XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 24-27 maja 2011
awarie budowlane 2011

STEFAN PRADELOK, *stefan.pradelok@polsl.pl*
Katedra Dróg i Mostów, Politechnika Śląska w Gliwicach

ANALIZA DYNAMICZNA WIADUKTU O OSOBLIWEJ KONSTRUKCJI

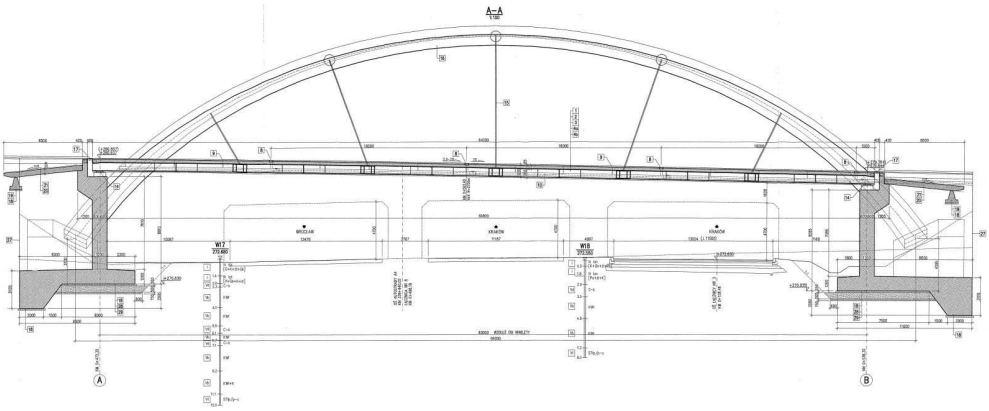
Dynamic analysis of a unique vaduct

Streszczenie W trakcie próbnego obciążenia wiaduktu drogowego stwierdzono jego dużą wrażliwość na oddziaływania dynamiczne. Zarejestrowano występowanie dudnień przy częstotliwości 2,50 Hz. Zjawisko to może być kojarzone, przy wspomnianej częstotliwości, z rezonansem i sprzężeniem przy jednocześnie słabym tłumieniu. W celu wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska przeprowadzono analizę modalną przedmiotowego obiektu. Następnie przeanalizowano wpływ ewentualnych zmian konstrukcyjnych na cechy dynamiczne wiaduktu. Przeanalizowano wariantowo zmianę sposobu ułożyskowania, montaż dodatkowych skośnych wieszaków, zwiększenie masy łuków przez wypełnienie ich betonem, dwukrotne zwiększenie masy płyty pomostowej, dwukrotne zwiększenie sztywności dźwigarów głównych oraz montaż tłumików masowych. Ze względu na ograniczenia w referacie przedstawiono tylko niektóre z wymienionych analiz. Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych zalecono montaż sytemu monitoringu.

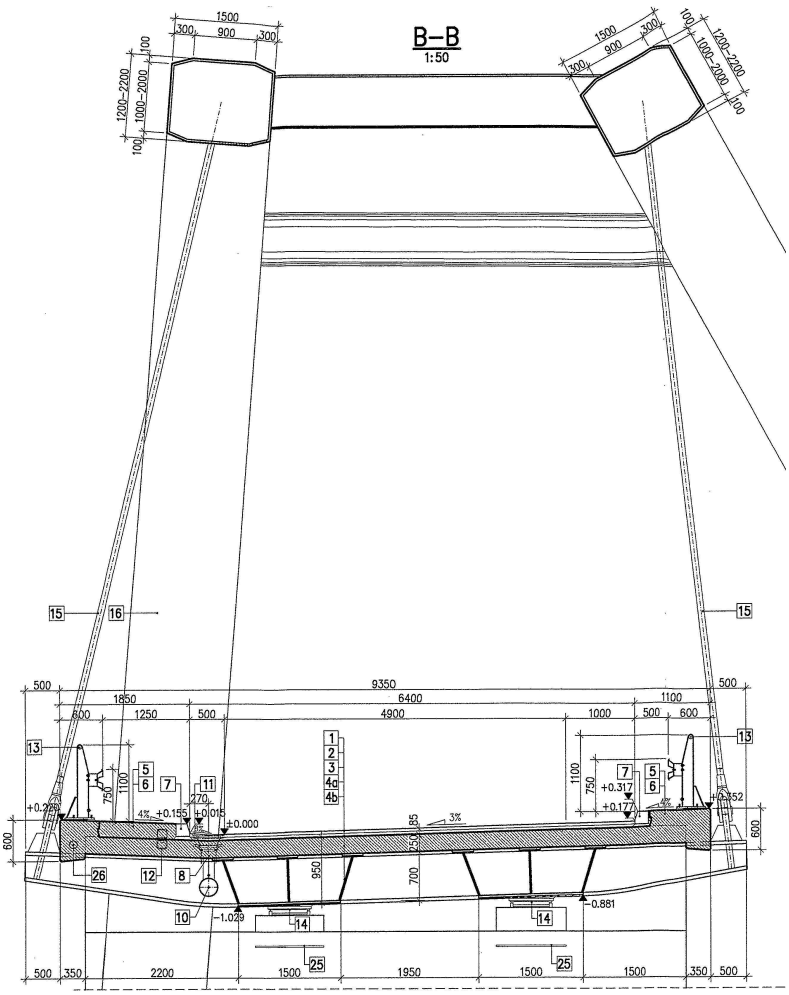
Abstract A high sensitivity to the dynamic loads was established during one road viaduct test loading. Rumbling was observed at 2,50 Hz frequency. That coincided with feedback which combined with low dumping was leading to a resonance. To explain the fact a modal analysis of the bridge was conducted, followed by analysis of sensitivity to various structural features: bearings arrangement, provision of additional inclined hangers, increase of arches mass through their filling with concrete, doubling the mass of the bridge slab, doubling of rigidity of main girders as well as addition of mass dumpers. Due to space limit, this paper presents only some of the mentioned analyses. The theoretical analysis led to a recommendation of an appropriate monitoring system, which is yet to be implemented.

1. Charakterystyka obiektu

Wiadukt WD 8.5 w ciągu łącznicy nr 8 Warszawa-Kraków na węźle Murckowska w Katowicach służy do przeprowadzenia ruchu samochodowego nad autostradą A4. Konstrukcja wiaduktu jest parą bezprzegubowych łuków stalowych z podwieszoną do nich za pomocą wieszaków żelbetowo-stalową konstrukcją pomostu. Szerokość obiektu wraz z gzymsami wynosi 9,35 m. Ustrój nośny oparty jest na przyczółkach za pomocą łożysk garnkowych. Rozpiętość obu łuków nośnych jest różna i wynosi odpowiednio 65,624 m i 69,347 m. Strzałka łuku mierzona w pionie osiąga 16,66 m. Wysokość konstrukcyjna od najniższego punktu na jezdni do najniższego punktu dźwigara to 1,03 m. Wysokość dźwigara stalowego 0,70 m. Płyta pomostowa ma grubość 0,25 m. Osobliwością obiektu jest zastosowanie rzadkich, promieniście nachylonych podwieszeń do łuku. Przekrój podłużny wiaduktu przedstawiono na rys. 1, a przekrój poprzeczny na rys. 2.



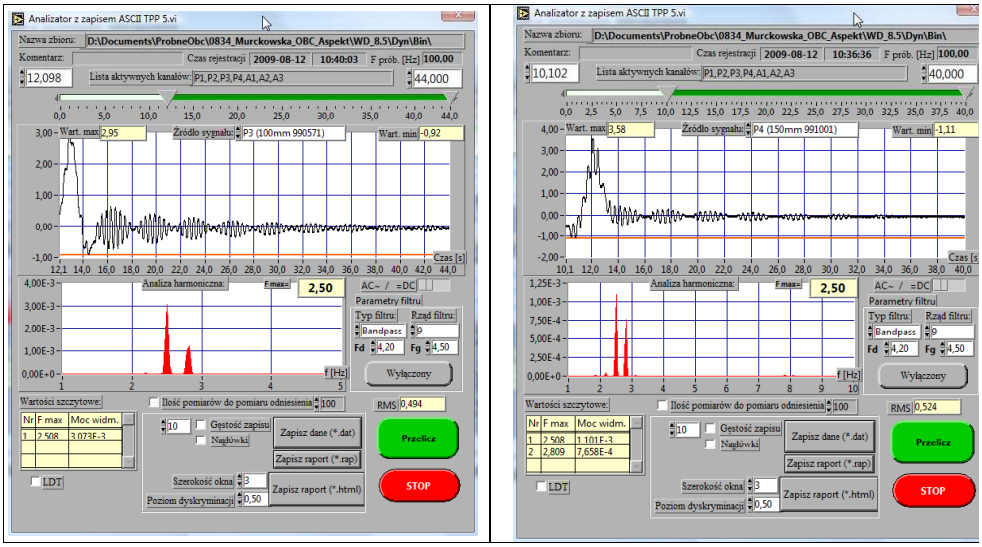
Rys. 1. Przekrój podłużny wiaduktu WD 8.5



Rys. 2. Przekrój poprzeczny wiaduktu WD 8.5

2. Wrażliwość dynamiczna

W trakcie próbnego obciążenia wiaduktu WD 8.5 stwierdzono dużą wrażliwość przedmiotowej konstrukcji na oddziaływania dynamiczne. Zarejestrowano występowanie dudnień przy częstotliwości 2,50 Hz. Zjawisko to może być kojarzone, przy wspomnianej częstotliwości, z rezonansem i sprzężeniem postaci. W przeciwieństwie do innych zakresów częstotliwości, ujawniło się słabe tłumienie drgań w tym zakresie. Wiadukt WD 8.5 okazał się więc być obiektem o nietypowym zachowaniu dynamicznym. Na rys. 3 przedstawiano zarejestrowane w wiadukcie dudnienia.



Rys. 3. Przykład zarejestrowanych dudnień przy przejeździe z prędkością 70 km/h

3. Analiza modalna

W celu wyjaśnienia przyczyn pojawiających się dudnień przeprowadzono analizę modalną. Model obliczeniowy opracowano na podstawie dokumentacji kolaudacyjnej. W obliczeniach wykorzystano model rusztu o sztywności i masie wynikającej z cech ustroju łukowego stalowo-betonowego. Masę całkowitą konstrukcji (łącznie z trwałymi elementami wyposażenia) zadano w programie Robot Millenium przez dodanie mas rozłożonych.

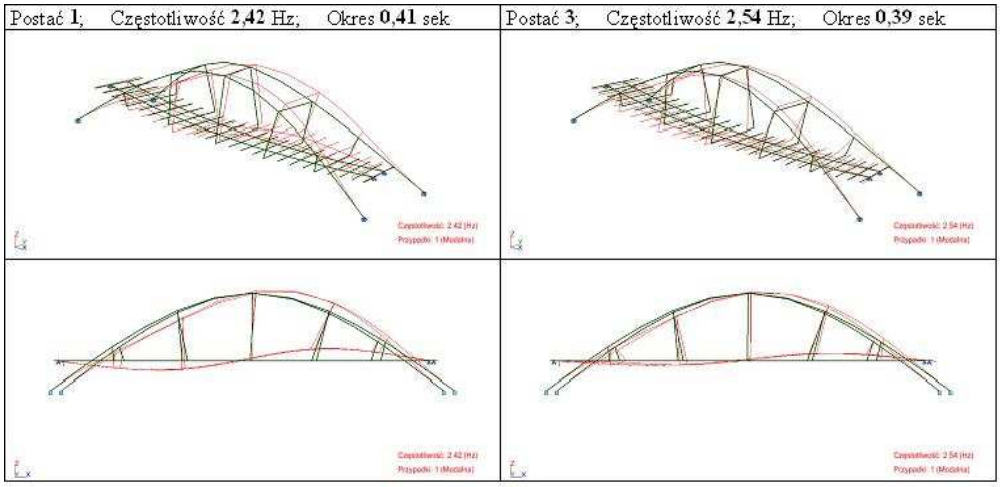
Przeprowadzona analiza modalna pozwoliła na wytłumaczenie pojawiających się w konstrukcji dudnień. Ujawniło się występowanie bardzo zbliżonych do siebie postaci drgań własnych, charakteryzujących się niemal identycznym ukształtowaniem w zakresie drgań giętnych, a zróżnicowaniem w zakresie drgań podłużnych pomostu i łuku. Ich częstości mieszczą się w przedziale wykrytych w badaniach słabo tłumionych dudnień.

Przy działaniu obciążenia przekłada się to na niemal identyczną wagę czynnika wymuszającego (pojazdu wjeżdżającego na obiekt) przy zróżnicowanej reakcji na łożyska. Dobra jakość zabudowanych łożysk (duża swoboda ruchów poziomych – czyli małe tłumienie) paradoksalnie wpływa na spotęgowanie omawianego efektu dynamicznego.

Tab. 1. Pierwszych 10 postaci drgań wiaduktu WD 8.5

Postać	**Częstotliwość [Hz]**	**Okres [sek]**	**Masa *UX* [%]**	**Masa *UY* [%]**	**Masa *UZ* [%]**
1	2,42	0,41	0,01	21,83	1,71
2	2,49	0,40	0,23	14,89	24,52
3	2,54	0,39	9,90	32,66	1,36
4	3,78	0,26	1,18	0,05	0,09
5	4,26	0,23	0,06	5,03	47,38
6	4,86	0,21	0,00	0,82	0,50
7	6,53	0,15	0,44	0,01	0,00
8	7,40	0,14	0,01	1,13	0,02
9	7,63	0,13	0,71	0,03	0,02
10	8,27	0,12	8,23	0,09	0,01

Pierwszą i trzecią postać drgań własnych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Pierwsza i trzecia postać drgań wiaduktu WD 8.5

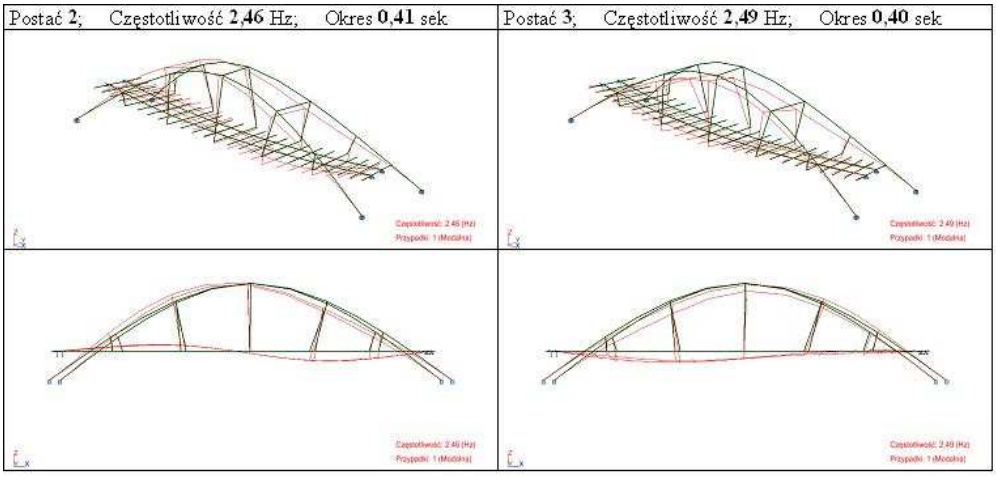
4. Poprawa parametrów dynamicznych wiaduktu

Analizując wyniki analizy modalnej można dostrzec, że znaczna część masy wiaduktu bierze udział w drganiach w kierunku osi Y (pozioma oś w kierunku poprzecznym). Zmiana sposobu ułożyskowania konstrukcji powinna spowodować zmianę postaci drgań. Łożysko nieprzesuwne oraz dowolnie przesuwne pozostają bez zmian. Natomiast łożyska na drugim końcu wiaduktu zostaną wymienione na elastomerowe.

Tab. 2. Pierwszych 10 postaci drgań wiaduktu WD 8.5 po zmianie ułożyskowania

Postać	**Częstotliwość [Hz]**	**Okres [sek]**	**Masa *UX* [%]**	**Masa *UY* [%]**	**Masa *UZ* [%]**
1	1,86	0,54	2,18	58,48	0,03
2	2,46	0,41	3,16	0,37	3,27
3	2,49	0,40	0,29	15,34	24,22
4	3,78	0,26	1,43	0,11	0,10
5	4,26	0,23	0,00	5,42	47,40
6	4,75	0,21	9,96	0,29	0,05
7	4,86	0,21	0,02	0,84	0,50
8	6,53	0,15	0,50	0,02	0,00
9	7,40	0,14	0,00	1,10	0,02
10	7,63	0,13	0,78	0,03	0,02

Drugą i trzecią postać drgań własnych, po zmianie ułożyskowania przedstawiono na rys. 5



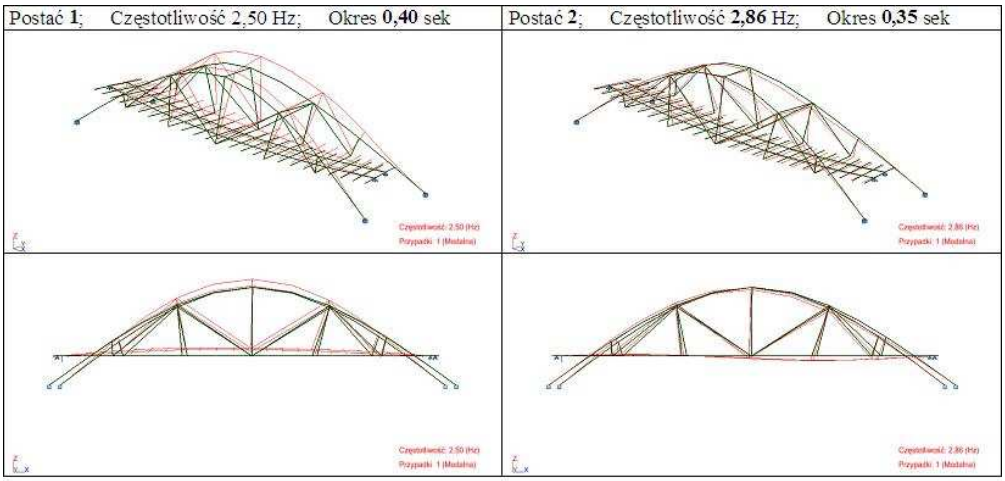
Rys. 5. Druga i trzecia postać drgań wiaduktu WD 8.5 po zmianie ułożyskowania

Geometria wiaduktu, w szczególności w zakresie podwieszeń, jest niekorzystna. Przeanalizowano więc wpływ montażu dodatkowych, skośnych wieszaków na cechy dynamiczne obiektu. Zmiana układu wieszaków w konstrukcji powinna spowodować zmianę postaci drgań. Do celów poniższej analizy założono, że dodatkowe wieszaki są prętami o takim samym przekroju jak wieszaki istniejące.

Tab. 3. Pierwszych 10 postaci drgań wiaduktu WD 8.5 po zmianie układu wieszaków

Postać	**Częstotliwość [Hz]**	**Okres [sek]**	**Masa *UX* [%]**	**Masa *UY* [%]**	**Masa *UZ* [%]**
1	2,50	0,40	0,66	35,52	24,19
2	2,86	0,35	8,50	28,79	3,13
3	3,73	0,27	0,03	5,75	0,40
4	4,20	0,24	1,92	0,20	0,13
5	4,31	0,23	0,07	5,18	44,41
6	5,77	0,17	0,00	0,02	4,07
7	7,94	0,13	0,00	0,82	0,01
8	7,99	0,13	0,00	0,35	0,01
9	8,14	0,12	0,14	0,04	0,00
10	8,91	0,11	4,19	0,44	0,07

Dwie pierwsze postacie drgań własnych, po zmianie układu wieszaków przedstawiono na rys. 6



Rys. 6. Pierwsza i druga postać drgań wiaduktu WD 8.5 po zmianie układu wieszaków

Przeanalizowano również inne możliwości poprawy parametrów dynamicznych obu wiaduktów:

– zwiększenie masy łuków przez wypełnienie ich betonem,
– dwukrotne zwiększenie masy płyty pomostowej,
– dwukrotne zwiększenie sztywności dźwigarów głównych.

Jednak zabiegi te były mało skuteczne. Uzyskiwane w ich wyniku zmiany charakterystyk dynamicznych nie wykluczały możliwości dalszych dudnień w analizowanym wiadukcie, gdyż wpływały głównie na drgania giętne. Ponadto realizacja niektórych z analizowanych wariantów byłaby trudna i kosztowna.

5. Efektywność rozwiązań

Amplitudy drgań nie są wielkie, nie mają znaczącego udziału w składzie decydującym o wytrzymałości doraźnej głównych elementów konstrukcji. Niejasny jest jednak ich wpływ na detale konstrukcji, szczególnie te, które charakteryzują się karbami (węzły połączenia, łożyska). Możliwość nakładania się drgań pod ruchem eksploatacyjnym rodzi tu podejrzenie o zintensyfikowanie w nich wpływów zmęczeniowych. Ponieważ mamy tu do czynienia z procesem losowym, jedyną możliwość rozpoznania tego zjawiska daje monitoring konstrukcji.

Jak wykazały analizy teoretyczne, możliwe są skuteczne środki zaradcze. Nietypowym, swoistym dla tego przypadku rozwiązaniem mogłoby być przeprojektowanie łożysk ruchomych. Jego skuteczność polegałaby na utworzeniu łożysk „nieidealnych", to jest zamiast zapewnienia swobody przesuwu, dać kontrolowane opory tego przesuwu z jednoczesnym wprowadzeniem tłumienia. Rozwiązanie to jest wprost drogą usuwania podstawowej przyczyny zjawiska. Teoretycznie wystarczyłyby tu odpowiednio dobrane łożyska elastomerowe ze swą odkształcalnością postaciową. Praktycznie jednak byłoby to rozwiązanie dość krótkotrwałe z dwóch co najmniej powodów. Pierwszym byłoby pojawienie się jakościowo innych warunków pracy takich łożysk. Zamiast bowiem wolnozmiennych odkształceń termicznych, narażone byłyby one na wysokocyklowe odkształcenia postaciowe. Odkształcenia te nie byłyby bez wpływu na wrażliwą w tym zakresie konstrukcję łożysk elastomerowych. Można domniemać, że doprowadziłoby to do szybkiego ich zużycia i konieczności wymiany. Drugim powodem stawiającym w wątpliwość długotrwałość rozwiązania jest fakt zaprojektowania obiektu na działanie wpływów deformacji górniczych. W przeciwieństwie do łożysk przesuwnych, łożyska oporowe wymagałyby dość częstych rektyfikacji.

Alternatywą do łożysk elastomerowych mogłoby być zaprojektowanie indywidualnych, specyficznych dla tego obiektu łożysk z typu tak zwanych rozwiązań „inteligentnych", to znaczy mających możliwość automatycznego dostosowywania się do zmieniających się warunków. Niewątpliwie byłoby to rozwiązanie kosztowne, a prototypowość jego nie gwarantowałaby skuteczności w pierwszym przybliżeniu rozwiązania. Temu rozwiązaniu z natury swej koniecznie też musiałby towarzyszyć monitoring konstrukcji.

Inną skuteczną metodą, jak wynika z analizy, mogłoby się okazać dodanie przekątniowych wieszaków. Byłby to sposób na równi skuteczny z modernizacją ułożyskowania. Może być on trudny w realizacji, ale ma przewagę nad poprzednim ze względu na trwałość rozwiązania.

Inne analizowane sposoby usunięcia nadmiernej bliskości częstości drgań w zakresie budzącym troskę są mało efektywne i za bardzo ingerowałyby w system konstrukcyjny lub wizualny obiektu.

Generalnie, w przeciwieństwie do problemu stanów granicznych użytkowalności w kładkach dla pieszych, nie mamy tu do czynienia z koniecznością ograniczenia amplitudy drgań konstrukcji. Jak wspomniano, wykryte słabo tłumione dudnienia z punktu widzenia wytrzymałości doraźnej są nieznaczące i nie jest potrzebna redukcja amplitud towarzyszących im drgań giętnych, na przykład przez zastosowanie tłumików masowych, czy redukcja amplitudy drgań podłużnych przez zastosowanie łożysk oporowych. Podstawowym pytaniem jest, czy i które z tych wpływów mogłyby wykazywać tendencje narastające pod wpływem wymuszeń eksploatacyjnych, oraz czy nie przekazują się one w sposób bardziej znaczący na miejsca karbów.

Monitoring konstrukcji może dać jednoznaczną odpowiedź na to pytanie. W każdym zaś przypadku jest elementem bezpiecznego użytkowania obiektów ze względu na mechanizmy sygnalizacji zmian i uszkodzeń. Dlatego w tej sytuacji jego instalację uważa się za konieczność, z dużym prawdopodobieństwem poprzestania na nim.

6. Wnioski

Po przeprowadzeniu weryfikujących analiz teoretycznych konstrukcji dotyczących sposobów poprawy parametrów dynamicznych wiaduktu WD 8.5 znajdującego się na węźle Murckowska w Katowicach stwierdza się, że:

– mogą pojawić się obiekty, w których nie będą zaniedbywalne wpływy drgań podłużnych,
– w badanym obiekcie pojawiły się bardzo bliskie sobie częstości o podobnych postaciach drgań giętnych, co w trakcie wymuszenia doprowadza do niekorzystnego ich współbrzmienia,
– istnieje kilka technicznych możliwości poprawy parametrów dynamicznych przedmiotowego wiaduktu (montaż masowych tłumików drgań, zmiana ułożyskowania i zmiana układu wieszaków),
– każdy z wymienionych sposobów wymaga zmian mniej lub bardziej ingerujących w obecny system konstrukcyjny,
– największe możliwości pod względem regulacji parametrów dynamicznych daje zastosowanie masowych tłumików drgań, a pod względem skuteczności – dodanie skośnych wieszaków,
– w przypadku nietypowego zachowania się konstrukcji konieczny jest jej monitoring pod obciążeniami eksploatacyjnymi.

Literatura

1. Pradelok S., Salamak M., Fiebik W.: Analiza możliwości zastosowania tłumików drgań do poprawy parametrów dynamicznych konstrukcji wiaduktów WD 2.2 i WD 8.5 na węźle Murckowska w Katowicach, KDM Politechnika Śląska Gliwice 2010.