

## Badania wiaduktu nad torami kolejowymi przy PGE Arena w Gdańsku podczas jego realizacji

Jacek Chróścielewski<sup>1</sup>, Mikołaj Miśkiewicz<sup>1</sup>, Łukasz Pyrzowski<sup>1</sup>,  
Magdalena Rucka<sup>1</sup>, Krzysztof Wilde<sup>1</sup>

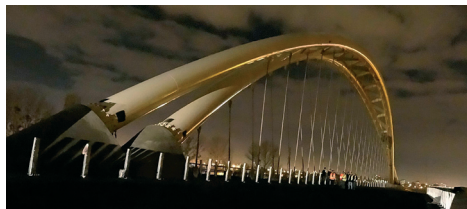
<sup>1</sup> Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: jacek.chroscielewski@pg.gda.pl, mikolaj.miskiewicz@pg.gda.pl, lukasz.pyrzowski@pg.gda.pl, magdalena.rucka@pg.gda.pl, krzysztof.wilde@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono badania wiaduktu WD-1 realizowanego w ramach Trasy Słowackiego w Gdańsku. Ze względu na nietypową, innowacyjną formę splecionego łukowego dźwigara nośnego Laboratorium DIM (Diagnostyki, Identyfikacji i Monitoringu) działającemu przy Katedrze Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej zlecono opracowanie i realizację badań kontrolnych. Zakresem badań objęto monitoring węzłowiec łuków i sił w wieszakach linowych podczas ich naciągania oraz próbne obciążenie obiektu.

**Słowa kluczowe:** systemy monitoringu konstrukcji (SMK), wiadukt łukowy, próbne obciążenie, badania.

### 1. Wprowadzenie

Historia rozwoju społeczeństw pokazuje, iż wzrost ich zamożności z natury kreował zwiększenie wydatków na budownictwo stymulując tendencje do poszukiwań ciekawych form architektonicznych. Do tego typu nietypowych obiektów można zaliczyć znajdujący się w sąsiedztwie stadionu PGE Arena wiadukt WD-1 zrealizowany w ramach budowy Trasy Słowackiego w Gdańsku. Innowacyjność obiektu polega na zastosowaniu unikalnych, przeplecionych dźwigarów łukowych (rys. 1) podkreślających lekkość wiaduktu.



Rys. 1. Wiadukt WD-1

W przypadku prototypowych dzieł inżynierskich celowym i coraz powszechniejszym jest prowadzenie technicznych badań kontrolnych w trakcie ich wznoszenia. Podejście takie pozwala na weryfikację przyjętych, często unikalnych, założeń teoretyczno-projektowych dotyczących pracy obiektu. Badania takie pozwalają również na utwierdzenie wykonawcy o właściwej i bezpiecznej realizacji obiektu służąc na bieżąco wsparciem w podejmowaniu trudnych decyzji. Uczestnicy procesu budowlanego związanego z wiaduktem WD-1: projektant mgr inż. Krzysztof Topolewicz (TOP Projekt), przedstawiciel wykonawcy mgr inż. Jacek Szymański (Budimex S.A.) oraz przedstawiciel inwestora mgr inż. Adam Łosiński (GIK sp. z o.o.) zlecieli innowacyjne badania weryfikacji procesu wznoszenia obiektu zespołowi z Katedry Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej.

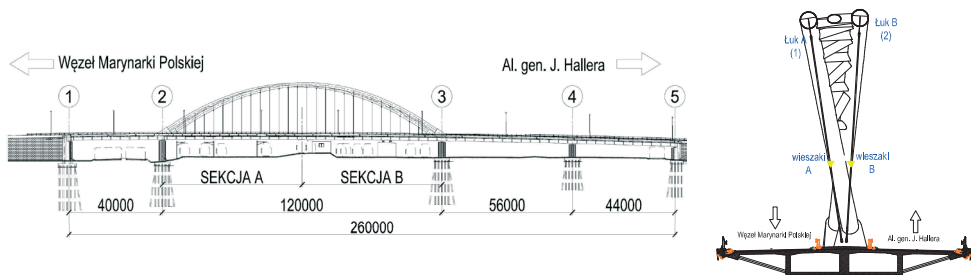
Badania podjęto po zakończeniu osadzania dźwigarów łukowych, a w trakcie podwieszenia pomostu oraz odbioru wiaduktu do eksploatacji. Badania obejmowały:

- monitoring węzłowi dźwigara łukowego wraz z obejmami ciągnowymi,
- pomiar sił w wieszakach linowych metodami bezinwazyjnymi,
- statyczne i dynamiczne próbne obciążenie, w tym:
  - badanie dynamiczne przy wymuszeniu impulsowym,
  - badania dynamiczne w szerokim spektrum obciążenia harmonicznego wymuszonym mechaniczno-elektromagnetycznym wzbudnikiem sterowanym elektronicznie.

## 2. Charakterystyka obiektu

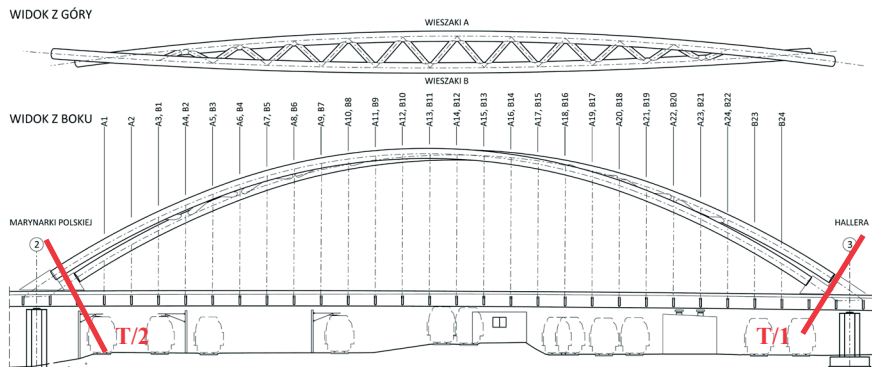
Wiadukt drogowy WD-1 wykonano w ramach realizacji zadania „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego. Zadanie III. Odcinek Al. Gen. J. Hallera – Węzeł Marynarki Polskiej” [1].

Obiekt WD-1 to czteroprzęsłowa konstrukcja skrzynkowa z betonu sprężonego poprzecznie i podłużnie, z przęsłem nad torami kolejowymi podwieszonym do stalowego dźwigara łukowego (rys. 2). Szerokość skrzynki na długości obiektu jest zmienna. Płyta górna przekroju jest przewieszona i podparta stalowymi zastrzałami zamocowanymi w zewnętrznych ścianach przekroju na wysokości płyty dolnej.



Rys. 2. Widok z boku i przekrój poprzeczny przęsła łukowego

Podwieszenie przęsła nr 2 do stalowego dźwigara łukowego, wykonanego z dwóch połączonych ze sobą oplatających się rur, odbywa się przy pomocy 48 wieszaków linowych wykonanych ze stali wysokowęglowej (rys. 3).



Rys. 3. Widok z góry i z boku przęsła łukowego, oznaczenie wieszaków i przekroji pomiarowych podczas monitoringu

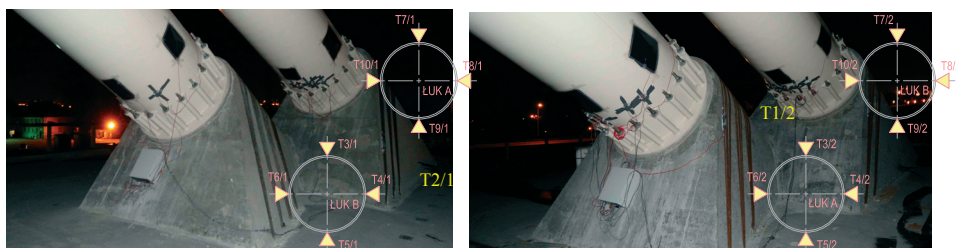
Podstawowe dane techniczne i użytkowe obiektu:

- klasa obciążeń „A” wg PN-85/S-10030,
- klasa drogi na obiekcie G,
- szerokość jezdni zmienna, min.  $2 \times 7,0\text{m}$ ,
- spadek poprzeczny dwustronny 2,5%,
- spadki poprzeczne na gzymsach 4,0%,
- szerokość w świetle barier - zmienna, min.  $2 \times 8,0\text{m}$ ,

- szerokość pomiędzy krawężnikami - zmienna, min.  $2 \times 7,0\text{m}$ ,
- szerokość całkowita - zmienna  $22,6 \div 30,6\text{m}$ .

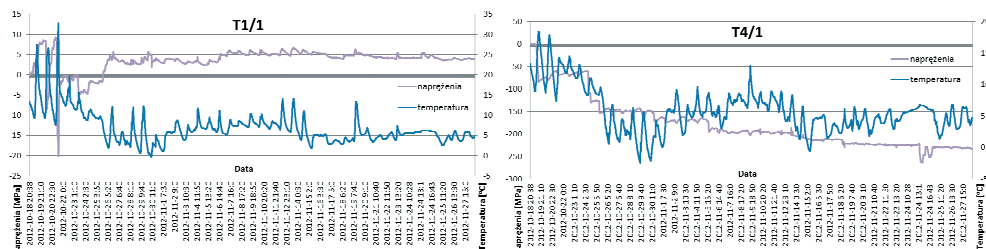
### 3. Monitoring wezłownii łuku

Celem zainstalowanego systemu monitoringu była kontrola stanu konstrukcji podczas prac związanych z podwieszaniem sprężonego pomostu betonowego do stalowego dźwigara łukowego [2]. Pomiary w wybranych punktach pomiarowych umożliwiły ocenę zakresu współpracy betonowego wezłowania łuków z płytą pomostu. Monitoring obejmował śledzenie zmian odkształceń i temperatury łuku w rejonie podporowym (16 pkt. pomiarowych, tj. T3/1-T10/1 i T3/2-T10/2) oraz pracy lin doprężających (4 pkt. pomiarowe, tj. T1/1, T2/1, T1/2, T2/2) betonową część wezłowania względem płyty pomostu (rys. 4).



Rys. 4. Wezłowania dźwigara łukowego z zainstalowanymi punktami pomiarowymi

Monitoring wezłownii dźwigara łukowego prowadzony był w okresie 18.10. – 28.11.2012. W tym czasie napięte zostały wszystkie wieszaki przęsła łukowego, zwolniono pomost z podpór tymczasowych, zamontowano i wykonano elementy wyposażenia oraz zrealizowano próbne obciążenie odbiorowe obiektu. Ze względu na statyczny charakter głównych oddziaływań do pomiaru odkształceń użyto ekstensometrów strunowych. Czujniki te charakteryzują się długoterminową stabilnością pomiarów oraz po ich odpowiednim zabezpieczeniu oczekiwaną odpornością na oddziaływania środowiskowe.



Rys. 5. Przebieg zmian naprężeń i temperatury w punkcie T1/1 zlokalizowanym na jednej z lin doprężających wezłowie oraz w T4/1 na łuku

We wszystkich punktach pomiarowych jako poziom odniesienia przyjęto wartości pomiarowe w momencie rozpoczęcia monitoringu i rejestrowano przyrosty odkształceń. Ekstremalne, zarejestrowane zmiany odkształceń oraz temperatury dla przekroju T/1 zestawione są w tabeli 1. Zmiany naprężeń i temperatury w punkcie T1/1 zlokalizowanym na jednej z lin doprężających wezłowie oraz w T4/1 na łuku pokazane są na rys. 5.

Tabela 1. Ekstremalne zarejestrowane przyrosty naprężeń i temperatury w przekroju T/1

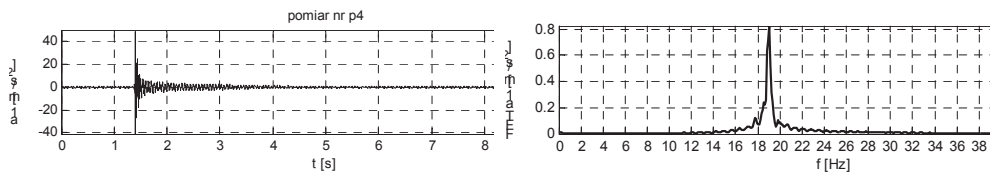
		T1/1	T2/1	T3/1	T4/1	T5/1	T6/1	T7/1	T8/1	T9/1	T10/1
Naprężenia [MPa]	max	16,0	5,0	9,0	13,0	14,7	9,7	10,0	14,0	16,7	29,5
	min	-20,1	-1,9	-159,8	-263,9	-117,3	-23,0	-109,6	-162,5	-40,6	-14,4
Temperatura [°C]	max	32,8	17,7	22,2	18,4	20,4	27,5	18,3	17,3	18,9	27,8
	min	-0,3	0,5	-2,8	-2,5	-1,5	-2,4	-2,6	-1,7	-1,0	-2,4

Największy przyrost naprężeń na łukach stalowych zarejestrowano w punkcie T4/1. Wyniósł on 263,9 MPa a wystąpił podczas próbnego obciążenia obiektu. Pomiary na linowych obejmach węzłowi konstrukcji nie wykazały istotnych zmian naprężeń podczas okresu monitoringu. Głównym oddziaływaniem, które wpływało na zmiany naprężeń w linach były dobowe i dzienne zmiany temperatury.

#### 4. Cykliczne pomiar sił w linach

Pomiar sił w linach prowadzono w trakcie podwieszenia pomostu do dźwigara. Badania te na bieżąco wspomagały projektanta w etapowaniu sił naciągu, tak aby osiągnąć docelową niweletę konstrukcji przy nieprzekroczeniu nośności poszczególnych jej elementów. Pomiary sił we wszystkich 48 wieszakach (rys. 3) przeprowadzono czterokrotnie i dodatkowo dwukrotnie tylko w wieszakach wskazanych w celu potwierdzenia założeń przyjętych w obliczeniach [3]. Wyniki po przeprowadzeniu prób niezwłocznie przekazywano projektantowi obiektu do przeprowadzenia weryfikacji i uaktualnienia programu naciągu wieszaków.

Pomiary sił w linach realizowano metodami bezinwazyjnymi nienaruszającymi powłok antykorozyjnych olinowania poprzez pomiar częstotliwości drgań własnych napiętych lin po ich odpowiednim wzbudzeniu impulsem dynamicznym. W każdej z 4 prób w trzech niezależnych wzbudzeniach z próbkowaniem 512 Hz wykorzystano system do pomiaru oraz analizy drgań i dźwięku LMS SCADAS. Przykładowy wykres wyników pomiaru siły w linie przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zarejestrowane sygnały pomiarowe w dziedzinie czasu i częstotliwości dla liny A2

#### 5. Badania podczas próbnego obciążenia

Badania podczas próbnego obciążenia wiaduktu WD-1 przeprowadzono w listopadzie 2012 r. W trakcie badań panowały stałe warunki atmosferyczne, bez opadów, a zarejestrowane zmiany temperatury konstrukcji wahały się od 6.1°C do 8.2°C. Do testów wykorzystano maksymalnie w jednym ustawieniu 16 samochodów o masie całkowitej około 27 t każdy [4, 5].

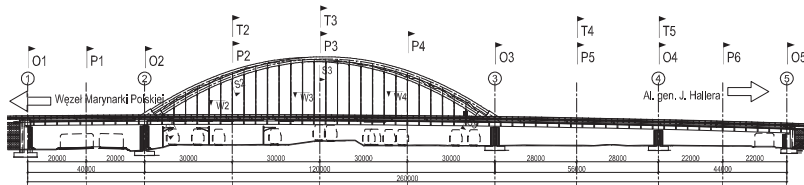


Rys. 7. Ustawienie U2 obciążenia próbnego

Podczas badań statycznych całego obiektu zrealizowano łącznie 6 ustawień statycznych realizujących 42 schematy obciążeń. Ustawienia U1, U3, U4, U5 dotyczyły przęseł belkowych, zaś U2 (rys. 7) i U6 przęśla łukowego. Wykonywano pomiary (rys. 8 i rys. 9):

- ugięcie przęseł – łącznie w 18 punktach pomiarowych (6 przekroji P1-P6 po 3 punkty w każdym),
- przemieszczeń pionowych i poziomych konstrukcji dźwigara łukowego – 7 punktów pomiarowych (podpora 2 i 3, L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4, 7L/8),
- odkształceń stalowego dźwigara łukowego – 24 punkty pomiarowe zlokalizowane w przekrojach S1 (8 punktów), S2 (4 punkty), S3 (4 punkty), S5 (8 punktów),
- temperatury konstrukcji – łącznie 38 punktów pomiarowych zlokalizowanych

- w przekrojach S1 (8 punktów), S2 (4 punkty), S3 (4 punkty), S5 (8 punktów), T2 (3 punkty), T3 (3 punkty), T4 (3 punkty), T5 (3 punkty),
- odkształceń cięgowych obejm węzłowi łuku – 4 punkty pomiarowe zlokalizowane w przekrojach S1 (2 punkty) oraz S2 (2 punkty),
  - odkształceń pomostu – 14 punktów pomiarowych zlokalizowanych w przekrojach T2 (3 punkty), T3 (3 punkty), T4 (3 punkty), T5 (3 punkty),
  - pomiarów sił w linach – łącznie 6 punktów pomiarowych w przekrojach W2 (2 punkty), W3 (2 punkty), W4 (2 punkty),
  - skanowanie przeszła łukowego – w siatce o oczku 5×5cm całej konstrukcji,
  - osiadania podpór – 10 punktów pomiarowych (po 2 na każdej podporze).

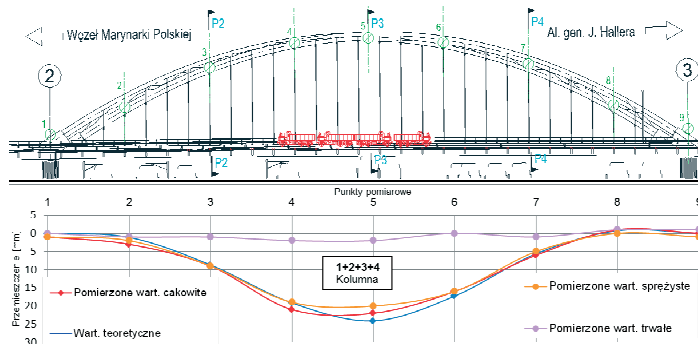


Legenda:

T2 ÷ T6 - odkształcenia (naprężenia) pomostu  
S1 ÷ S6 - odkształcenia (naprężenia) łuku

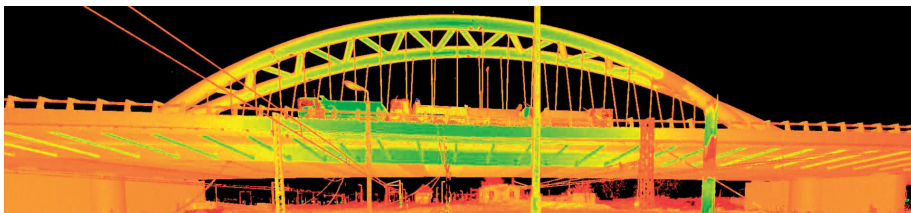
O1 ÷ O5 - osiadania podpór  
W2 ÷ W4 - pomiar sił w wieszakach  
P1 ÷ P6 - ugięcia i przyspieszenia

Rys. 8. Przekroje pomiarowe



Rys. 9. Przemieszczenia dźwigara łukowego zarejestrowane podczas realizacji ustawienia U2. Oznaczenie przekrojów pomiarowych przemieszczeń

Dodatkowo, poza metodami ujętymi w projekcie statycznych badań odbiorowych, testowano technikę pomiaru deformacji z użyciem skanera laserowego stosując siatkę pomiarową o oczku 5×5 cm (rys. 10). Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników skanowania w odniesieniu do pomiarów realizowanych metodami tradycyjnymi. Niewątpliwą zaletą wykorzystania skanera jest możliwość automatycznego zapisu cyfrowego obrazu geometrii w każdym widzianym punkcie konstrukcji. Wadą skaningu jest jeszcze stosunkowo niska dokładność pomiaru małych deformacji bezwzględnych.



Rys. 10. Skan konstrukcji podczas realizacji ustawienia U2



Tabela 2. Ekstremalne zarejestrowane przyrosty przemieszczeń pomostu przęsła łukowego podczas realizacji próbnego obciążenia

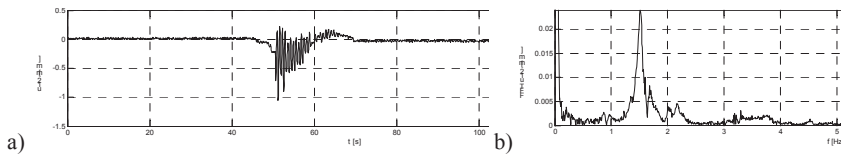
Ustawienie	Punkt pomiarowy	$f_{\text{spręż.}}$	$f_{\text{teoret.}}$	$f_{\text{spręż.}} / f_{\text{teoret.}}$
		[mm]	[mm]	[%]
Ustawienie U2	UG3/L	24.11	27.96	86
	UG3/S	21.21	24.79	86
	UG3/P	24.16	28.82	84

Uzyskane rozkłady poprzeczne i podłużne ugięć konstrukcji podczas prób statycznych były zgodne z obliczonym, a pomierzone ekstremalne wartości ugięć trwałych mieścił się w zakresie dopuszczalnym (tabela 2).

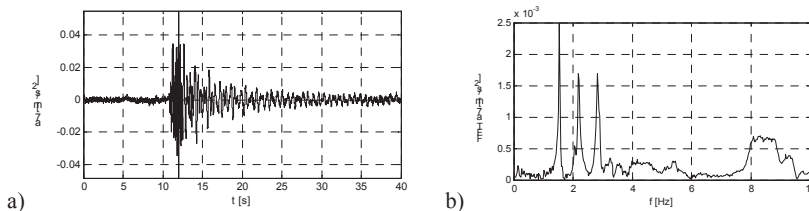
W badaniach dynamicznych rejestrowano ewolucję wskazanych parametrów stanu powodowaną obciążeniem ruchomym od kontrolowanych przejazdów samochodów ciężarowych w różnych konfiguracjach. Łącznie przeprowadzono 74 testy. Dodatkowo, niezależnie od testów przewidzianych w projekcie odbiorowym, badano reakcję konstrukcji na wzbudzenie dynamiczne impulsem obciążenia oraz wzbudnikiem drgań harmonicznych. Podczas badań mierzono i rejestrowano:

- ugięcia konstrukcji przęsła – łącznie 18 punktów pomiarowych (6 przekroji P1-P6 po 3 punkty w każdym),
- przyspieszenia konstrukcji przęsła – łącznie 18 punktów pomiarowych (6 przekroji P1-P6 po 3 kanały pomiarowe w każdym),
- przyspieszeń dźwigara łukowego – 2 punkty pomiarowe w kluczu dźwigara A.

Przykładowe zarejestrowane przebiegi przedstawione są na rys. 11 i 12.



Rys. 11. Zmiana wartości przemieszczeń w punkcie u12 wywołana przejazdem pojedynczego samochodu z prędkością 10km/h przez próg: a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości



Rys. 12. Przebieg przyspieszeń w punkcie a7 wywołany impulsem (skokiem) obciążenia: a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości

Tabela 3. Zidentyfikowane podczas badań częstotliwości i postaci drgań własnych

Lp	Częstotliwość drgań własnych – pomierzona [Hz]	Częstotliwość drgań własnych – teoretyczna [Hz]	Zidentyfikowana postać drgań
1	0.8	0.795	Ruch poziomy łuku
2	1.525	1.605	Ruch pionowy pomostu
3	2.075	2.01	Ruch pionowy i poziomy pomostu – postać skrętna
4	2.825	2.8	Ruch pionowy pomostu

Na podstawie badań zidentyfikowano częstotliwości i postacie drgań własnych konstrukcji. W tabeli 3 przedstawiono porównanie wartości pomierzonych z teoretycznymi. Wykonane badania wykazały, że pomiar drgań w punkcie a7 generowany normowym przejazdem balastu (rys. 11) umożliwił zidentyfikowanie mniejszej liczby częstotliwości niż alternatywne obciążenie impulsowe (rys. 12) wywołane autorską techniką skoku balastu

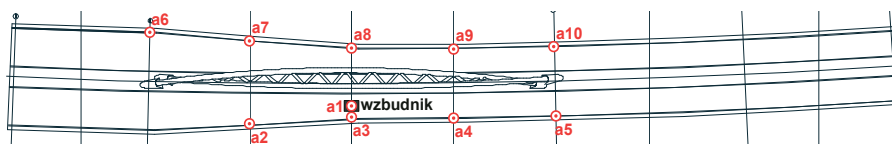
z pręgu zaproponowaną przez Zespół Katedry Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej [6]. Oszacowana na podstawie zrealizowanych badań dynamicznych liczba tłumienia dla wiaduktu WD-1 wyniosła  $\xi=2,1\%$ .

Wyniki badań statycznych i dynamicznych potwierdziły prawidłową pracę obiektu w zakresie sprężystym.

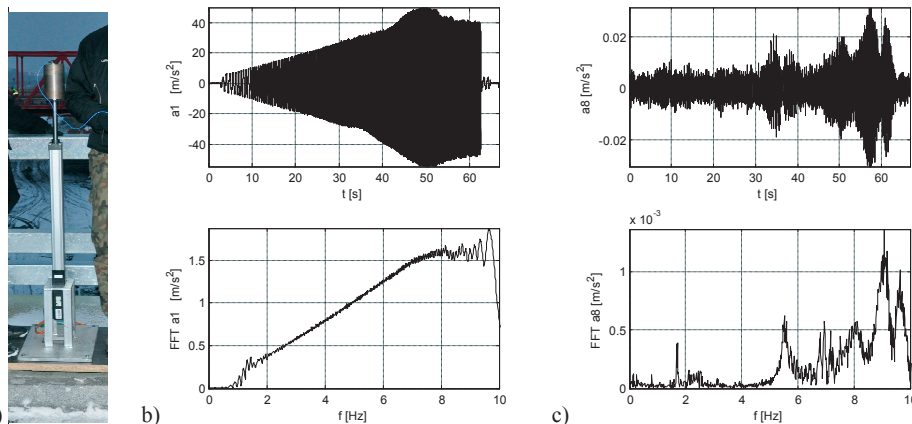
## 6. Badania dynamiczne wzbudnikiem drgań

Do realizacji szerokiego spektrum obciążenia harmonicznego użyto opracowanego w Laboratorium DIM Katedry Mechaniki Budowli i Mostów PG elektrodynamicznego wzbudnika (rys. 14a) sterowanego elektronicznie [7]. Wzbudnik ustawiono w środku rozpiętości przęśla głównego (punkt a1 na rys. 13). Przyspieszenia drgań rejestrowano na wzbudniku oraz w 9 punktach pomiarowych usytuowanych na konstrukcji przęśla (rys. 13). Przyspieszenia rejestrowano wyłącznie w kierunku pionowym.

Wyniki pomiarów drgań wymuszonych wzbudnikiem przedstawia rys. 14. Sygnałem wejściowym była sinusoida o zmiennej częstotliwości od 1 do 10 Hz. Na rys. 14b widoczny jest sygnał zarejestrowany na wzbudniku, tj. w punkcie a1. Rys. 14c pokazuje przykładowy wynik pomierzonych przyspieszeń w dziedzinie czasu i częstotliwości z punktu a8. Z wykresu w dziedzinie częstotliwości (rys. 14c) można zidentyfikować dla tego ustawienia wzbudnika dwie dominujące częstotliwości drgań pionowych przęśla 1,7 Hz oraz 5,5 Hz.



Rys. 13. Rozmieszczenie punktów pomiarowych podczas badań z użyciem wzbudnika elektrodynamicznego



Rys. 14. Pomiar drgań wymuszonych wzbudnikiem: a) wzbudnik elektrodynamiczny oraz przyspieszenia zarejestrowane b) na wzbudniku, punkt pomiarowy a1; c) w punkcie pomiarowym a8

## 7. Podsumowanie

Monitoring techniczny węzłowiec dźwigara łukowego prowadzony w trakcie budowy pozwolił na bieżącą kontrolę ich stanu wyężenia wskazując na bezpieczną realizację tej niewalgcicznej części konstrukcji. Wykonane badania potwierdziły założenia projektowe dotyczące pracy skomplikowanego układu nośnego w postaci łuku złożonego z dwóch przeplatających się rur stalowych. Cykliczne pomiary sił w wieszakach linowych pozwoliły na bieżąco kontrolować efekty ich naciągu i aktualizować projekt podwieszenia pomostu do łuku, ostatecznie prowadząc w sposób bezpieczny do precyzyjnej realizacji. W ramach próbnego obciążenia odbiorowego, poza standardowym podejściem, dodatkowo

zastosowano i przetestowano techniki pomiarowe rzadko jeszcze stosowane w mostownictwie [8].

Konstruktynna współpraca projektanta, wykonawcy, inwestora oraz jednostki naukowej i wynikający z niej zrealizowany program badań nietypowego obiektu jakim jest przeszło łukowe wiaduktu WD-1 pozwoliły na bardzo dobre rozpoznanie zagadnienia, a zdobyte przy jej realizacji doświadczenia ułatwią prace nad nietypowymi obiektami w przyszłości.

### Podziękowania

Autorzy artykułu pragną podziękować mgr inż. Krzysztofowi Topolewiczowi (TOP Projekt), mgr inż. Jackowi Szymańskiemu (Budimex S.A.) oraz inspektorowi nadzoru reprezentującego GIK mgr inż. Adamowi Łosińskiemu (GIK sp. z o.o.) za konstruktywny wkład w przeprowadzone pomiary i analizy numeryczne wiaduktu WD-1.

### Literatura

- 1 Projekt Wykonawczy wiaduktu WD-1. „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego. Zadanie III. Odcinek Al. Gen. J. Hallera –Węzeł Marynarki Polskiej”. TOP PROJEKT i GTI. 2012.
- 2 Sprawozdanie z monitoringu wezglowii dźwigara łukowego wiaduktu WD-1. Wilde Engineering sp. z o.o. 2012.
- 3 Sprawozdanie z pomiaru sił w wieszakach przęsła łukowego wiaduktu drogowego WD-1. Wilde Engineering sp. z o.o. 2012.
- 4 Projekt próbnego obciążenia wiaduktu WD-1. GTI. 2012
- 5 Sprawozdanie z badań podczas próbnego obciążenia wiaduktu WD-1. Politechnika Gdańska. 2012.
- 6 Kozakiewicz A., Wilde K.: Modelowanie testów dynamicznych skokiem z progu wykonanym na moście wantowym w ciągu Trasy Sucharskiego w Gdańsku. XLIX Konf. Naukowa Komitetu ILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB. Krynica 2003.
- 7 Wilde K., Rucka M.: Eksperymentalna analiza modalna konstrukcji stadionu w Zielonej Górze. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 276. Budownictwo i Inżynieria Środowiska z 58 (3/11/II) 2011, str. 421-428.
- 8 Bień J., Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych, WKiŁ, 2010.

## Viaduct over railway next to PGE Arena in Gdansk under tests during its construction

Jacek Chróścielewski<sup>1</sup>, Mikołaj Miśkiewicz<sup>1</sup>, Łukasz Pyrzowski<sup>1</sup>,  
Magdalena Rucka<sup>1</sup>, Krzysztof Wilde<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: jacek.chroscielewski@pg.gda.pl, mikolaj.miskiewicz@pg.gda.pl, lukasz.pyrzowski@pg.gda.pl, magdalena.rucka@pg.gda.pl, krzysztof.wilde@pg.gda.pl*

**Abstract:** The paper presents the in situ tests carried out during the erection of viaduct WD-1 which is a part of Trasa Słowackiego in Gdansk. Due to the unique and innovative form of the arch girder which is created by twisted pipes, the structural monitoring tests were conducted in the DIM Laboratory in the Department of Structural Mechanics and Bridge Structures at Gdansk University of Technology. The scope of tests included arch abutment measurement system, periodic control of forces in hangers during tensioning process and finally load testing.

**Keywords:** SHM, monitoring system, arched viaduct, in situ load test.