym etapem obliczeń jest wyznaczenie parametrów dynamicznych analizowanej konstrukcji: masy modalnej (M_u), sztywności modalnej (K_u), odpowiadających określonej postaci drgań oraz ustalenie wartości współczynnika tłumienia drgań układu (C_u). Sztywność modalna jest zazwyczaj wyznaczana na podstawie wartości masy modalnej i częstotliwości drgań własnych układu $K_u = 4\pi^2 f_u^2 M_u$. W celu wyznaczenia współczynnika tłumienia jest konieczna znajomość ułamka tłumienia krytycznego analizowanej konstrukcji ξ_u , stąd $C_u = 4\pi\xi_u M_u f_u$.



Rys. 8. Schemat działania strojonego tłumika masowego (układ o dwóch stopniach swobody)

Kolejny etap jest związany z określeniem masy tłumika $m_t = (0,01 \div 0,10) M_u$, zazwyczaj $m_t = (0,01 \div 0,05) M_u$, oraz wyznaczeniem optymalnych wartości częstotliwości drgań tłumika $f_{t,opt}$ i współczynnika tłumienia tłumika $\xi_{t,opt}$.

Optymalne parametry tłumika wyznaczyć należy stosownie do przyjętego kryterium optymalizacyjnego (np. minimalizacja amplitud przemieszczeń drgającego układu lub minimalizacja przyspieszeń drgań układu) oraz natury i sposobu przyłożenia obciążenia dynamicznego (np. siła harmonicznym zmienna o stałej częstotliwości działająca bezpośrednio na układ (na masę M_u) lub przyspieszenie losowe działające na fundament układu).

W przypadku dążenia do minimalizacji przemieszczeń układu obciążonego siłą harmoniczną działającą bezpośrednio na drgający układ (na masę M_u) optymalne para-

metry tłumika można wyznaczyć, wykorzystując równania (2) i (3) [30, 31, 23]:

$$f_{t,opt} = \frac{f_u}{1 + \mu}, \quad (2)$$

$$\xi_{t,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}}. \quad (3)$$

W przypadku dążenia do minimalizacji przyspieszeń drgań układu obciążonego siłą harmoniczną działającą bezpośrednio na drgający układ optymalne parametry tłumika można wyznaczyć, wykorzystując równania (4) i (5) [31]:

$$f_{t,opt} = \frac{f_u}{\sqrt{1 + \mu}}, \quad (4)$$

$$\xi_{t,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{4(2 + \mu)(1 + \mu)}}, \quad (5)$$

gdzie:

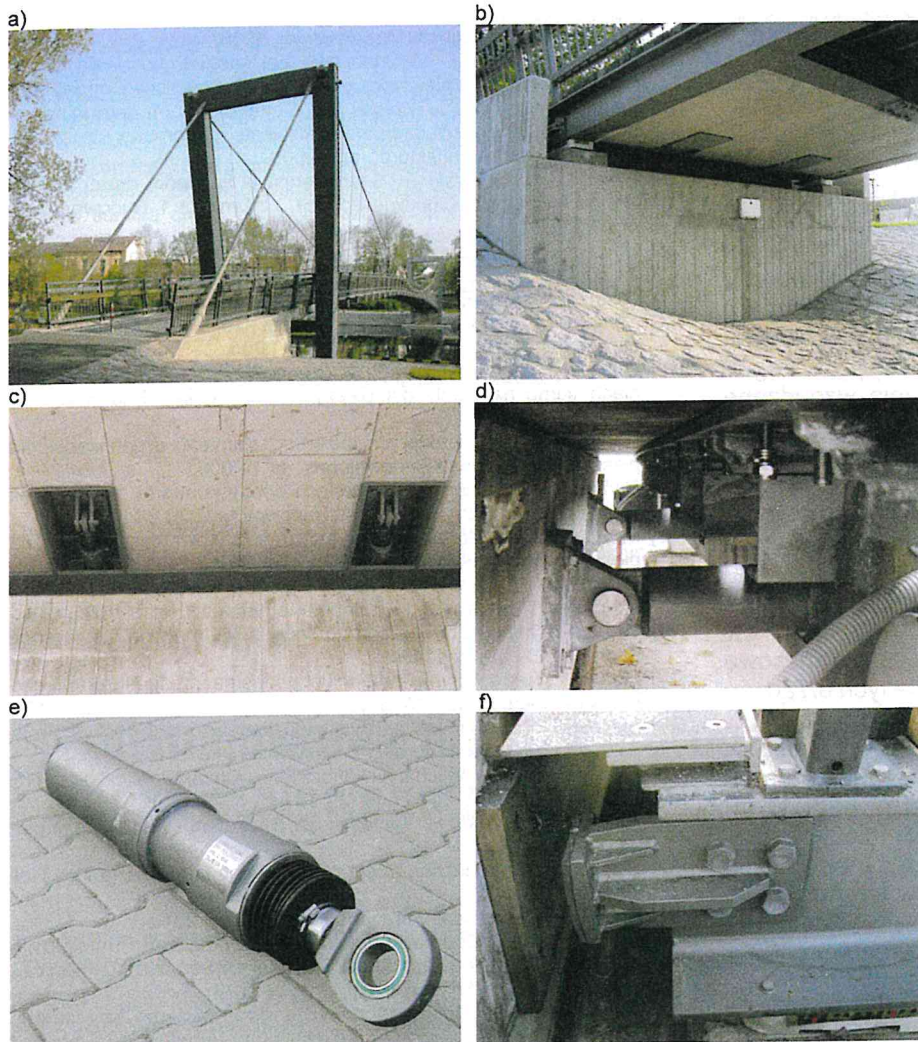
f_u – częstotliwość drgań własnych układu, Hz,

$\mu = m_t/M_u$ – zazwyczaj $\mu = 0,01 \div 0,05$.

Należy nadmienić, że zależności (2)÷(5) zostały wyznaczone dla $\xi_u = 0$ ($C_u = 0$) [30, 31]. W przypadku rzeczywistych konstrukcji, w których $\xi_u \neq 0$, parametry te wymagają „dostrojenia”. W konstrukcjach charakteryzujących się małym tłumieniem, do których należą stalowe kładki dla pieszych, zależności (2)÷(5) stanowią wystarczająco dokładne przybliżenie wartości $f_{t,opt}$, $\xi_{t,opt}$ do praktycznego zastosowania [26].

W celu osiągnięcia właściwej efektywności tłumienia drgań przez pasywny tłumik masowy szczególnie istotne jest odpowiednie dostrojenie częstotliwości drgań własnych tłumika do rzeczywistej częstotliwości optymalnej. Dostrojenie takie można zrealizować w trakcie montażu tłumika na konstrukcji przez zwiększenie lub zmniejszenie masy tłumika. Tę możliwość należy przewidzieć na etapie jego projektowania. Mniejszy wpływ na poprawną pracę tłumika ma parametr tłumienia ξ_t [26]. Tłumienie to powinno osiągać wartość możliwie zbliżoną do teoretycznej wartości optymalnej, jednak może być zrealizowane z mniejszą dokładnością. Informacje dotyczące wyznaczania optymalnych parametrów strojonych tłumików drgań można znaleźć m.in. w pracach [10, 31÷52].

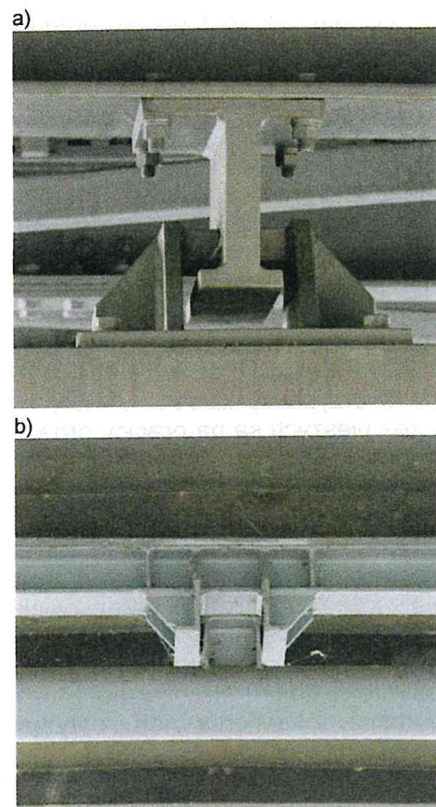
Innym sposobem zwiększenia tłumienia drgań konstrukcji może być wykorzystanie tłumików ciernych (por. rys. 3 i rys. 5e, f) lub rurowych tłumików wiskotycznych zamontowanych w obrębie podpór pomostu. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przykłady zastosowania tłumików wiskotycznych w dwóch kładkach dla pieszych. W wiszącej kładce w miejscowości Strakonice (Czechy) zastosowano cztery tłumiki wiskotyczne o sile tłumienia 100 kN i skoku 150 mm każdy [53]. Podobne dwa urządzenia wykorzystano w podwieszanej kładce w miejscowości Čelákovice (Czechy) z pomostem z betonu UHPC [54, 55]. Tłumiki wiskotyczne zlokalizowano w obrębie przyczółków kładek (rys. 9b, c i rys. 10b, c). W obu kładkach, w obrębie pylonów wykorzystano łożyska prowadzące (kierunkowe) ograniczające swobodę przemieszczeń poprzecznych pomostu (rys. 11). Łożyska tego rodzaju, pracując jak tłumiki cierne, mogą przyczyniać się również do nieznacznej zwiększenia tłumienia drgań



Rys. 9. Ogólny widok i detale konstrukcyjne kładki w miejscowości Strakonice, Czechy (rozpiętości przęseł 9,25 + 89,40 + 9,25 m) (fot. własne oraz materiały informacyjne KGF Hydraulika [53])



Rys. 10. Widok i detale konstrukcyjne kładki w miejscowości Čelákovice, Czechy (rozpiętości przęseł 43,0 + 156,0 + 43,0 m) (fot. własne)



Rys. 11. Łożyska prowadzące (kierunkowe) wykorzystane w kładce: a) w Strakonicach, b) w Čelákovicach (fot. własne)

konstrukcji. Zasadniczy wpływ na zwiększenie tłumienia obu konstrukcji ma jednak zachowanie swobody przemieszczeń pomostu na długości przęsła, umożliwiające aktywowanie tłumików wiskotycznych zlokalizowanych w obrębie przyczółków.

Podsumowanie

Kładki dla pieszych, w szczególności kładki o konstrukcji stalowej, są obiektami charakteryzującymi się większą podatnością dynamiczną w porównaniu z innymi obiektami mostowymi. Z uwagi na swoje parametry dynamiczne (małe tłumienie i częstotliwość drgań własnych mieszczące się w przedziale częstotliwości kroków w odniesieniu do różnych form aktywności użytkowników) stalowe kładki dla pieszych mogą być narażone na występowanie nadmiernych drgań, powodujących dyskomfort ludzi i ograniczających przydatność użytkową kładki. Uniknięcie problemów z nadmiernymi drganiami wiąże się z koniecznością modyfikacji parametrów dynamicznych konstrukcji, jej masy, sztywności lub tłumienia. Modyfikacje masy lub sztywności konstrukcji umożliwiają zmianę częstotliwości jej drgań własnych w celu uniknięcia

rezonansowego wzbudzania drgań przez użytkowników. Jak przedstawiono w artykule na przykładzie rzeczywistych konstrukcji, efektywna modyfikacja masy konstrukcji wymaga znacznego jej zwiększenia (dociążenia konstrukcji), co nie zawsze będzie dopuszczalne. Podobnie w przypadku modyfikacji sztywności konstrukcji, zadowalające zmiany częstotliwości drgań własnych konstrukcji są osiągnięte dopiero przy znacznych modyfikacjach ogólnego schematu konstrukcji. Na ogół zaprojektowany schemat, dobrane wymiary i zastosowane materiały ograniczają możliwość usztywnienia i zmiany masy konstrukcji bez znaczącej modyfikacji obiektu [22]. Niemniej jednak należy rozważyć możliwość takich modyfikacji, szczególnie w przypadku kładek, w których drgania wzbudzone przez pieszych są na granicy drgań dopuszczalnych, lub kładek, których częstotliwości drgań własnych są na granicy częstotliwości oddziaływań użytkowników.

W przypadku braku możliwości modyfikacji masy lub sztywności konstrukcji (bądź małej efektywności tych modyfikacji) uodpornienie konstrukcji na nadmierne drgania można zrealizować przez zwiększenie jej tłumienia. Można to osiągnąć, stosując różne rodzaje tłumików drgań: tłumiki cierne (tarcie), strojone tłumiki masowe lub rurowe tłumiki wiskotyczne. Stosowanie tych urządzeń wymaga określenia ich optymalnych parametrów. Konieczna jest m.in. znajomość parametrów modalnych konstrukcji (masy i sztywności) oraz amplitud drgań (amplitud przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń) w miejscu montażu tłumika. Parametry te należy wyznaczyć na podstawie szczegółowych analiz dynamicznych (analiz drgań wymuszonych) lub pomiarów terenowych.

PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (DzU nr 63, poz. 735, z późniejszymi zmianami).
- [2] PN-EN 1990:2004 Podstawy projektowania konstrukcji.
- [3] PN-EN 1990:2004/A1:2008 Podstawy projektowania konstrukcji. Załącznik A2.
- [4] ISO 10137:2007: Base for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration. 2nd ed.
- [5] Bachmann H., Ammann W., Mercier H. et al.: Vibration problems in structures. Practical guidelines, 2nd edition. Birkhäuser Verlag, Basel–Berlin–Boston 1997.
- [6] Fisher O., Pinner M.: Wind induced vibrations of concrete stress-ribbon footbridges. "Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics", Vol. 74–76, 1998.
- [7] Salamak M.: Doświadczalne metody określania poziomu tłumienia drgań w kładkach dla pieszych. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, 2003.
- [8] Salamak M.: Rola tłumienia drgań w kładkach dla pieszych oraz metody jego identyfikacji. [W:] „Projektowanie, budowa i estetyka kładek dla pieszych”, monografia, edytorzy K. Flaga, W. Średniawa. Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
- [9] Lewandowski R.: Dynamika konstrukcji budowlanych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [10] Lewandowski R.: Redukcja drgań konstrukcji budowlanych. PWN, Warszawa 2014.
- [11] Flaga A.: Praktyczne ujęcie tłumienia drgań budowli jako całości. Materiały sympozjum naukowego sekcji MK KiiW PAN i IMB PK „Wpływy sejsmiczne na budowlę”, Kraków 1978.
- [12] Osiński Z.: Tłumienie drgań mechanicznych. PWN, Warszawa 1979.
- [13] Hashif A., Jones D., Henderson J.: Vibration damping. Wiley, New York 1985.
- [14] Chopra A.: Dynamics of structures: theory and application to earthquake engineering. Prentice Hall, 2011.
- [15] Beards C.: Structural vibration: analysis and damping. Butterworth-Heinemann, 1996.
- [16] Bryja D.: Deterministyczne i stochastyczne metody analizy drgań mostów wiszących. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Monografie Vol. 52, nr 21, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [17] Flaga A., Szulej J.: Wyznaczanie parametrów tłumienia drgań mostów i kładek dla pieszych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 8/2010.
- [18] Flaga A., Szulej J., Wielgos P.: Comparison of determination methods of vibration's damping coefficients for complex structures. „Budownictwo i Architektura”, nr 2/2008.
- [19] Flaga A., Michałowski T.: Charakterystyki tłumienia drgań lekkich kładek wiszących i podwieszonych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2000.
- [20] Heinemeyer Ch., Butz Ch. et al: Design of lightweight footbridges for human induced vibrations. JRC Scientific and Technical Reports, Luxembourg, JRC-ECCS, 2009.
- [21] Schlaich M., Brownlie K., Cozett J. et al: Guidelines for the design of footbridges. „fib Bulletin” No 32, fib, 2005.
- [22] Biliszczuk J., Hawryszków P., Szczepaniak K., Stempin P.: O działaniach tłumu na kładki dla pieszych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 8/2003.
- [23] Hawryszków P.: O niektórych sposobach tłumienia drgań kładek dla pieszych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2005.
- [24] Pańtak M.: O dynamice i kryteriach oceny komfortu użytkowania kładek dla pieszych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 2/2010.
- [25] Pańtak M.: Drgania jako stan graniczny użyteczności kładek dla pieszych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2015.
- [26] Bachmann H., Weber B.: Tuned vibration absorbers for “Lively” structures. “Structural Engineering International”, No. 1/1995.
- [27] Weber B.: Damping of vibrating footbridges. International Conference Footbridge 2002, Paris 2002.
- [28] Fiebig W.: Reduction of vibrations of pedestrian bridges using tuned mass dampers (TMD). “Archive of Acoustics”, vol. 35, No. 2/2010.
- [29] MAURER: Tuned mass and viscous dampers, technical informations and products. Maurer Söhne, Monachium 2011.
- [30] Den Hartog J.P.: Mechanical Vibrations. Dover Publications Inc., 1985.
- [31] Petersen C., Werkle H.: Dynamik der Baukonstruktionen. Springer, 2017.
- [32] Connor J.J.: Introduction to structural motion control. Prentice Hall 2002.
- [33] Rao S.S.: Mechanical Vibrations. Prentice Hall 2010.
- [34] Warburton G.: Optimum absorber parameters for minimizing vibration response. “Earthquake Engineering Structural Dynamics”, Vol. 9, Iss. 3, 1981.
- [35] Warburton G.: Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. “Earthquake Engineering Structural Dynamics”, Vol. 10, Iss. 3, 1982.
- [36] Piccirillo V., Tusset A., Balthazar J.M.: Optimization of dynamic vibration absorbers based on equal-peak theory. “Latin American Journal of Solids and Structures”, Vol. 16, Iss. 4, 2019.
- [37] Bakre S.V., Jangid R.S.: Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system. Structural control and health monitoring, Vol. 14, Iss. 3, 2007.
- [38] Nishihara O., Asami T.: Closed-form solutions to the exact optimizations of dynamic vibration absorbers (minimizations of the maximum amplitude magnification factors). “Journal of Vibration and Acoustics”, Vol. 124, Iss. 4, 2002.
- [39] Asami T., Nishihara O.: Closed-form exact solution to H[∞] optimization of dynamic vibration absorbers (application to different transfer functions and damping systems). “Journal of Vibration and Acoustics”, Vol. 125, Iss. 3, 2003.
- [40] Asami T.: Calculation of the H[∞] optimized design of a single-mass dynamic vibration absorber attached to a damped primary system. “Mechanical Engineering Journal”, Vol. 7, No. 5/2020.
- [41] Asami T., Nishihara O., Baz A.M.: Closed-form exact solution to H₂ optimization of dynamic vibration absorbers attached to damped linear systems. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol. 67, Iss. 655, 2001.
- [42] Zilletti M., Elliott S.J., Rustighi E.: Optimisation of dynamic vibration absorbers to minimise kinetic energy and maximise internal power dissipation. “Journal of Sound and Vibration”, Vol. 331, 2012.
- [43] Salvi J., Rizzi E.: A numerical approach towards best tuning of tuned mass dampers. 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2012), 2012.
- [44] Wilgos P., Flaga A.: Implementacja numeryczna zagadnienia optymalnego wyznaczania parametrów wielokrotnych strojonych tłumików masowych. [W:] „System Aerodynud i jego zastosowania w aerodynamice budowli i inżynierii wiatrowej”, praca zbiorowa pod redakcją A. Flagi, T. Lipeczkiego, Politechnika Lubelska, 2011.
- [45] Ciurej H., Kaweck J., Masłowski R.: Wyznaczanie optymalnych parametrów mechanicznego tłumika drgań metodą roju cząstek (PSO). „Inżynieria i Budownictwo”, nr 2/2008.

-
- [46] *Kawecki J., Masłowski R.*: Wyznaczanie optymalnych parametrów mechanicznego tłumika drgań budowli wieżowej. „Archiwum Inżynierii Lądowej”, nr 4/1988.
- [47] *Kawecki J.*: Rola elementów sprężysto-tłumiących w mechanicznych tłumikach drgań. III Ogólnopolskie Sympozjum „Wpływy środowiskowe na budowle i ludzi – obciążenia, oddziaływania, interakcje, dyskomfort”, Politechnika Lubelska, Lublin Zwierzyniec 2001.
- [48] *Kawecki J.*: Doświadczalna weryfikacja skuteczności mechanicznego tłumika drgań budowli wieżowej. Monografia 302, Rozprawy z mechaniki konstrukcji i materiałów, Politechnika Krakowska, 2004.
- [49] *Kawecki J., Masłowski R.*: Dostrojenie mechanicznego tłumika drgań na obiekcie ważnym etapem zapewnienia jego skuteczności. XII międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna „Konstrukcje metalowe – ICMS 2011”, SKM KILiW PAN, Wrocław 2011.
- [50] *Masłowski R.*: Zastosowanie tłumików mechanicznych do zmniejszania drgań budowli wieżowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/1983.
- [51] *Kawecki J., Masłowski R.*: Studium możliwości zastosowania mechanicznego tłumika drgań do redukcji drgań stropu. „Inżynieria i budownictwo”, nr 1/1997.
- [52] *Hawryszków P., Klasztorny M.*: Protection of suspension footbridge with tuned mass dampers against excessive resonant vertical vibrations caused by vandal pedestrian loads. “Archives of Civil Engineering”, No. 4/2007.
- [53] KGF Hydraulika: Hydraulické válce a čerpadla. Hydraulické tlumiče kmitů pro mosty a lávky. 2014.
- [54] *Kalný M., Komanec J., Kvasnička V., Vítek J.L., Brož R., Koukolík P., Coufal R.*: Lávka přes Labe v Čelákovících – první nosná konstrukce z UHPC v ČR. „Beton: technologie, konstrukce, sanace”, nr 4/2014.
- [55] *Vladimír Š., Michal P., Tomáš P.*: A dynamic analysis of the cable-stayed footbridge in Čelákovice town. “Procedia Engineering”, Vol. 199, 2017.