



DANIEL SZYNAL

Politechnika Rzeszowska
d.szynal@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0002-7020-2367



LUCJAN JANAS

Politechnika Rzeszowska
ljanas@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7235-8878

Badania i analiza tłumienia drgań obiektów mostowych z betonu sprężonego

W świetle norm i przepisów nie ma ściśle sprecyzowanych wymagań dotyczących współczynnika tłumienia dla mostów drogowych. W przypadku mostów kolejowych, w normie [12], są podane dolne granice współczynnika, które należy stosować w obliczeniowej analizie dynamicznej. Tłumienie kładek jest omawiane w wielu publikacjach, np. [2, 3, 6, 10, 15]. W pracy [4] podano zalecane współczynniki tłumienia, które zależą od materiału konstrukcji przęseł. W pracy [14] podano wzory pozwalające oszacować tłumienie kładek. Obliczone wartości są obarczone dużą niepewnością i dlatego celowe jest prowadzenie badań doświadczalnych.

Tłumienie mostów było analizowane w wielu pracach, a typowe obiekty wielokrotnie badano i ich współczynniki tłumienia można odnaleźć w literaturze. W pracy [13] podano poglądowy, procentowy rozkład liczby obiektów w dziesięciu przedziałach wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia. Wg tego opracowania obiekty o tłumieniu większym od 0,3 stanowią 7,1% analizowanego zbioru, w przedziale 0,25–0,30 znajduje się 2,3% obiektów, w przedziale 0,20–0,25 – 7,3%, a w przedziale 0,15–0,20 – 15%. Dużą grupę, tj. 18,2%, stanowią obiekty o tłumieniu w przedziale 0,10–0,15. Największa grupa, tj. 20,8%, to obiekty o tłumieniu w przedziale 0,05–0,10. Nieco mniej obiektów (15,3%) ma dekrement tłumienia w zakresie od 0,03 do 0,05. Obiekty z dekrementem tłumieniem poniżej 0,03 stanowią 14% analizowanej grupy. Powyższy rozkład opracowano wiele lat temu, na podstawie analizy 46 mostów i wiaduktów i z pewnością wymaga aktualizacji. Postęp w budownictwie sprzyja stosowaniu nowych rodzajów konstrukcji, nowych elementów wyposażenia i materiałów, co niewątpliwie ma wpływ na zmianę parametrów dynamicznych, w tym tłumienia.

Należy pamiętać, że tłumienie drgań jest cechą elementu konstrukcji a nie całego obiektu. W przypadku typowych mostów belkowych czy płytowych jedynym parametrem charakteryzującym obiekt będzie współczynnik tłumienia dźwigarów. W mostach łukowych, wiszących i podwieszonych, inny współczynnik będzie charakteryzował pomost a inny wieszaki, kable czy wanty. Co więcej, wartość tłumienia zmienia się zależnie od częstotliwości drgań, stopnia wzbudzenia konstrukcji, a nawet temperatury. Między innymi dlatego trudne jest opisanie tłumienia prostymi zależno-

ściami fizycznymi, które można by zastosować w praktyce inżynierskiej. W ocenie tłumienia wskazane jest zatem bazowanie na wiedzy o istniejących konstrukcjach, w tym wiedzy uzyskanej na podstawie badań doświadczalnych.

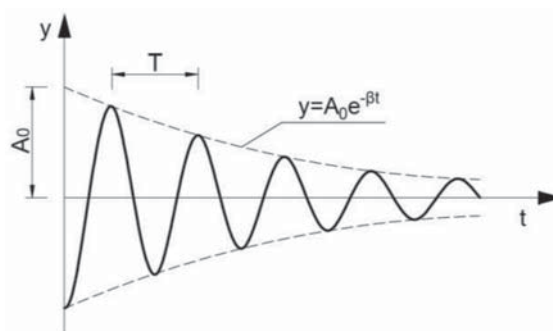
Parametry opisujące tłumienie

Najpopularniejszą miarą tłumienia jest logarytmiczny dekrement tłumienia δ . W literaturze istnieje kilka procedur jego wyznaczania. Podstawową i często stosowaną metodę można opisać równaniem (1), w którym A_n i A_{n+m} oznaczają kolejno wartość pierwszej i ostatniej amplitudy z analizowanego przedziału drgań.

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{A_n}{A_{n+m}} \quad (1)$$

Zazwyczaj rozważa się 10 pierwszych amplitud drgań swobodnych [9].

Dokładniejszą metodą, którą zastosowano w badaniach omawianych w niniejszym artykule, jest metoda wykorzystująca parametry krzywej wykładniczej, będącej obwiednią amplitud drgań swobodnych (rys. 1).



Rys. 1. Obwiednia wykresu drgań dla modelu tłumienia wiskotycznego

Metoda ta bazuje na modelu tłumienia wiskotycznego, jest zalecana przez normę [5]. Pierwszy etap polega na wyznaczeniu parametrów krzywej opisanej równaniem (2):

$$y = A_0 e^{-\beta t} \quad (2)$$

w którym:

A_0 – amplituda początkowa,

t – czas,

e – podstawa logarytmu naturalnego,

β – parametr krzywej wykładniczej.

Następnie obliczany jest logarytmiczny dekrement tłumienia δ z zależności (3), w której β jest parametrem krzywej wykładniczej, a T oznacza okres drgań.

$$\delta = \beta \cdot T \quad (3)$$

Oprócz logarytmicznego dekrementu tłumienia, powszechnie stosowaną miarą tłumienia jest współczynnik tłumienia ζ , którego związek z logarytmicznym dekrementem wyraża wzór (4) [5]:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (4)$$

Ze względu na przejrzystość wyników współczynnik tłumienia jest często podawany w [%].

Badania tłumienia wiaduktów drogowych – przykłady

Przebieg badań i procedura analizy sygnałów

Ocenę tłumienia przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów ugięć przęseł, wykonanych czujnikami indukcyjnymi o rozdzielczości 0,01 mm. Stosowano aparaturę wzorcowaną, a procedurę pomiarową sprawdzono m.in. przez badania porównawcze [7, 8, 9]. Sygnały drgań rejestrowano z częstotliwością próbkowania 200 Hz w czasie przejazdów samochodów po równej nawierzchni z prędkościami 30, 40, 50 km/h oraz w czasie przejazdów przez próg o wysokości 50 mm z prędkością 5 do 10 km/h (fot. 1). Ze względu na ukształtowanie dojazdów nie było możliwości przeprowadzenia badań przy prędkości większej niż 50 km/h.

W celu wyznaczenia logarytmicznego dekrementu tłumienia analizie poddano drgania swobodne, obserwowane po

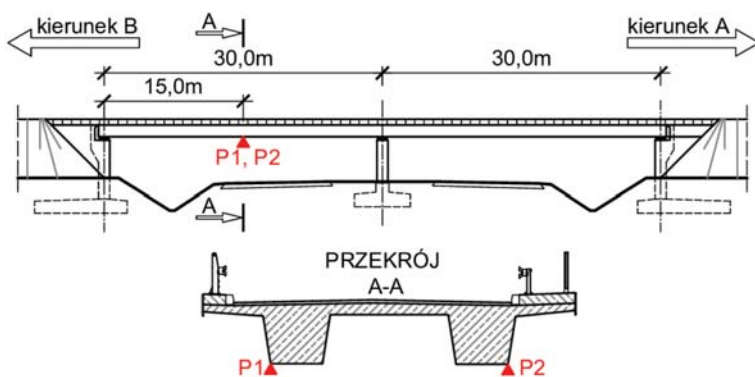
zjechaniu pojazdu z obiektu, kiedy nie występuje oddziaływanie kół a masa pojazdu nie stanowi dodatkowego czynnika tłumiącego. O przydatności sygnału pomiarowego decyduje kilka czynników, przede wszystkim stopień wzbudzenia konstrukcji (wartości amplitud), stopień zaszumienia, czy liczba wzbudzonych postaci drgań. Ze względu na występujące zakłócenia zarejestrowany sygnał drgań rzadko nadaje się do określenia tłumienia bez wstępnej filtracji. W omawianych badaniach stosowano filtr pasmowo-przepustowy o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR). W pierwszej kolejności wyznaczono podstawowe częstotliwości drgań swobodnych obiektu, a następnie definiowano zakres pasma przepuszczania w celu odseparowania częstotliwości znajdujących się poza pasmem. W trakcie procesu filtracji sygnał może ulec deformacji, a ich stopień zależy od rodzaju stosowanego filtra, jego rzędu oraz szerokości pasma. Na podstawie doświadczeń własnych i literatury [13, 16] przyjęto filtr Bessela, pasmo przepuszczania o szerokości 2 Hz i rząd nie wyższy niż 5.

Wiadukt belkowy z betonu sprężonego

Pierwszym z analizowanych obiektów jest wiadukt belkowy dwuprzęsłowy (rys. 2), zaprojektowany na obciążenia klasy „A” [11], o schemacie belki ciągłej i rozpiętościach przęseł $2 \times 30,0$ m. Ustrój nośny przęseł stanowią dwa sprężone dźwigary trapezowe połączone z monolityczną, żelbetową płytą pomostu. Kąt skosu obiektu wynosi $84,11^\circ$. Zastosowano beton klasy C35/45, stal sprężającą o wytrzymałości charakterystycznej $R_{vk} = 1860$ MPa i stal zbrojeniową klasy A-IIIIN, łożyska garnkowe. Podpory skrajne to przyczółki masywne, filar składa się z dwóch słupów bez oczepu, posadowionych na ławach żelbetowych.



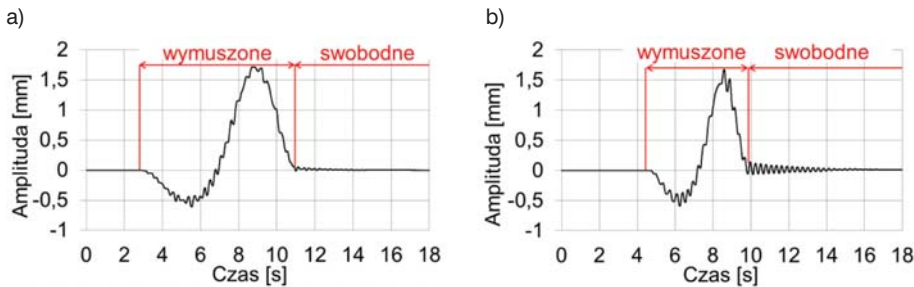
Fot. 1. Przejazd samochodu w czasie badań dynamicznych: a) po równej nawierzchni, b) przez próg



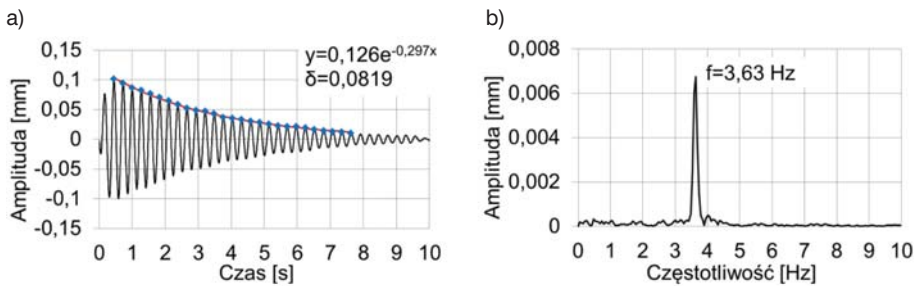
Rys. 2. Schemat wiaduktu belkowego z oznaczeniem punktów pomiaru ugięć

Po przeprowadzeniu badań dynamicznych analizowano sygnały zawierające przynajmniej 10 amplitud nie mniejszych niż rozdzielczość czujników pomiarowych. Na rysunku 3a przedstawiono przykładowy sygnał świadczący o dobrej pracy konstrukcji, nieprzydatny do wyznaczenia współczynnika tłumienia (słabe wzbudzenie drgań swobodnych), a na rysunku 3b sygnał o stosunkowo silnym wzbudzeniu drgań.

Po obróbce sygnału poprzez filtrację, wyznaczono wartości kolejnych amplitud i metodą najmniejszych kwadratów dobrano krzywą wykładniczą opisaną równaniem (2). Znajac parametry krzywej i okres drgań wyznaczono logarytmiczny



Rys. 3. Przykład sygnału z oznaczeniem drgań wymuszonych i swobodnych: a) sygnał o słabym wzbudzeniu drgań, nieprzydatny do analizy tłumienia, b) sygnał o stosunkowo silnym wzbudzeniu, odpowiedni do analizy tłumienia



Rys. 4. Charakterystyki dynamiczne wiaduku belkowego: a) wykres drgań swobodnych i obwodnia amplitud, b) widmo drgań

dekrement tłumienia. Na rysunku 4a przedstawiono przykładowy wykres drgań swobodnych po filtracji, a na rysunku 4b charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową analizowanego sygnału.

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie wartości parametrów tłumienia wyznaczonych dla podstawowej częstotliwości drgań swobodnych, tj. 3,63 Hz. Częstotliwość drgań spełnia wymaganie rozporządzenia [1]. Wartość średnia logarytmicznego dekrementu tłumienia jest zadowalająca, wynosi 0,088 i mieści się w przedziale, który wg [13] charakteryzuje największy odsetek obiektów mostowych (ok. 20%).

Tabela 1. Parametry tłumienia obiektu belkowego, dwuprzęsłowego

Prędkość przejazdu w [km/h] / kierunek	Punkt pomiarowy	Początkowa amplituda [mm]	Logarytmiczny dekrement tłumienia δ	Współczynnik tłumienia ζ	Współczynnik tłumienia ζ w [%]
30/A	P1	0,015	n.w.	n.w.	n.w.
	P2	0,013	n.w.	n.w.	n.w.
40/A	P1	0,021	n.w.	n.w.	n.w.
	P2	0,020	n.w.	n.w.	n.w.
40/B	P1	0,019	n.w.	n.w.	n.w.
	P2	0,022	n.w.	n.w.	n.w.
50/B	P1	0,101	0,097	0,015	1,5
	P2	0,087	0,082	0,013	1,3
10/A (próg)	P1	0,041	0,082	0,013	1,3
		0,043	0,087	0,014	1,4
	P2	0,101	0,098	0,016	1,6
10/B (próg)	P1	0,101	0,098	0,016	1,6
	P2	0,097	0,082	0,013	1,3
Wartość średnia:			0,088	0,014	1,4

n.w. – brak możliwości wyznaczenia współczynnika tłumienia

Wiadukt ramownicowy z betonu sprężonego

Kolejnym analizowanym obiektem jest konstrukcja z betonu sprężonego o schemacie statycznym ramy koźłowej (rys. 5). Ustrój nośny przęseł skrajnych stanowi żelbetowa płyta stałej wysokości, w przęśle środkowym zastosowano dwa dźwigary trapezowe z monolityczną żelbetową płytą pomostu. Filary ramy są żelbetowe i zostały oparte przegubowo na fundamentach bez stosowania łożysk. Na przyczółkach zastosowano łożyska garnkowe. Elementy konstrukcyjne przęseł wykonano z betonu klasy B35/45, zastosowano stal sprężającą o wytrzymałości charakterystycznej $R_{vk}=1860$ MPa i stal zbrojeniową A-IIIIN. Obiekt został ukształtowany w skosie $62,1^\circ$, jest posadowiony na ławach żelbetowych opartych na podłożu wzmocnionym w technologii DSM, został zaprojektowany na klasę obciążenia „A” zgodnie z normą [11].

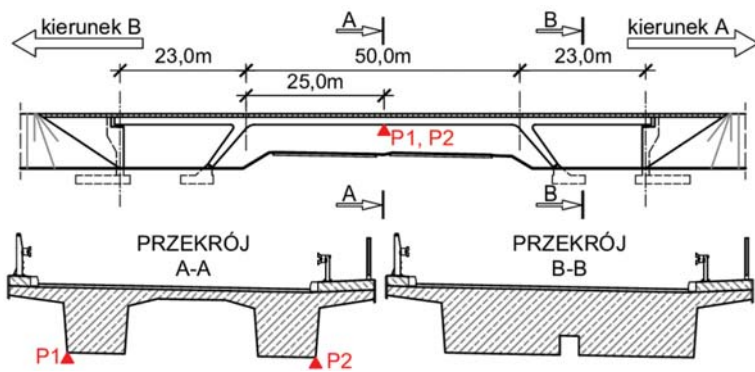
Badania tego obiektu przeprowadzono przy przejazdach z prędkościami

30 do 50 km/h. Ze względu na ukształtowanie dojazdów samochody ciężarowe, służące do wzbudzenia drgań, nie mogły uzyskać większej prędkości. Drgania badano przy przejazdach po równej nawierzchni i przy przejazdach przez próg ustawiony w środkowym i skrajnym przęśle. Łącznie

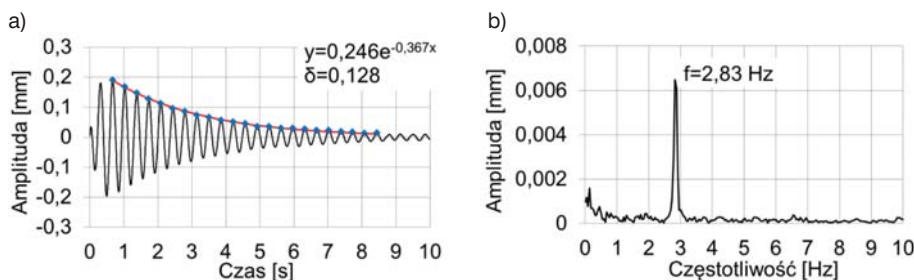
Tabela 2. Parametry tłumienia wiaduku ramownicowego

Prędkość przejazdu w [km/h] / kierunek	Punkt pomiarowy	Początkowa amplituda [mm]	Logarytmiczny dekrement tłumienia δ	Współczynnik tłumienia ζ	Współczynnik tłumienia ζ w [%]
30/B	P1	0,010	n.w.	n.w.	n.w.
	P2	0,009	n.w.	n.w.	n.w.
40/A/1	P1	0,191	0,128	0,021	2,1
	P2	0,185	0,132	0,022	2,2
40/A/2	P1	0,146	0,137	0,020	2,0
	P2	0,152	0,147	0,021	2,1
50/B/1	P1	0,128	0,141	0,022	2,2
	P2	0,123	0,154	0,023	2,3
50/B/2	P1	0,162	0,133	0,022	2,2
	P2	0,171	0,136	0,025	2,5
5/A (próg w przęśle skrajnym)	P1	0,038	0,135	0,021	2,1
	P2	0,040	0,140	0,022	2,2
5/B (próg w przęśle środkowym)	P1	0,020	n.w.	n.w.	n.w.
	P2	0,019	n.w.	n.w.	n.w.
Wartość średnia:			0,138	0,022	2,2

n.w. – brak możliwości wyznaczenia współczynnika tłumienia



Rys. 5. Schemat konstrukcji wiaduku ramownicowego z oznaczeniem punktów pomiarowych



Rys. 6. Charakterystyki dynamiczne wiaduku ramownicowego: a) wykres drgań swobodnych i obwiednia amplitud, b) widmo drgań

przeanalizowano 12 sygnałów. W analizie tłumienia pominięto przebiegi czasowe o małych amplitudach drgań swobodnych, tj. zarejestrowane w czasie przejazdu z prędkością 30 km/h i w czasie przejazdu przez próg ustawiony w środkowym przęśle, gdzie pomimo silnego wzbudzenia, przejazd przez przęsło skrajne spowodował wytłumienie drgań konstrukcji. Uwzględniono przejazd, w którym próg znajdował się w przęśle skrajnym.

Przykładowy sygnał i parametry krzywej wykładniczej przedstawiono na rysunku 6a, charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową na rysunku 6b.

Zestawienie wyników analizy tłumienia dla podstawowej częstotliwości drgań, tj. 2,83 Hz, zawarto w tabeli 2. Wartość średnia logarytmicznego dekrementu tłumienia wynosi 0,138, świadczy o dobrym tłumieniu drgań, mieści się w przedziale, który charakteryzuje ok. 18% obiektów mostowych [13]. Częstotliwość drgań swobodnych nie spełnia warunku podanego w rozporządzeniu [1] ponieważ jest mniejsza od 3 Hz.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań tłumienia dwóch współczesnych wiaduktów drogowych o średniej rozpiętości. Pierwszy z analizowanych obiektów to wiadukt dwu-

przęsłowy, dwudźwigarowy o schemacie statycznym belki ciągłej. Drugi obiekt, to wiadukt ramownicowy w układzie tzw. „ramy koźlowej”. Oba wiadukty zostały wykonane w technologii betonu sprężonego. W artykule przedstawiono także metodykę wyznaczania tłumienia, zwrócono uwagę na trudności jego oszacowania, które w przypadku badanych obiektów wynikały głównie ze zbyt słabego wzbudzenia drgań swobodnych.

Przeprowadzone badania potwierdziły wystarczające tłumienie drgań obu obiektów. Logarytmiczny dekrement tłumienia wiaduku belkowego wynosi 0,088, przy częstotliwości 3,1 Hz, a wiaduku ramownicowego 0,138 przy częstotliwości drgań 2,83 Hz. Oba obiekty mają tłumienie o wartościach, które charakteryzują dużą grupę użytkowanych mostów i wiaduktów. Wyniki badań można więc uznać za pozytywne.

Literatura

- [1] Dz.U. nr 63, poz. 735 z 2000 r. Rozporządzenie MTiGM w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie (zm. Dz.U. 2019 poz. 1642)
- [2] Flaga A. *Mosty dla pieszych*, WKŁ 2011.
- [3] Hawryszków P., Pimentel R., Silva F., *Vibration effects of loads due to groups crossing a lively footbridge*. Procedia Engineering 199, pp. 2808-2813
- [4] Heinemeyer Ch., et al. Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations, European Commission, JRC 2009
- [5] ISO 18649:2004. Mechanical vibration – Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges
- [6] Janas L., Basiaga R.: *Badania dynamiczne podwieszanej kładki dla pieszych*. Zeszyty Naukowe PRZ, nr 2/57, 2010
- [7] Olaszek P., Janas L., Salamak M., Matysek A.: *Badania porównawcze przyspieszeń i przemieszczeń konstrukcji mostowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym*. „Drogownictwo” nr 10/2014
- [8] Olaszek P.: *Cyfrowe metody pomiarowe w zastosowaniu do badań mostów*. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2015
- [9] Olaszek P., Mazanek M., Janas L., Salamak M., Matysek A.: *Istota porównań międzylaboratoryjnych – jakość badań pod próbnym obciążeniem*. „Mosty” 2/2014.
- [10] Pańtak M., Jarek B., Marecik K.: *Vibration damping in steel footbridges*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 419 (2018), doi:10.1088/1757-899X/419/1/012029
- [11] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia
- [12] PN-EN 1991-2: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [13] Salamak M.: *Doświadczalne metody określania poziomu tłumienia drgań w kładkach dla pieszych*. Politechnika Śląska, 2003.
- [14] Schlaich M., Brownlie K., Conzett J. et al., FIB Bulletin 32: Guidelines for the design of footbridges, FIB, 2005
- [15] Szynal D., Janas L., *Vibration damping in road bridges – two case studies of full scale experiments*, MATEC Web of Conferences, 285/2019
- [16] Zieliński T. P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKŁ, Warszawa 2009