

BADANIA WIBROAKUSTYCZNE MOSTU BLACHOWNICOWEGO

Lucjan Janas

dr inż., Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 865 1100, e-mail: ljanas@prz.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań drgań hałasu w otoczeniu mostu-kolejowego blachownicowego z pomostem otwartym. Przedstawiono wyniki pomiaru drgań podstawowych elementów konstrukcji i oceniono poziom tych drgań pod kątem spełnienia wymagań norm europejskich. Zaprezentowano także wyniki badań hałasu obok mostu oraz wpływ konstrukcji mostowej na klimat akustyczny. Badania wykonano zestawem akcelerometrów, mikrofonów i kamerą akustyczną. Przedstawiono także szczegółową analizę numeryczną drgań konstrukcji, obejmującą niskie i średnie częstotliwości.

Słowa kluczowe: most kolejowy, drgania, hałas

1. Wprowadzenie

Mostom kolejowym stawia się coraz większe wymagania normowe. W Eurokodzie PN-EN 1990:2004/A1 Podstawy projektowania konstrukcji [3] stwierdzono, że sprawdzenie maksymalnego przyspieszenia drgań przęsła powinno być rozpatrywane jako wymaganie bezpieczeństwa, sprawdzane w stanie granicznym użyteczności. Zapisano, że w przypadku toru na podsypce zalecaną maksymalną wartością przyspieszeń jest 3.5 m/s^2 a w przypadku pomostów z jazdą bezpośrednią i elementów konstrukcyjnych projektowanych do ruchu dużej prędkości 5 m/s^2 . Wymaganie dotyczy wszystkich elementów utrzymujących tor, przy częstotliwościach drgań nie większych od 30 Hz. Powyższe warunki mają także na celu ochronę przed niestacnością toru. Norma zaleca ponadto, aby pierwsza częstotliwość bocznych drgań własnych przęsła była nie mniejsza niż 1.2 Hz. Przykłady oceny drgań mostów i problemy z tym związane przedstawiono m.in. w pracach [1, 2, 5].

Często mosty kolejowe oddziałują na środowisko w znacznie większym stopniu niż linie kolejowe na docinkach poza mostami. Oddziaływanie to może przejawiać się nadmierną emisją hałasu, co ma szczególnie istotne znaczenie na terenach aglomeracji. Na problem hałasu mostów kolejowych zwraca uwagę PN-EN 1993-2, Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 2: Mosty stalowe [4]. W normie tej, w rozdziale dotyczącym stanów granicznych użyteczności, w postanowieniach ogólnych zapisano, że należy ograniczać częstotliwości drgań własnych m.in. po to, aby ograniczyć uszkodzenia zmęczeniowe i ograni-

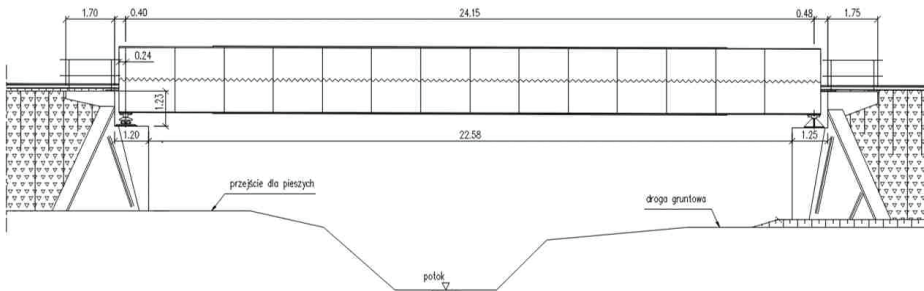
czyć nadmierną emisję hałasu. W pkt. 7.7 tej samej normy, dotyczącym kryteriów użytkowania mostów kolejowych, zapisano: „Wszelkie wymagania dotyczące emisji hałasu można podać w ustaleniach projektowych”.

W Polsce dopuszczalny poziom hałasu (L_{Aeq}) zgodnie z [6] wynosi na terenie zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej 65 dBw porze dziennej, tj. między godzinami 6:00 a 22:00 i 56 dBw porze nocnej, tj. między godz. 22:00 a 6:00. Według badań, wartości te w pobliżu mostów stalowych są często przekroczone.

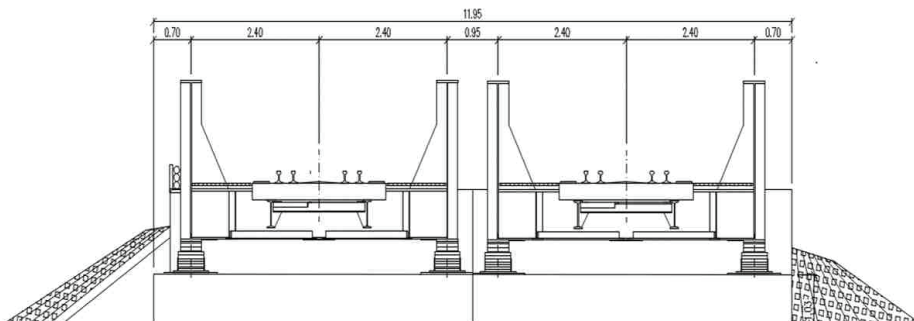
W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań drgań i hałasu w otoczeniu mostu blachownicowego z pomostem otwartym. W celu identyfikacji źródeł dźwięku przedstawiono m.in. analizę numeryczną drgań niskiej i średniej częstotliwości. Badania prowadzono w czasie normalnej eksploatacji. Ocenę konstrukcji przeprowadzono w odniesieniu do wymagań zawartych w [3] i [6].

2. Opis obiektu

Most składa się z dwóch osobnych konstrukcji stalowych opartych na wspólnych podporach. Schemat statyczny to belka swobodnie podparta, rozpiętość 24.15 m. Dźwigary główne są stalowe blachownicowe. Światło poziome wynosi 22,58 m, wysokość nad terenem 6,61 m. Konstrukcja pomostu to ruszt poprzecznicowo-podłużnicowy (czyli tzw. pomost otwarty). Szyny są zamocowane do mostownic drewnianych przez podkładki PM-60 i przekładki podszynowe typu PKW. Obiekt jest zlokalizowany na linii magistralnej.



Rys. 1. Widok mostu z boku

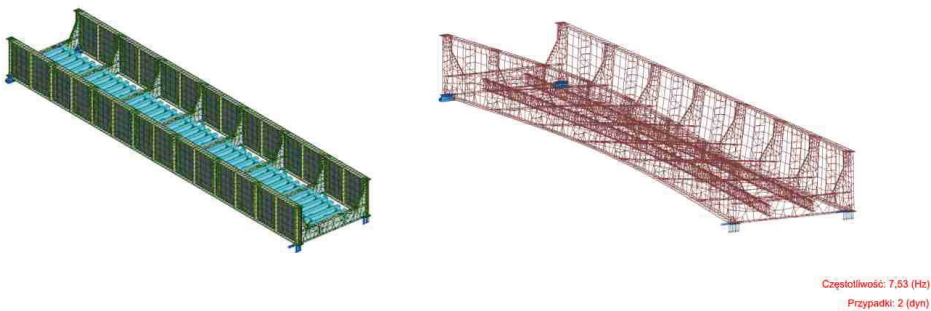


Rys. 2. Przekrój poprzeczny badanego mostu

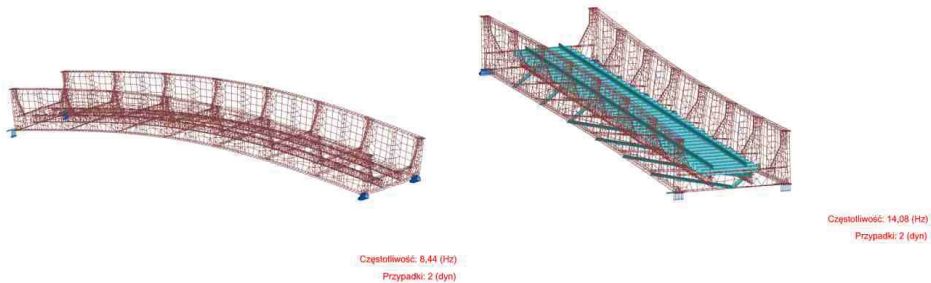
3. Analiza numeryczna

Obliczenia wykonano w celu wyznaczenia podstawowych częstotliwości drgań własnych oraz ustalenia czy występują charakterystyczne pasma, które mogą być przyczyną drgań rezonansowych i nadmiernej emisji hałasu. Model obliczeniowy konstrukcji wykonano w MES stosując elementy powłokowe (blachownice, poprzecznice i podłużnice) i prętowe (stężenia poziome, mostownice i szyny). Ponieważ analiza mostu obejmuje nie tylko analizę drgań związaną z wymaganiami określonymi w normie [3] ale również oddziaływania akustyczne, przeprowadzono rozszerzoną analizę numeryczną, obejmującą 500 pierwszych częstotliwości drgań własnych.

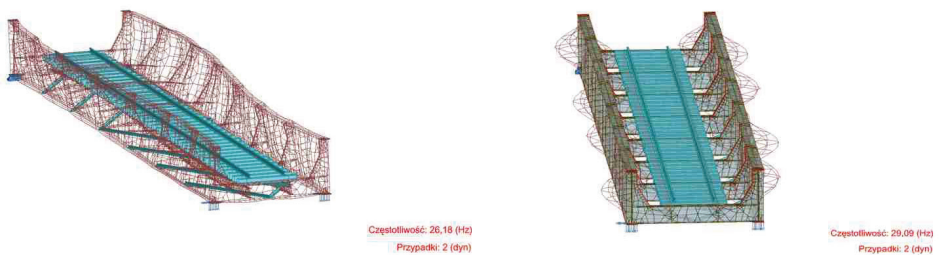
Wybrane formy drgań przedstawiono na rys. 3 do 6. W tab. 1 zestawiono kolejne częstotliwości w wybranych czterech przedziałach. W celu zobrazowania rozkładu częstotliwości drgań własnych na rys. 7 przedstawiono stopień zagęszczenia wartości w przedziale do 155 Hz.



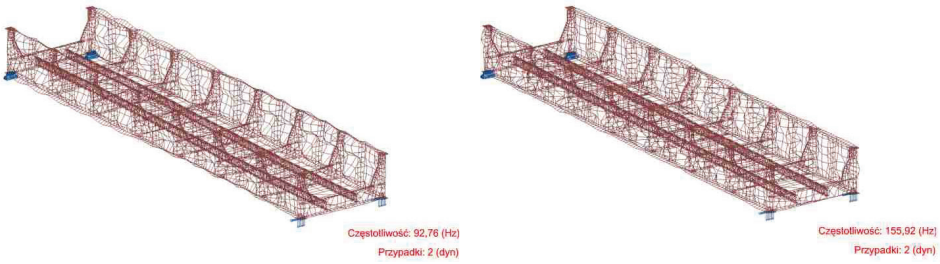
Rys. 3. Model obliczeniowy konstrukcji i forma drgań własnych dla najniższej częstotliwości tj. 7.53 Hz (drgania w kierunku poziomym)



Rys. 4. Forma drgań własnych dla częstotliwości 8.44 Hz (drgania w kierunku pionowym) oraz forma odpowiadająca częstotliwości 14.08 Hz (drgania giętno-skrętne)



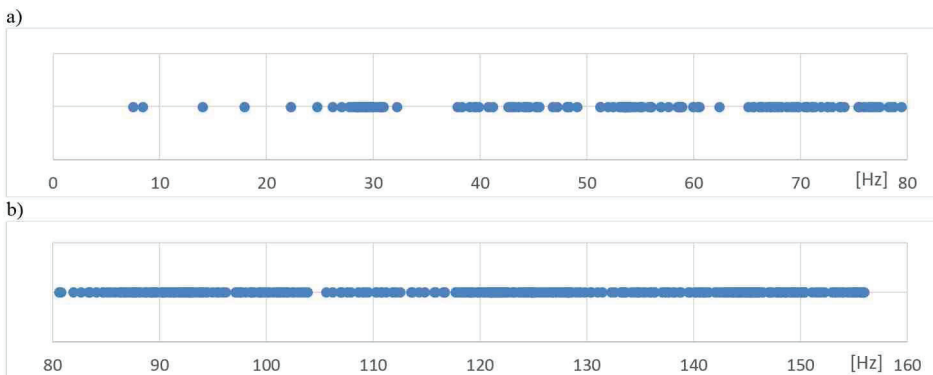
Rys. 5. Formy drgań dla częstotliwości 26.18 Hz (drgania giętno-skrętne) i 29.9 Hz (drgania śródnika)



Rys. 6. Formy drgań własnych dla częstotliwości 92.76 Hz i 155.92 Hz – dominują drgania śródnika

Tabela 1. Zestawienie częstotliwości drgań własnych w wybranych, przykładowych pasmach częstotliwości ($Lp.$ – oznacza nr kolejnej, obliczonej częstotliwości drgań własnych, f – oznacza wartość częstotliwości drgań własnych)

$Lp.$	$f[Hz]$	$Lp.$	$f[Hz]$	$Lp.$	$f[Hz]$	$Lp.$	$f[Hz]$
1	7.53	16	28.83	300	121.01	486	153.93
2	8.44	17	28.94	301	121.05	487	154.00
3	14.08	18	29.09	302	121.06	488	154.34
4	17.97	19	29.18	303	121.06	489	154.60
5	22.33	20	29.39	304	121.16	490	154.83
6	24.76	21	29.41	305	121.21	491	155.04
7	26.18	22	29.54	306	121.39	492	155.09
8	26.97	23	29.62	307	121.47	493	155.25
9	27.75	24	29.82	308	121.48	494	155.31
10	28.11	25	29.95	309	121.51	495	155.52
11	28.36	26	29.99	310	121.61	496	155.73
12	28.43	27	30.34	311	121.63	497	155.75
13	28.49	28	30.71	312	121.70	498	155.84
14	28.62	29	30.74	313	121.82	499	155.89
15	28.67	30	30.81	314	121.84	500	155.92



Rys. 7. Częstotliwości drgań własnych w zakresie: a) 0-80 Hz, b) 80-155 Hz

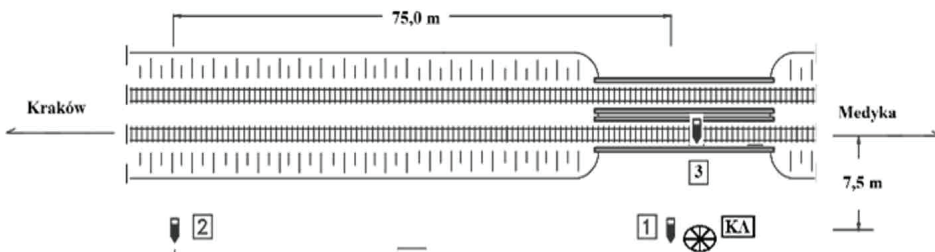
Obliczenia wykazały bardzo duże zagęszczenie wartości częstotliwości drgań własnych szczególnie powyżej 26 Hz. W zakresie od 65 do 155 Hz kolejne częstotliwości różnią się od siebie zwykle o dziesiąte lub setne części Hertza.

Do ok. 26 Hz formy drgań mają charakter globalny, tzn., że są to formy giętnie poziome lub pionowe oraz giętno-skrętne całego przęsła. Powyżej 29 Hz można zaobserwować przede wszystkim różne formy drgań poszczególnych elementów konstrukcji, w tym przede wszystkim środnicą dźwigara głównego, co ze względu na dużą jego powierzchnię ma istotne znaczenie dla emisji hałasu. Obliczeń częstotliwości drgań powyżej 155 Hz nie wykonywano.

Duża liczba bliskich pod względem wartości częstotliwości drgań własnych powoduje, że przejazd praktycznie każdego rodzaju pojazdu szynowego może powodować drgania rezonansowe, głównie środnicą i emisję niepożądanych dźwięków.

4. Opis badań wibroakustycznych

Hałas mierzono w odległości 7.5 m od toru bezpośrednio obok mostu, w odległości ok. 75 m od mostu oraz pod mostem (rys. 8). Drgania mierzono w kilku miejscach konstrukcji, przy czym w niniejszym artykule ograniczono się do przedstawienia wyników pomiaru drgań pionowych i poziomych środnicą oraz drgań pionowych poprzecznicą i podłużnicą. Zjawiska wibroakustyczne rejestrowano w czasie przejazdów pociągów osobowych i towarowych. Do badań zastosowano zestaw mikrofonów i akcelerometrów firmy B&K, oprogramowanie PulseReflex oraz kamerę akustyczną z oprogramowaniem LMS. Badania prowadzono w czasie przejazdów pociągów oraz w czasie impulsowego wzbudzenia drgań młotkiem modalnym.



Rys. 8. Schemat lokalizacji mikrofonów oraz kamery akustycznej: 1 – mikrofon obok mostu, 2 – mikrofon obok toru poza mostem, 3 – mikrofon pod mostem, KA – kamera akustyczna

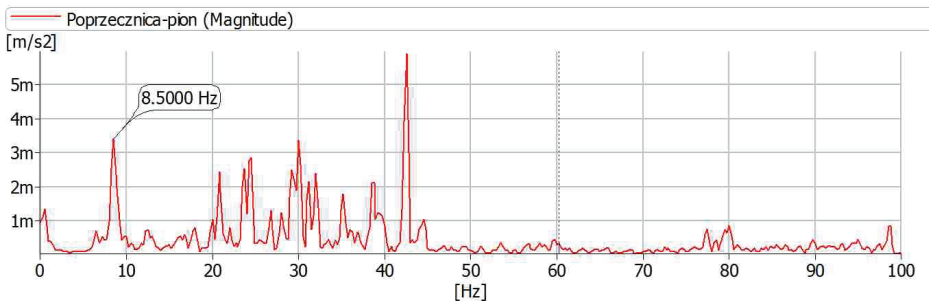


Rys. 9. Kamera akustyczna obok mostu i mikrofon pod konstrukcją

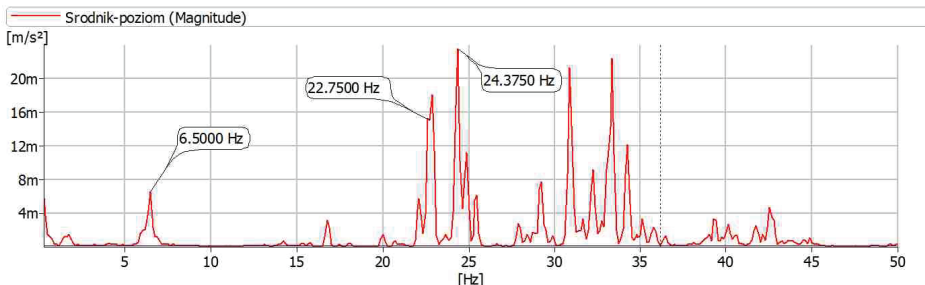
Lokalizacja punktów pomiarowych hałasu (mikrofony) zlokalizowano zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem” [7]. Kamera akustyczna została usytuowana obok mostu –jak pokazano to na rys. 9.

5. Wybrane wyniki badań drgań

Przykładowe amplitudy drgań pionowych zarejestrowane w czasie przejazdu pociągu osobowego przedstawiono na rys. 10 a drgań poziomych na rys. 11.

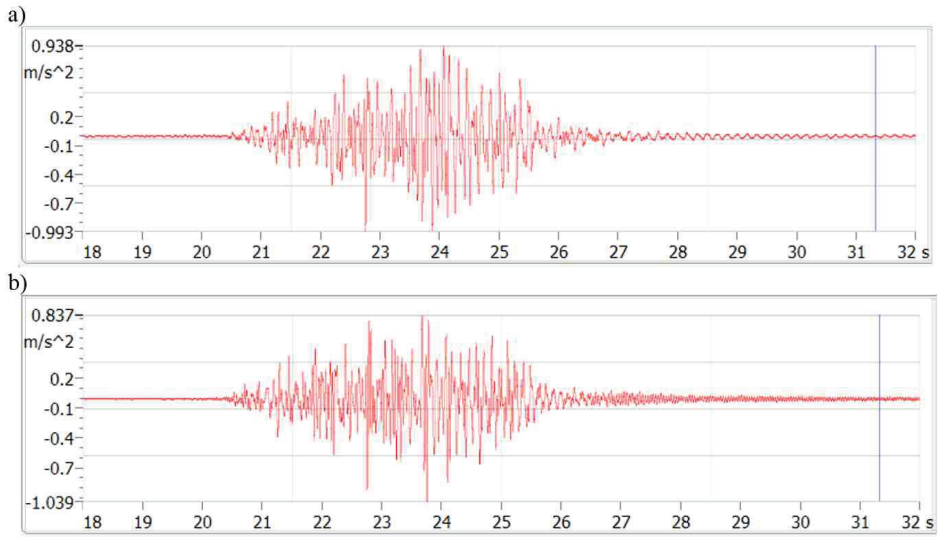


Rys. 10. Amplitudy przyspieszeń drgań pionowych w funkcji częstotliwości

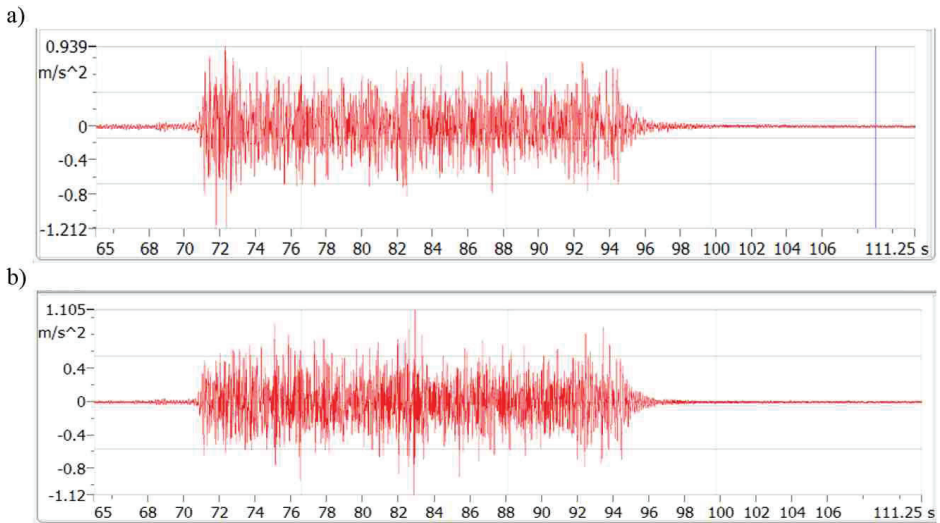


Rys. 11. Amplitudy przyspieszeń drgań poziomych w funkcji częstotliwości

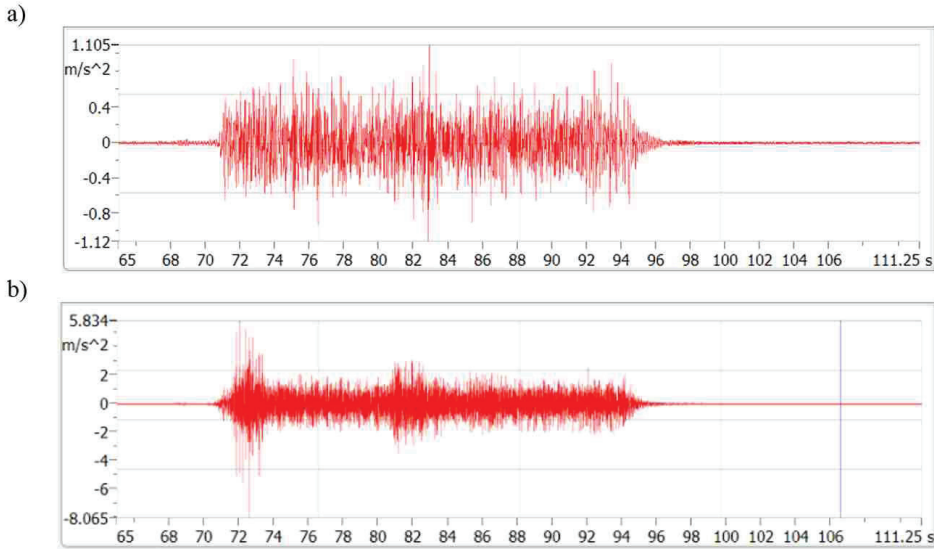
Podstawowa, zmierzona częstotliwość drgań własnych pionowych, wynosi 8.5 Hz i jest bliska wartości obliczonej 8.44 Hz. Zmierzona częstotliwość drgań własnych poziomych wynosi 6.5 Hz i różni się od wartości obliczonej o ok. 1 Hz. W widmie drgań poziomych widoczne są wyższe, obliczone częstotliwości np. 22.7 Hz, 24.37 Hz. Na rys. 12 i 13 przedstawiono przykładowe amplitudy przyspieszeń drgań pionowych dźwigara i podłużnicy, a na rys. 14 amplitudy drgań poziomych środka dźwigara głównego. Analizę przeprowadzono w zakresie do 30 Hz, w przypadku drgań poziomych środka analizę wykonano również w zakresie do 150 Hz (rys. 14b).



Rys. 12. Amplitudy przyspieszeń drgań pionowych w czasie przejazdu pociągu osobowego:
 a) dźwigar – max. 0.99 m/s^2 , b) podłużnica – max 1.04 m/s^2



Rys. 13. Amplitudy przyspieszeń drgań pionowych w czasie przejazdu pociągu towarowego:
 a) dźwigar – max. 1.21 m/s^2 , b) podłużnica – max 1.12 m/s^2



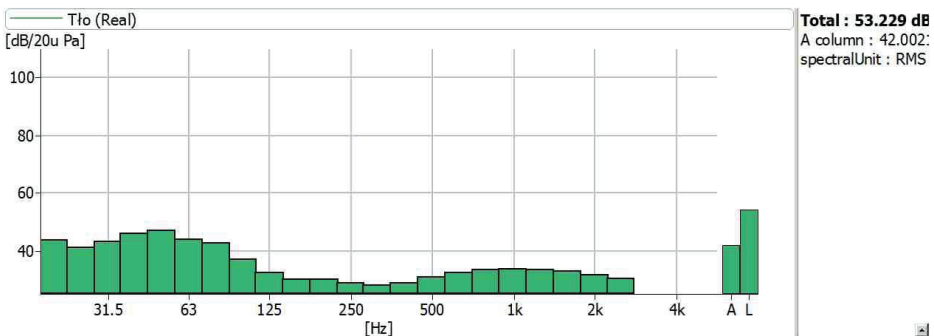
Rys. 14. Amplitudy przyspieszeń drgań poziomych blachownicy w czasie przejazdu pociągu towarowego: a) w zakresie do 30 Hz – max. 1.12 m/s², b) w zakresie 150 Hz – max 8.06 m/s²

Należy zaznaczyć, że ze względu na ograniczenie prędkości na badanym odcinku linii kolejowej, zarejestrowano przejazd z prędkością nie większą niż 70 km/h. Przyspieszenia drgań przy takich prędkościach były mniejsze od 5 m/s², czyli wartości granicznej podanej w [3].

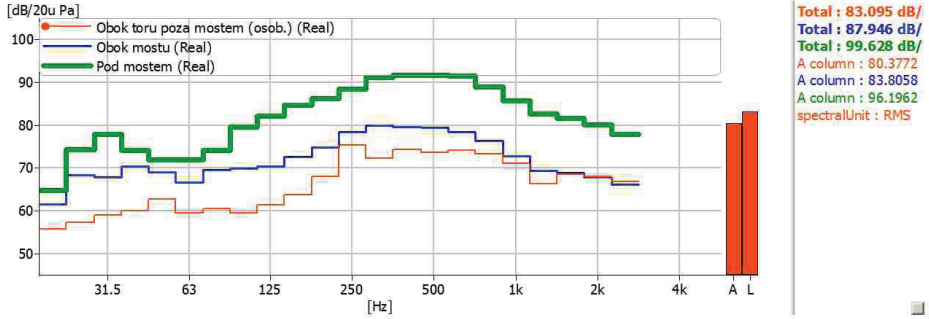
Przyspieszenia drgań poziomych w zakresie do 150 Hz osiągają wartości nawet ponad 8 m/s².

6. Wyniki pomiarów hałasu

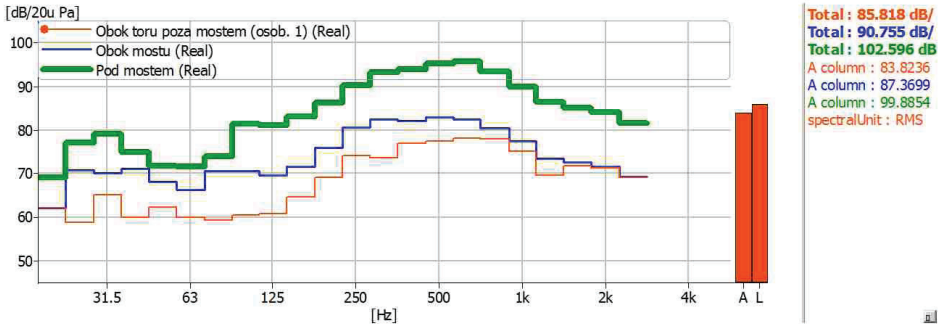
Przykładowe wyniki pomiarów hałasu w postaci tercjowych widm dźwięku przedstawiono na rys. 15 do 21. Na rys. 15 przedstawiono widmo poziomu ciśnienia akustycznego tła. Dla każdego pomiaru podano poziom dźwięku L (liniowy) i skorygowany poziom dźwięku L_A.



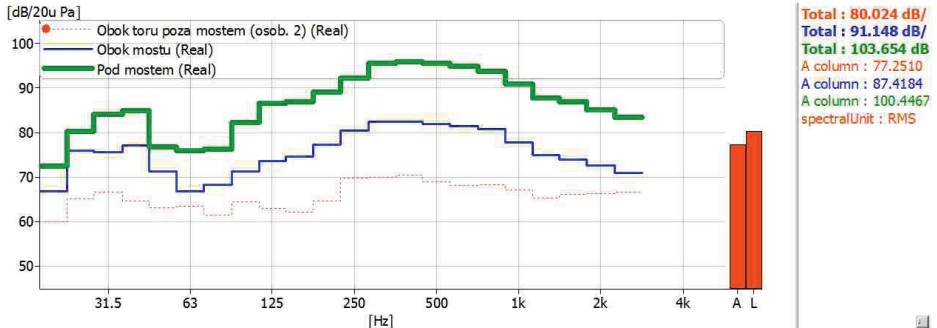
Rys. 15. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – tło



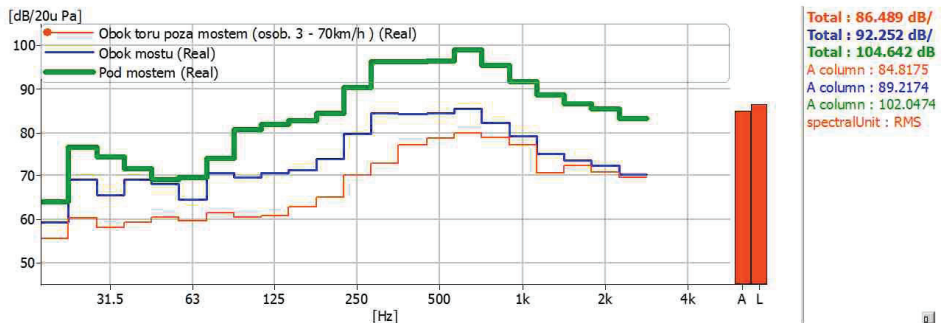
Rys. 16. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – przejazd pociągu osobowego z prędkością 50 km/h



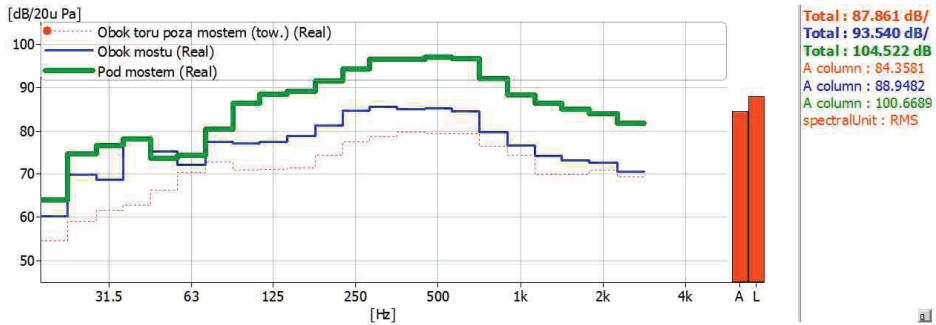
Rys. 17. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – przejazd pociągu osobowego z prędkością 60 km/h



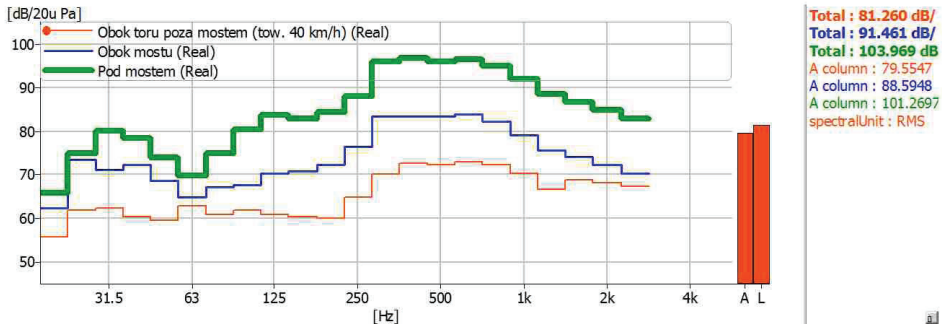
Rys. 18. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – przejazd pociągu osobowego zespolonego z prędkością 50 km/h



Rys. 19. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – przejazd pociągu osobowego z prędkością 70 km/h



Rys. 20. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – przejazd pociągu towarowego z prędkością 50 km/h



Rys. 21. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego – przejazd pociągu osobowego z prędkością 40 km/h

W tab. 2 zestawiono wyniki pomiarów hałasu. Podano wartości z uwzględnieniem krzywej korekcyjnej A.

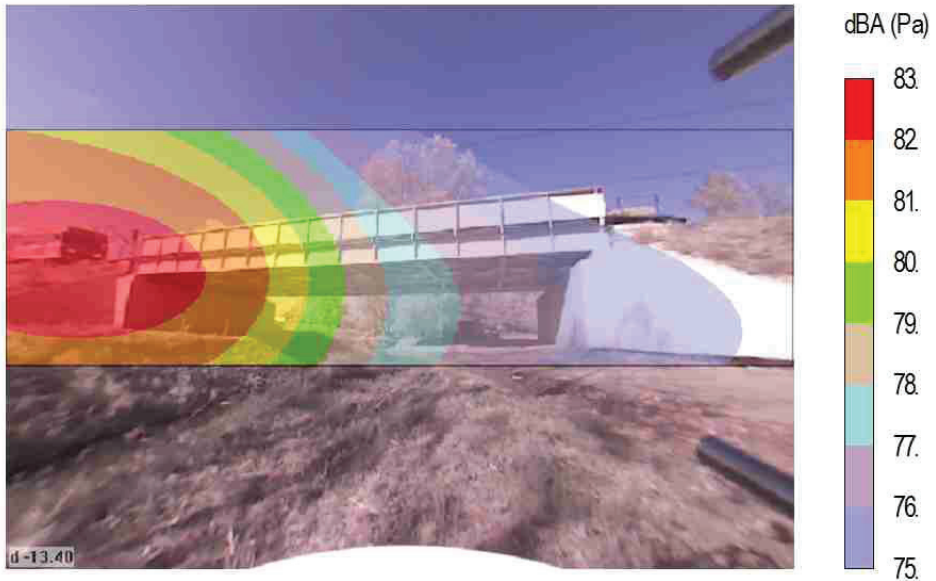
Tabela 2. Zestawienie wyników pomiaru hałasu

Lp.	Rodzaj pociągu	Prędkość przejazdu [km/h]	Poziom hałas L_A [dB]		
			obok toru poza mostem	obok mostu	pod mostem
1	tło	-	42,0		
2	osobowy	50	80,4	83,8	96,2
3	osobowy	60	83,8	87,4	99,9
4	osobowy	55	77,3	87,4	100,4
5	osobowy	70	84,8	89,2	102,0
6	towarowy	50	84,3	88,9	100,7
7	towarowy	40	79,6	88,6	101,3

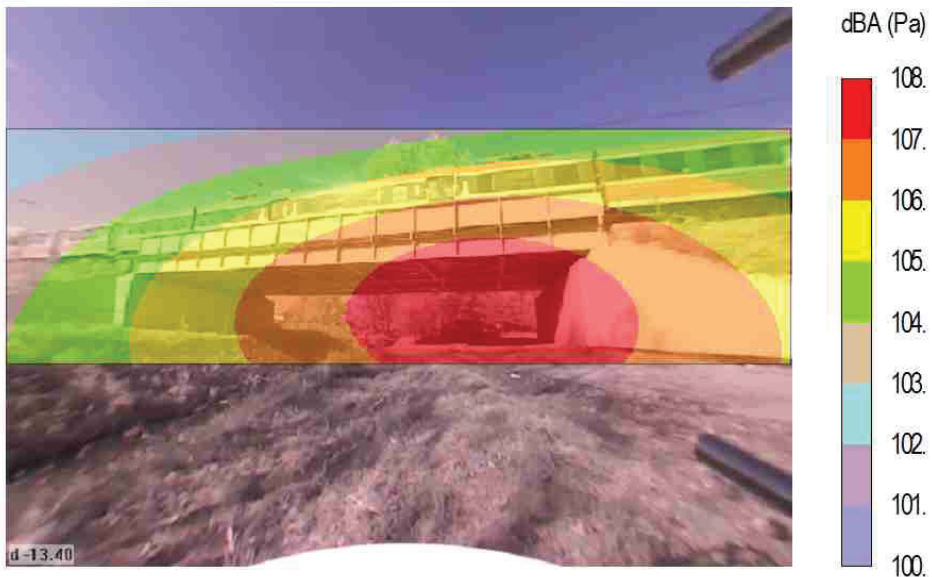
Wartości poziomu hałasu obok mostu w czasie przejazdów pociągów są o od 3.5 do 10 dB większe od poziomu hałasu obok toru poza mostem. Wartość poziomu hałasu zależy przede wszystkim od rodzaju pociągu, jego prędkości i stanu technicznego kół. Hałas pod mostem w kilku przypadkach przekracza 100 dB.

W czasie badań nie było możliwości zarejestrowania emisji akustycznej w czasie przejazdów z większymi prędkościami niż 70 km/h. Należy się spodziewać, że przy większych prędkościach oddziaływanie na środowisko będzie bardziej uciążliwe.

W celu identyfikacji dróg propagacji dźwięku wykonano badania kamerą akustyczną wyposażoną w 36 mikrofonów. Kamera była ustawiona obok mostu - rys. 8 i 9. Na rys. 22 i 23 przedstawiono wyniki badań hałasu w postaci map akustycznych, tj. rozkładu pola akustycznego.



Rys. 22. Rozkład pola akustycznego bezpośrednio przed wjazdem pociągu na most



Rys. 23. Rozkład pola akustycznego w czasie przejazdu pociągu przez most

Zarejestrowane sygnały pozwalają potwierdzić wysoki poziom emisji akustycznej w otoczeniu mostu oraz wykazały, że główną przyczyną hałasu i jego rozprzestrzeniania jest otwarty pomost w postaci rusztu podłużnicowo-poprzecznicy.

Hałas obok linii kolejowych, w tym obok mostów ma charakter hałasu nieustalonego. Jego wartość, w stosunku do tła, zmienia się w czasie nawet o ok. 50 dB. W przypadku tego typu hałasu, do oceny wpływu na środowisko, wyznacza się tzw. równoważny (ekwiwalentny) poziom hałasu oznaczany L_{Aeq} .

Dla badanego mostu przeprowadzono symulację obliczeniową zakładając, że w ciągu godziny przejeżdża 6 pociągów emitujących hałas o wartościach podanych w tab. 2. Obliczenia przeprowadzono przyjmując pojedyncze (cząstkowe) wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Jak wiadomo czas przejazdu po moście zależy od długości składu i prędkości pociągu. Do obliczeń przyjęto, że pociąg towarowy przejeżdża przez obiekt przez 30 sek., pociąg osobowy 15 sek., a podmiejski (zespólny) 10 sek. Poziom równoważny hałas obliczono ze wzoru [8]:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n n_i \cdot 10^{0.1L_{Ai}} \quad (1)$$

gdzie:

n – liczba przejazdów

L_{Ai} – chwilowy poziom dźwięku w [dB].

Przy założeniu, że przez most przejeżdża średnio w ciągu godziny 6 pociągów o charakterystykach przedstawionych w tab. 2. wartość równoważnego poziomu dźwięku wyniesie:

$$L_{Aeq} = 73.2 \text{ dB} \quad (2)$$

Jeżeli liczba pociągów o analogicznej strukturze będzie 2 krotnie większa to otrzymamy:

$$L_{Aeq} = 76.2 \text{ dB}. \quad (3)$$

Obliczone wartości są znacznie większe od wartości dopuszczalnych na terenach zabudowy wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego podanych w [6], tj. $L_{Aeq,D} = 65 \text{ dB}$ dla dnia i $L_{Aeq,N} = 56 \text{ dB}$ dla nocy. Na terenach w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców wartości dopuszczalne to odpowiednio: $L_{Aeq,D} = 68 \text{ dB}$ i $L_{Aeq,N} = 60 \text{ dB}$.

7. Podsumowanie

Analizy wibroakustyczne mostów kolejowych powinny być dzisiaj standardowym elementem procesu przygotowania i projektowania inwestycji.

W zakresie drgań konstrukcji o niskich częstotliwościach wartości dopuszczalne są skwantyfikowane w eurokodach, o których wspomniano wcześniej. W zakresie analiz akustycznych w eurokodach stwierdzono jedynie „*Wszelkie wymagania dotyczące emisji hałasu można podać w ustaleniach projektowych*”, co w praktyce oznacza, że wymagania dotyczące emisji hałasu powinny być określone przez inwestora.

Jeżeli takich wymagań inwestor nie zdefiniuje, to efektem może być budowa lub modernizacja obiektu, który w znacznym stopniu pogorszy klimat akustyczny w otoczeniu linii kolejowej. Należy zaznaczyć, że hałas kolejowy jest to hałas, w którym dominują dźwięki o niskiej częstotliwości, charakteryzujące się dużą długością fali. Fale te są tłumione w niewielkim stopniu przez powietrze, więc bez przeszkód przenikają do mieszkań, szkół, miejsc pracy, itp.

Przykład mostu opisanego w niniejszym artykule świadczy o tym, że most może spełniać wymagania w zakresie dopuszczalnych drgań natomiast stanowi zagrożenie dla środowiska poprzez nadmierną emisję hałasu.

Bibliografia

- [1] Cieśla J., Olaszek P., Biskup M., Mazanek M., Badania wybranych obiektów inżynierskich na linii CMK pod obciążeniem dynamicznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, str. 149-156, z. 58, nr 3/III, 2011.
- [2] Janas L., Ocena parametrów dynamicznych kratownicowego mostu kolejowego, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie, Tom 3, Wydanie 102, Str. 133-141, SITK, Oddział Kraków, 2013.
- [3] PN-EN 1990:2002/A1 Eurokod, Podstawy projektowania konstrukcji.
- [4] PN-EN 1993-2, Eurokod 3, Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 2: Mosty stalowe.
- [5] Salamak M., Łaziński P., Pradelok S., Bętkowski P., Badania odbiorcze mostów kolejowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym – wymagania i praktyka, INFRASZYN 2014, s. 218-227, Wydaw. Nauk. Inst. Technologii Eksploatacji PIB.
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, Dz. U. z dnia 8 października 2012 r., poz. 1109.
- [7] Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem.

- [8] Zakrzewski T., Żuchowski R., Kompendium akustyki architektonicznej wraz z przykładami obliczeń. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.