

Ocena sił w wieszakach łukowego mostu kolejowego metodą wibracyjną

Estimation of tension force in railway arch bridge hangers using vibration method



Daniel Szynal

Mgr inż.

Politechnika Rzeszowska, Wydział
Budownictwa, Inżynierii Środowiska
i Architektury, Wydziałowe
Laboratorium Badań Konstrukcji

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



Lucjan Janas

Dr inż.

Politechnika Rzeszowska, Wydział
Budownictwa, Inżynierii Środowiska
i Architektury, Wydziałowe
Laboratorium Badań Konstrukcji

l.janas@prz.edu.pl
ORCID 0000-0001-7235-8878

Streszczenie: W artykule przedstawiono procedurę i wyniki badań siły naciągu w wieszakach łukowego mostu kolejowego. Wieszaki zostały zaprojektowane jako prętowe, spawane do blach węzłowych. Z uwagi ukształtowanie analizowanych wieszaków do oceny sił wykorzystano metodę wibracyjną i modele obliczeniowe bazujące na MES, które pozwoliły odwzorować rzeczywiste warunki brzegowe układu. Iteracyjnie dobierano siłę osiową w modelu numerycznym w taki sposób, aby obliczone częstotliwości drgań swobodnych pokrywały się z wartościami pomierzonymi na obiekcie. Analizie poddano pierwszą i drugą częstotliwość drgań wieszaków. Pierwsza częstotliwość była podstawą wyznaczenia sił, druga posłużyła do walidacji modelu obliczeniowego. Wyniki badań wykazały, że w większości przypadków siły w wieszakach analizowanego przęsła są mniejsze od wartości projektowych, w czterech wieszakach stwierdzono przekroczenie wartości o max. 12%.

Słowa kluczowe: Wieszaki mostu; Siły wewnętrzne; Metoda wibracyjna

Abstract: The article presents the procedure and results of tests of tension force in hangers of an arch railway bridge. The hangers are designed as bar welded to gusset plates. Due to the shape of the nodes of the analyzed hangers, the vibration method and FEM-based models were used to assess the forces, which allowed to map the real boundary conditions of the system. Iteratively, the axial force in the numerical model was chosen in such a way that the calculated free vibration frequencies coincide with the values measured on the object. The first and second frequencies of vibrations were analyzed. The first frequency was the basis for determining the forces, the second was used to validate the calculation model. The results of the tests showed that in most cases the forces in the hangers are lower than the design values, in four hangers it was found that the values of the forces were exceeded by max. 12%.

Keywords: Bridge hangers; Tension force; Vibration method

Wstęp

W budownictwie mostowym coraz częściej są stosowane różnego rodzaju systemy podwieszenia. Rozwiązania te cechuje szereg zalet, jak np. optymalne wykorzystanie materiału konstrukcyjnego, możliwość budowy przepraw o dużej rozpiętości czy atrakcyjny wygląd [1], [7]. W ostatnich latach powstało wiele obiektów mostowych o konstrukcji łukowej z jazdą dołem w których pomost połączono z łukami za pomocą wieszaków. Są to w zdecydowanej większości konstrukcje stalowe wykorzystujące systemy typu Langer, Nielsena albo „network arch”. Połączenie wieszaków z pomostem i łukami jest realizowane z wykorzystaniem węzłów sztywnych (spawanych) lub przegubowych. Do zalet węzłów

sztywnych należy zaliczyć prostotę i niski koszt wykonania, do wad dużą wrażliwość na błędy montażowe. Węzły przegubowe ograniczają występowanie sił zginających w obrębie połączenia, przy czym stopień ograniczenia jest trudny do oszacowania. Pożądanym rozwiązaniem są systemy umożliwiające regulację siły naciągu, pozwalające eliminować odstępstwa od wartości sił projektowych [8] ale tego typu rozwiązania zwiększają koszty budowy i często są pomijane.

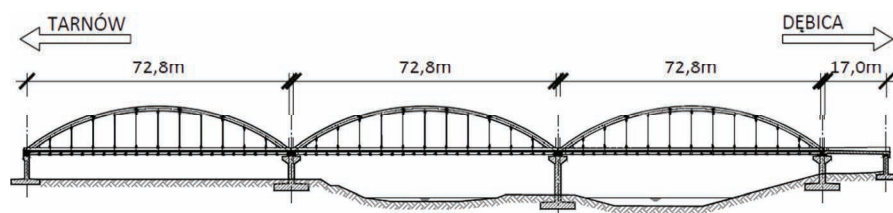
Należy zaznaczyć, że w konstrukcjach łukowych zdarzają się awarie, a nawet katastrofy spowodowane uszkodzeniem wieszaków. Przykładem awarii może być wiadukt w miejscowości Rytro, gdzie doszło do pęknięcia wieszaka m.in. w wyniku oddziaływania wiatru [5], przykładem katastrofy jest

Nanfeng’ago Bridge, gdzie wystąpiło zerwanie wieszaka w kluczu łuku [6].

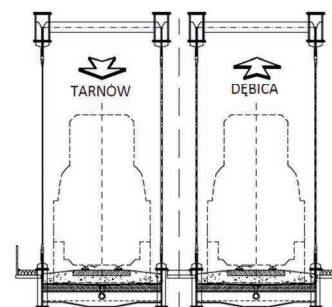
Jednym z podstawowych warunków długotrwałej i bezpiecznej pracy wieszaków jest kontrola rozkładu sił wewnętrznych. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań takiej kontroli przęsła mostu kolejowego, łukowego o rozpiętości 72.8 m. Badania przeprowadzono bezinwazyjną metodą wibracyjną. Wyniki badań porównano z założeniami projektowymi.

Wibracyjne metody oceny sił w wieszakach

Siły w wieszakach użytkowanych mostów można ocenić metodami wibracyjnymi. Podstawą oceny są wyniki pomiarów ich częstotliwości drgań swobodnych i obliczenie sił wewnętrz-



1. Most kolejowy przez rzekę Wisłok w Dębicy – widok z boku



2. Przekrój poprzeczny mostu

nich na podstawie odpowiednich wzorów/zależności. Najprostsza zależność opiera się na teorii struny, w której pomija sztywność elementu [3]. Jeżeli przyjmiemy model elementu z masą równomiernie rozłożoną na długości, to wartość siły można oszacować ze znanego wzoru (1):

$$F = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie: F – oznacza siłę, m – masę 1 metra bieżącego wieszaka/cięgna, L – długość wieszaka/cięgna, f_n – częstość drgań swobodnych dla n -tej formy drgań, n – numer formy drgań.

W przypadku analizy krótkich wieszaków zastosowanie teorii struny i oszacowanie sił wg wzoru (1) może prowadzić znaczących błędów. W takich przypadkach można stosować wzór (2):

$$F = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI\pi^2 n^2}{L^2} \quad (2)$$

gdzie EI oznacza sztywność wieszaka na zginanie, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (1).

W literaturze można znaleźć wiele innych zależności, które pozwalają np. oszacować wartość sił z uwzględnieniem sztywności zamocowania oraz zwis cięgna, np. [3], [4], [10]. Zależności te mają wadę polegającą m.in. na bra-

ku możliwości uwzględnienia rzeczywistej sztywności zamocowań cięgien. Zwykle przyjmuje się zamocowanie sztywne albo przegubowe, które często nie odzwierciedla rzeczywistej pracy konstrukcji. W związku z tym coraz częściej ocenę sił w wieszakach opiera się na modelowaniu i analizie wieszaków metodą elementów skończonych [2], [7], [9].

Opis mostu i badanych wieszaków

Przedmiotowy most jest zlokalizowany w ciągu linii magistralnej E30 na odcinku Kraków – Rzeszów, w m. Dębica. Obiekt składa się z dwóch równoległych, jednakowych 4-przesłowych konstrukcji, przy czym wzdłuż każdego toru są trzy przęsła łukowe i jedno płytowe, swobodnie podparte – rysunek 1. Przęsła łukowe to konstrukcje stalowe, w układzie Langera o rozpiętości teoretycznej 72,8 m. Przęsła płytowe to konstrukcje żelbetowe o rozpiętości 17,0 m. Wszystkie przęsła są zdylatowane względem siebie, co zapewnia niezależność ich pracy.

Łuki zostały wykonane jako spawane, skrzynkowe o przekroju prostokątnym. Pomost składa się z dwóch dźwigarów blachownicowych, stalowych

poprzecznic oraz żelbetowej płyty pomostu na której jest ułożona jest nawierzchnia kolejowa – rysunek 2.

Wieszaki łączące łuki z pomostem zostały wykonane z prętów spawanych do blach węzłowych. Blachy węzłowe są przyspawane: - poprzecznie do osi toru w miejscu połączenia z dźwigarem łukowym oraz - równolegle do osi toru w miejscu połączenia z pomostem. Ogólny widok przęseł łukowych i wieszaków przedstawiono na rysunku 3 i 4.

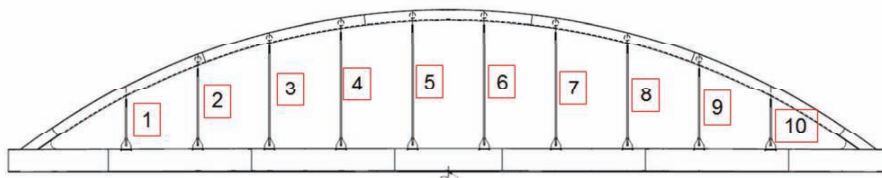
W każdym przęśle znajduje się 20 wieszaków, 10 po każdej stronie konstrukcji – numerację wieszaków przedstawiono na rysunku 5. Wieszaki skrajne nr 1 i 10 mają średnicę 100 mm, wieszaki nr 2 do 8 średnicę 80 mm. Należy zaznaczyć, że w trakcie przeglądu konstrukcji stwierdzono imperfekcje geometryczne, tj. brak prostoliniowości niektórych wieszaków o średnicy 80 mm. W wieszakach o tej średnicy badano siły wewnętrzne. Imperfekcje nie przekraczały 40 mm i były spowodowane prawdopodobnie naprężeniami spawalniczymi.



3. Widok mostu z boku



4. Widok wieszaków i blach węzłowych



5. Schemat rozmieszczenia i numeracja wieżaków

Metodyka badań i zastosowana aparatura

Siły w wieżakach wyznaczono bezinwazyjną metodą wibracyjną. Do głównych zalet tej metody należy zaliczyć względną łatwość wykonania pomiarów, brak konieczności odciążenia konstrukcji, co byłoby wymagane np. przy pomiarach tensometrycznych, możliwość realizacji badań bez konieczności wyłączenia obiektu z eksploatacji oraz brak ingerencji w konstrukcję.

Podstawą oceny sił w wieżakach było wyznaczenie częstotliwości ich drgań swobodnych. Dla każdego wieżaka wykonano pomiary przyspieszeń w dwóch kierunkach przy wymuszeniu drgań również w dwóch kierunkach: równoległe do osi podłużnej mostu (kierunek „x”) i prostopadłe do tej osi (kierunek „y”). Analiza w kierunku „x” i „y” była wskazana ze względu na różną sztywność blach węzłowych w tych kierunkach.

Do pomiarów i analizy drgań użyto systemu pomiarowego 3050-A-060 należącego do typoszeregu PULSE firmy Brüel&Kjær oraz piezoelektryczne, jednoosiowe akcelerometry typu 4507B-006 o małej masie, tj. ok. 50 gram, zakresie częstotliwości pomiarowej od 0.2 Hz do 6 kHz i zakresie przyspieszeń $\pm 140 \text{ m/s}^2$. Akwizycję sygnałów przeprowadzono systemem PULSE stosując częstotliwość próbkowania 4096 Hz. Drgania wzbudzano impulsowo, młotkiem z miękką, elastomerową końcówką – rysunek 6.

Wieżaki w analizowanym moście nie mogą być zakwalifikowane do prętów przegubowo zamocowanych ani obustronnie utwierdzonych. Blachy węzłowe górne są spawane prostopadłe do osi mostu, blachy dolne równoległe, ich sztywność w kierunku „x” różni się od sztywności w kierunku „y”. W związku z tym zastosowano procedurę bazującą na metodzie elementów skończonych, która pozwala uwzględ-

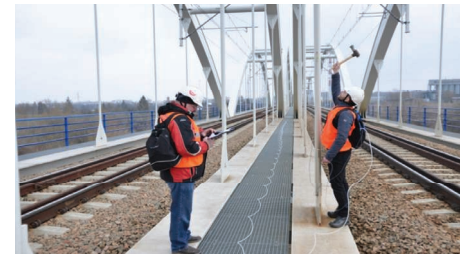
nić rzeczywiste parametry zamocowania. W środowisku SOFiSTiK [11] stworzono modele obliczeniowe klasy (e2, p3) dla każdego z analizowanych wieżaków. Blachy węzłowe zamodelowano jako elementy powierzchniowe odwzorowujące ich dokładną geometrię oraz kierunek zamocowania. Dyskretyzację wykonano z wykorzystaniem prostokątnej siatki MES. Do zamodelowania wieżaków zastosowano belkowe elementy skończone z możliwością wprowadzenia siły naciągu. Zastosowany model umożliwiał uwzględnienie ich sztywności na zginanie. Wizualizację modelu i podstawowe formy drgań przedstawiono na rysunku 7.

Wartości sił w wieżakach wyznaczono na podstawie iteracyjnego doboru siły naciągu w modelu numerycznym w taki sposób, aby obliczone częstotliwości drgań pokrywały się z wartościami pomierzonymi na obiekcie. Dopasowanie obliczonej, pierwszej częstotliwości drgań f_{1MES} do częstotliwości zmierzonej f_1 pozwoliło na ustalenie siły w ciągnie/wieżaku. W celu walidacji modelu analizie poddano także drugą częstotliwość drgań, tj. obliczoną f_{2MES} i zmierzoną f_2 . Przyjęto, że model numeryczny jest dobrany poprawnie jeśli podstawowa, obliczona częstotliwość drgań f_{1MES} różni się od częstotliwości zmierzonej f_1 nie więcej niż o $\Delta_{f1max} = 0.1\%$ a częstotliwość obliczona f_{2MES} różni się od częstotliwości zmierzonej f_2 nie więcej niż o $\Delta_{f2max} = 1.5\%$. Ideę walidacji modelu numerycznego przedstawiono na rysunku 8.

Wyniki badań

Częstotliwości drgań swobodnych wyznaczono na podstawie analizy Fouriera (FFT) zarejestrowanych sygnałów. Przykładową charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową drgań wieżaka przedstawiono na rysunku 9.

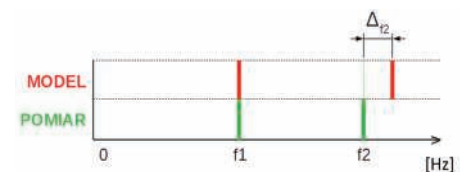
W tabeli 1 zestawiono szczegółowe wyniki pomiarów częstotliwości drgań



6. Pomiary przyspieszeń - impulsowe wymuszenie drgań wieżaka



7. Wizualizacja modelu wieżaka w MES oraz podstawowe formy drgań

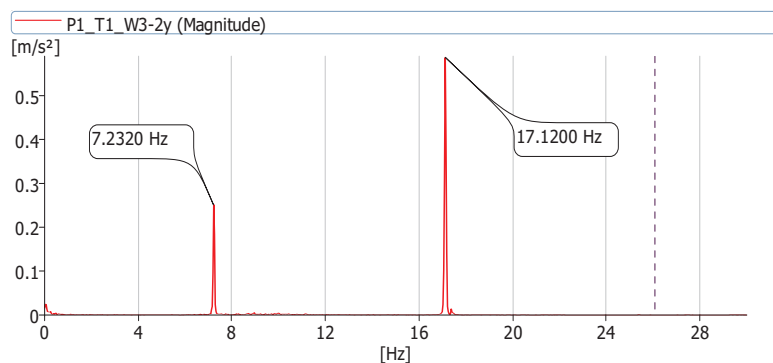


8. Idea walidacji modelu numerycznego

swobodnych wieżaków prześła nr 1 w torze nr 1. Numeracja wieżaków jest zgodna z rysunkiem 5. Indeks „P” oznacza stronę prawą względem osi toru, indeks „L” stronę lewą. W tabeli podano wyniki badań drgań podstawowej, pierwszej częstotliwości drgań swobodnych f_1 oraz drugiej f_2 w kierunku „x” oraz „y”. Można zauważyć niewielkie różnice między częstotliwościami drgań swobodnych w obu kierunkach. W większości przypadków różnice nie przekraczają 0.1 Hz, jedynie w dwóch przypadkach różnica sięga 0.13 Hz.

W trakcie badań monitorowano warunki pogodowe - temperatura powietrza mieściła się w przedziale 9.2 do 12.2 °C, średnia prędkość wiatru wynosiła 3 m/s.

W tabeli 1 zamieszczono również wyniki analizy numerycznej. W modelu MES zadawano siły naciągu w taki sposób aby częstotliwości obliczone f_{1MES} były niemal identyczne jak częstotliwości pomierzone f_1 . Różnice między



9. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa drgań wieszaka nr 3

wartościami zmierzonymi i obliczonymi $\Delta_{f_{1max}}$ nie przekracza 0.04%. Dla tak dobranych modeli porównano drugie częstotliwości drgań obliczonych f_{2MES} z wartościami obliczonymi f_2 . Maksymalne różnice $\Delta_{f_{2max}}$ sięgały 1,31 %. Tak niewielkie rozbieżności pozwoliły potwierdzić poprawność modeli numerycznych.

Zwalidowane modele numeryczne posłużyły do wyznaczenia sił osiowych F_b w wieszakach analizowanego przęsła – wyniki przedstawiono w tabeli 2. Można zauważyć, że wartości sił wyznaczone na podstawie badań w kierunku „x” są bliskie wartościom wyznaczonym w kierunku „y” – różnice nie przekraczają 1.5 %.

W tabeli 2 zamieszczono również siły osiowe F_p przewidziane w projekcie wykonawczym [12]. Wartości wyznaczonych sił w większości wieszaków są

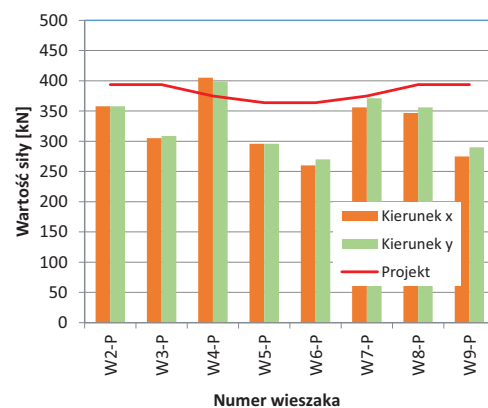
mniejsze od wartości obliczonych. W czterech przypadkach wartości zmierzone są większe od projektowych - o max. 12 %.

Graficzne porównanie wartości sił wyznaczonych i projektowych przedstawiono na rysunku 10 i 11.

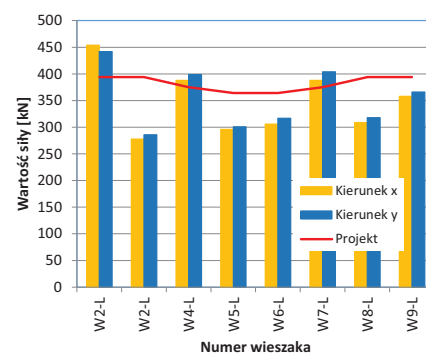
Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdzają przydatność bezinwazyjnej metody wibracyjnej do wyznaczania sił wewnętrznych w wieszakach mostów. Metoda umożliwia przeprowadzenie badań bez konieczności zamykania obiektu, co jest szczególnie istotne w przypadku badań mostów użytkowanych.

W celu odzwierciedlenia rzeczywistej pracy wieszaków wskazane jest



10. Porównanie wartości sił wyznaczonych doświadczalnie z wartościami projektowymi – przęsło 1, tor 1, strona prawa



11. Porównanie wartości sił wyznaczonych doświadczalnie z wartościami projektowymi – przęsło 1, tor 1, strona lewa

opracowanie modeli numerycznych w metodzie elementów skończonych.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że siły występujące w wieszakach analizowanego przęsła są w większości przypadków są mniejsze od założonych przez projektanta. W trzech

Tab. 1. Wyniki pomiarów i obliczeń częstotliwości drgań

Nr wieszaka	f_1 [Hz]		f_{1MES} [Hz]	$\Delta_{f_{1max}}$ [%]	f_2 [Hz]		f_{2MES} [Hz]	$\Delta_{f_{2max}}$ [%]
	x	y			x	y		
W2-P	11,168	11,168	11,166	0,02	27,296	27,182	26,944	1,31
W3-P	7,360	7,392	7,362	0,03	17,376	17,408	17,332	0,44
W4-P	6,688	6,656	6,690	0,03	15,040	15,072	15,021	0,34
W5-P	5,536	5,536	5,537	0,02	12,640	12,704	12,636	0,54
W6-P	5,312	5,376	5,310	0,04	12,320	12,352	12,254	0,80
W7-P	6,400	6,496	6,402	0,03	14,560	14,624	14,529	0,65
W8-P	7,648	7,712	7,651	0,04	17,888	17,792	17,799	0,50
W9-P	10,496	10,624	10,496	0,00	26,176	26,058	25,957	0,84
W2-L	11,884	11,808	11,887	0,03	28,256	28,142	28,035	0,79
W3-L	7,168	7,232	7,170	0,03	17,088	17,120	17,025	0,56
W4-L	6,592	6,656	6,592	0,00	14,880	14,944	14,853	0,61
W5-L	5,536	5,568	5,537	0,02	12,672	12,704	12,636	0,54
W6-L	5,600	5,664	5,598	0,04	12,736	12,864	12,740	0,97
W7-L	6,592	6,688	6,592	0,00	14,880	14,944	14,853	0,61
W8-L	7,392	7,456	7,391	0,01	17,408	17,440	17,377	0,36
W9-L	11,168	11,232	11,166	0,02	27,168	27,114	26,944	0,83

Tab. 2. Wartości sił wyznaczone na podstawie badań (F_b) oraz wartości projektowe (F_p)

Nr wieszaka	F_b [kN]		F_p [kN]	F_b/F_p [%]
	x	y		
W2-P	358	358	394	91
W3-P	305	309	394	78
W4-P	405	399	375	106
W5-P	296	296	364	81
W6-P	260	270	364	74
W7-P	356	371	375	99
W8-P	347	356	394	90
W9-P	275	290	394	74
W2-L	454	442	394	112
W3-L	278	286	394	73
W4-L	388	399	375	106
W5-L	296	301	364	83
W6-L	306	317	364	87
W7-L	388	404	375	108
W8-L	309	318	394	81
W9-L	358	366	394	93

przypadkach (wieszakach) siły wyznaczone na podstawie badań przekraczają wartości projektowane - maksymalnie o 12%. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Biliszczuk J., Arch bridges in Poland. Past, present and future, 8th International Conference on Arch Bridges, Wrocław, Poland, 2016.
- [2] Bleja, M., Żółtowski, K. FEM dynamic analysis of the hangers in a steel arch railway viaduct. Case study (Numeryczna analiza dynamiczna wieszaków w łukowym wiadukcie kolejowym. Analiza przypadku. Builder, 292/2021, 44-49. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4166>
- [3] Caetano E, Cunha A, Dynamic testing of cable structures, MATEC 2MATEC Web of Conferences 24, 01002 (2015), <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20152401002>
- [4] Debora S. Nancy, et al., Assessment of cable tension using vibration based methodologies for wireless structural health monitoring, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, Vol. 8, Issue 2, 2018, 575-582.
- [5] Flaga A., Kocoń A., „Środki przeciwdziałające zniszczeniom wieszaków mostu spowodowanym wiatrem”, Inżynieria i budownictwo, 10, 2018, 519-521.
- [6] Hawryszków P., „Katastrofa mostu Nanfang'ao Bridge na Tajwanie”, Mosty, 6, 2019, 56-58.
- [7] Korus K., Salamak M, Jasiński M, Optimization of geometric parameters of arch bridges using visual programming FEM components and genetic algorithm, Engineering Structures, Vol. 241/2021, 112465, [https://doi.org/10.1016/j-engstruct.2021.112465](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112465)
- [8] Markocki B., Stana M., Oleszek R., „Problemy projektowe i wykonawcze nietypowych konstrukcji łukowych na przykładzie wiaduktu WN-01A w ciągu drogi ekspresowej w węźle Woźniki” Mosty 4/2011: 30-35.
- [9] Ribeiro D., Caçada R., Delgado R., Zabel V., “Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters”, Engineering Structures 40, 2112, 413-435.
- [10] Topolewicz M., Topolewicz K., Rucka M., Wilde K., „Wibracyjna metoda wyznaczania sił w wieszakach na przykładzie wiaduktu łukowego w Gdańsku”, Współczesne Technologie Budowy Mostów, Wrocławskie Dni Mostowe 2014, 439-446.
- [11] SOFISTiK Manual, www.sofistik.com.
- [12] Projekt wykonawczy obiektu, FE-

REKLAMA



RAILPROFILE 2D

LASEROWY POMIAR PROFILU KAŻEGO RODZAJU SZYN ORAZ ROZJAZDÓW

Urządzenie obsługiwane jest przez aplikację na telefonie z systemem Android™.

Railprofile 2D mierzy pełny profil główki szyny oraz wylicza parametry dotyczące obszaru szlifowania. Dostępna jest również funkcja związana z pomiarem rozjazdu lub jego elementów. Urządzenie prezentuje wynik pomiaru bezpośrednio na ekranie aplikacji.

Więcej informacji na www.graw.com

www.goldschmidt.com

