

Pomiary ugięcia przęseł mostowych obciążonych dynamicznie

Maciej Jamka, Przemysław Kuras, Michał Strach

Mosty kolejowe to jedne z wielu obiektów inżynierskich, dla których prowadzone są cykliczne pomiary inwentaryzacyjne. Prace pomiarowe związane są z określeniem przemieszczeń i odkształceń konstrukcji. Wśród różnych specjalistycznych badań obiektów o wydłużonym kształcie, są pomiary ruchów szybkozmiennych wywołanych między innymi eksploatacją tych obiektów. W zakresie badania kinematyki obiektu konieczne jest także uzyskanie obrazu zjawiska dla całego obiektu. Klasyczne techniki geodezyjne nie są w stanie zapewnić odpowiedniej częstotliwości rejestracji danych w celu określenia drgań poszczególnych elementów konstrukcji. W artykule zaprezentowane zostały nowoczesne technologie pomiarowe, bazujące na precyzyjnych, wysokoczęstotliwościowych urządzeniach służących do pomiaru m. in. ugięć przęseł mostowych. Jednym z opisywanych urządzeń jest naziemny radar interferometryczny. Jest to innowacyjny instrument pomiarowy, działający w oparciu o technikę skokowej modulacji częstotliwości fali oraz interferometrii mikrofalowej. Możliwości wspomnianego urządzenia zweryfikowano w oparciu o wyniki pomiarów mostu kolejowego. Badania przeprowadzono przy użyciu specjalistycznych czujników, wykorzystywanych w pomiarach szybkozmiennych przemieszczeń pionowych konstrukcji mostowych.

Badania zostały wykonane w ramach grantu MNiSW nr N N526 158838



mgr inż. Maciej Jamka
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii
Lądowej
Instytut Inżynierii Drogo-
wej i Kolejowej
Katedra Infrastruktury
Transportu Szynowego
i Lotniczego



mgr inż. Przemysław Kuras
Akademia Górniczo-Hut-
nicza imieniem Stanisława
Staszica w Krakowie
Wydział Geodezji Górniczej
i Inżynierii Środowiska
Katedra Geodezji Inżynie-
ryjnej i Budownictwa



dr inż. Michał Strach
Akademia Górniczo-Hut-
nicza imieniem Stanisława
Staszica w Krakowie Wydział
Geodezji Górniczej i Inży-
nierii Środowiska Katedra
Geodezji Inżynierskiej i
Budownictwa

Pomiar przemieszczeń obiektów budowlanych jest jednym z głównych zadań wynikających z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa ich konstrukcji. W zależności od charakteru obciążenia zasady prowadzenia

obserwacji są różne. Podczas badania wpływu obciążeń statycznych szczególnie istotna jest dokładność pomiaru przemieszczeń. W monitoringu dynamicznym kluczowe znaczenie ma częstotliwość wykonywania pomiarów.

Istnieje wiele technik pomiarowych, które są stosowane do wyznaczania ugięć pod wpływem obciążeń statycznych. Pomiary prowadzi się m.in. przy użyciu klasycznych i satelitarnych technik geodezyjnych [14], inklinometrów [6], czy też czujników światłowodowych [1]. Badanie dynamiki budowli jest zadaniem trudniejszym, głównie ze względu na konieczność opisanie zjawisk szybkozmiennych. Wiele technik pozwala na prowadzenie obserwacji z wysoką częstotliwością. Stosowane są m.in. geodezyjne odbiorniki GPS i akcelerometry [7], a także tensometry i czujniki laserowe [8]. Jednocześnie rozwój nowoczesnych technologii przyczynia się do powstawania kolejnych systemów pomiarowych.

Głównymi celami prowadzenia pomiarów dynamicznych odkształceń obiektów mostowych są [2]:

- analiza dynamiczna, oparta na zbliżonej do rzeczywistości odpowiedzi konstrukcji na obciążenie dynamiczne, pozwalająca na weryfikację teoretycznych obliczeń, a w konsekwencji – na ulepszenie metod projektowania,
- określenie rzeczywistego zachowania konstrukcji pod wpływem wymuszenia, mające na celu wyznaczenie cech wytrzymałościowych i odkształceniowych obiektu, a także zmienności tych cech wskutek czasu eksploatacji, np. [12],
- analiza bezpieczeństwa starych konstrukcji, przenoszących nowe rodzaje obciążeń.

Najważniejszymi parametrami dotyczącymi konstrukcji, które powinny podlegać pomiarom, są [2]:

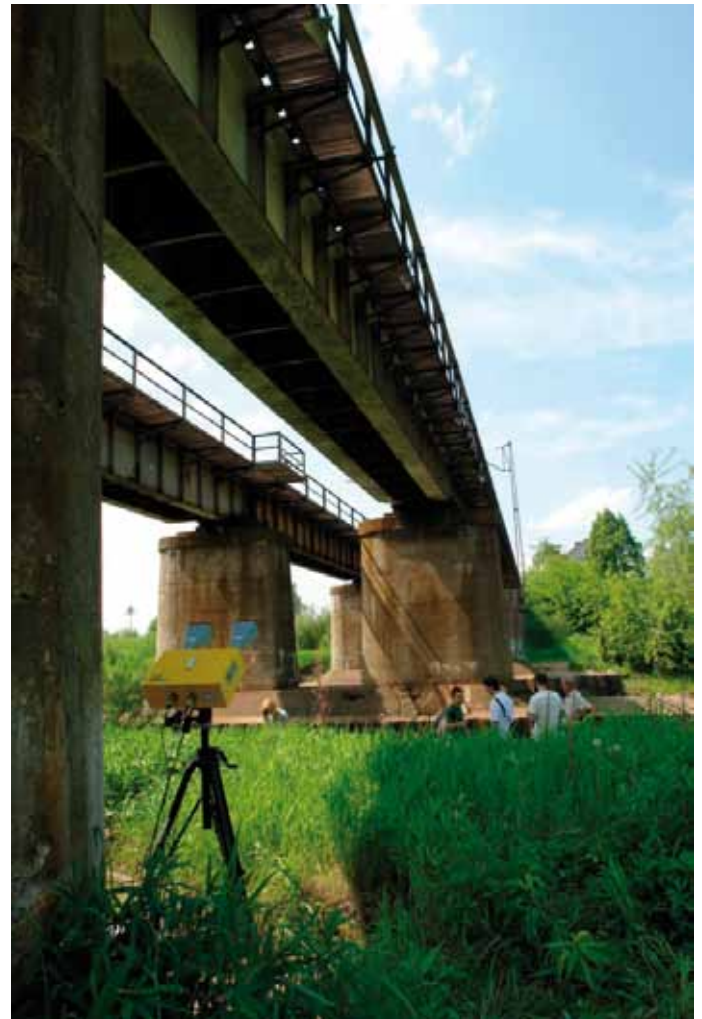
- składowe przemieszczeń,
- amplitudy i częstotliwości poszczególnych składowych,
- wartość tłumienia poszczególnych składowych,
- propagacja impulsów dynamicznych.

Polska Norma [10] podaje dokładność pomiaru przemieszczeń do 0,1 mm podczas prowadzenia obciążeń statycznych. Określony jest także interwał czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami, wynoszący 15 min. Nie została jednak zdefiniowana dokładność ani częstotliwość pomiaru przemieszczeń powstających podczas obciążeń dynamicznych.

Na konieczność prowadzenia badań częstotliwości drgań wskazuje zapis z Polskiej Normy [11]: „Różnica częstotliwości drgań wzbudzonych i drgań własnych konstrukcji narażonych na oddziaływanie typu harmonicznego powinna wynosić co najmniej 25% częstotliwości drgań własnych”.

Obliczenia dynamiczne, bazujące na założeniach upraszczających, powinny być zweryfikowane doświadczalnie na rzeczywistych obiektach mostowych. Wynika to z faktu, iż odkształcenia konstrukcji mostowych podczas obciążeń dynamicznych zależą od wielu parametrów, które nie zawsze są uwzględniane w analizach teoretycznych [2]. Norma [10] dopuszcza alternatywne metody prowadzenia badań, jeżeli są uzasadnione naukowo i prowadzone przez ośrodki naukowo-badawcze.

Metoda pomiaru przemieszczeń musi uwzględniać bezpieczeństwo użytkownika obiektów w aspekcie nośności i stateczności. Monitoring prowadzony jest w punktach



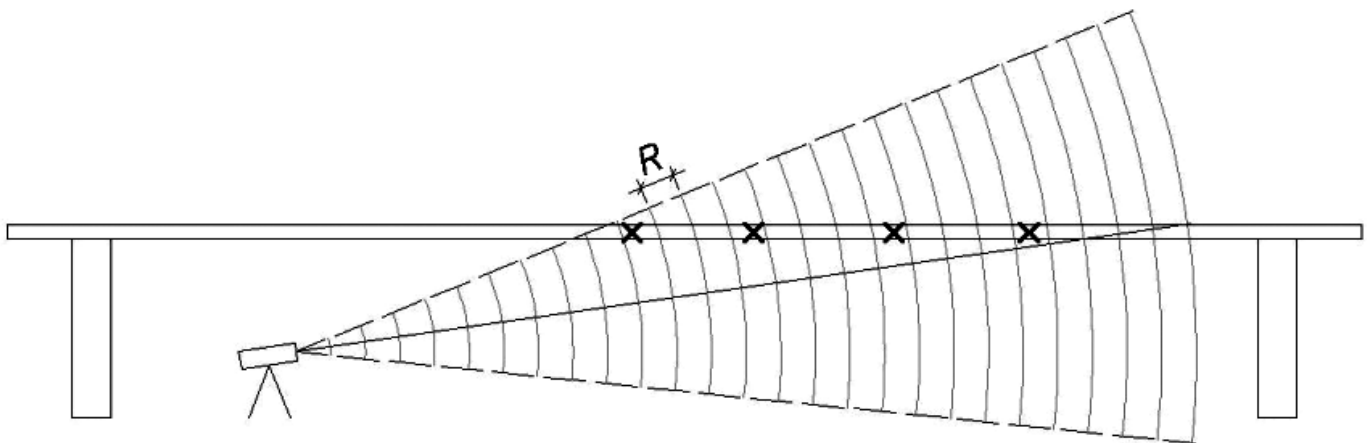
1. System IBIS-S w trakcie pracy

kontrolnych, wskazanych przez projektanta. Podczas projektowania kryterium zniszczenia zazwyczaj wyrażane jest poprzez naprężenia, rzadziej odkształcenia, a prawie nigdy przemieszczenia [5]. Znając odpowiednie warunki fizyczne, można łatwo przekształcić kryterium naprężeniowe w przemieszczeniowe. Pomiar przemieszczeń pozwala w sposób uniwersalny monitorować kryte-

rium bezpieczeństwa konstrukcji. W artykule zostaną zaprezentowane dwie metody pomiaru przemieszczeń, wykorzystujące: naziemną interferometrię radarową oraz inkrementalny enkoder optyczny.

Instytut Techniki Budowlanej w wydawanych instrukcjach (443/2009) podaje, że najważniejsze wymagania, jakie powinna spełniać metoda pomiarowa, to:

- możliwość pracy w terenie,
- wykonywanie odczytów z dostatecznie wysoką częstotliwością, zwykle co najmniej 20 Hz [9],
- niezależność od zmian warunków atmosferycznych,
- zapewnienie wysokiej dokładności przy dużym zasięgu pomiaru.



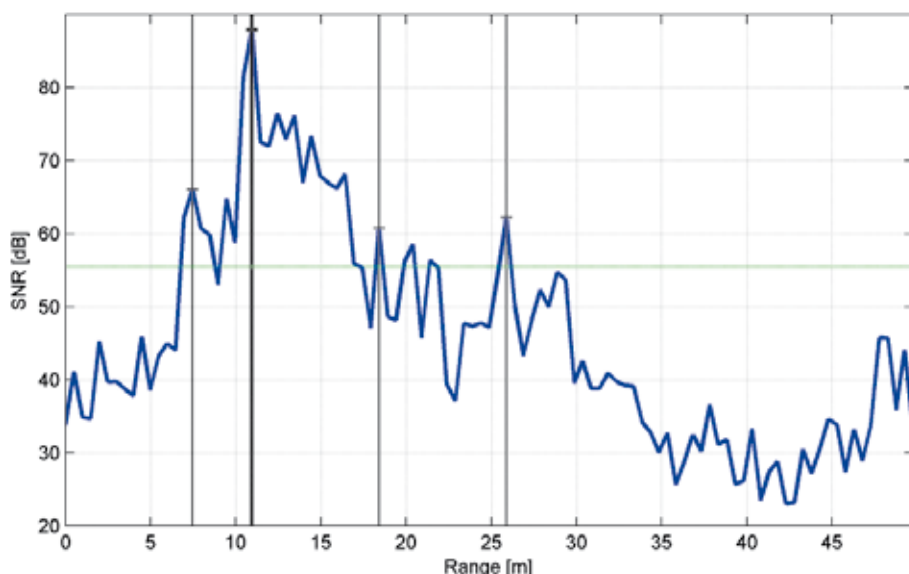
2. Wpływ rozdzielczości systemu na możliwość obserwacji

Podczas użytkowania obiekty budowlane są poddawane drganiom, powodowanym przez różne siły wymuszające. Najczęstszymi czynnikami zewnętrznymi wywołującymi wibracje są: transport kołowy i szynowy, wiatr, wstrząsy sejsmiczne i parasejsmiczne. Obiektami szczególnie narażonymi na wymuszenia dynamiczne są mosty. Pomiar drgań, które mogą być istotne z punktu widzenia jakości użytkowania i bezpieczeństwa konstrukcji, są powszechnie prowadzone podczas analiz wpływu otoczenia (samochody, tramwaje, metro) na budowle [13].

Radar interferometryczny IBIS-S

Naziemny radar interferometryczny IBIS (Image by Interferometric Survey) jest radarem aktywnym, który generuje mikrofałę z zakresu Ku. Rejestrując amplitudę i fazę fali odbitej pozwala na pomiar przemieszczeń. Wersja IBIS-S (rys.1) służy do pomiaru przemieszczeń budowli o kształcie podłużnym [4].

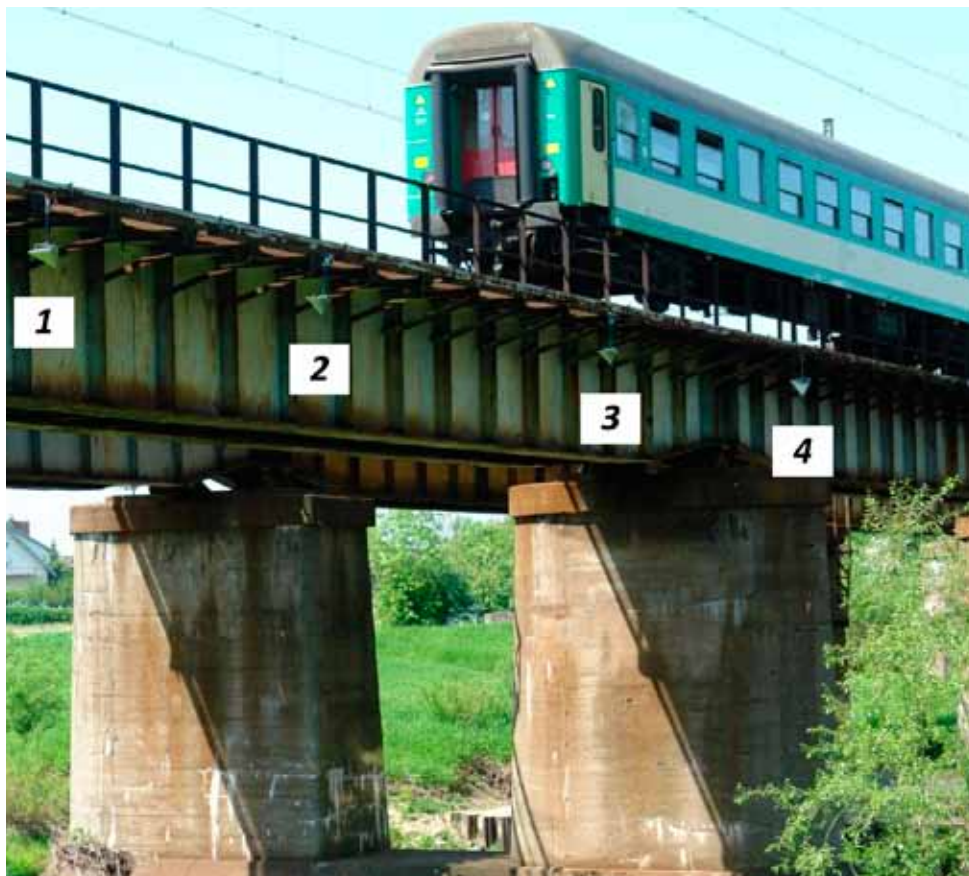
Radar posiada dwa tryby pracy – statyczny i dynamiczny, różniące się dokładnością pomiaru przemieszczeń, które wynoszą odpowiednio 0,01 i 0,1 mm [9]. W trybie dynamicznym maksymalna osiągalna częstotliwość pomiaru wynosi 200 Hz [4]. Zasięg pomiaru osiąga 1000 m [3], jednak ta wartość zależy od natężenia fali odbitej od obserwowanego obiektu.



3. Zaobserwowany profil radarowy

System pozwala na monitoring wielu punktów jednocześnie. Ich liczba wynika z rozdzielczości radaru. Maksymalna rozdzielczość prezentowanego systemu wynosi $R = 0,5$ m (rys.2). To oznacza, że w przedziale o szerokości 0,5 m może być obserwowany jeden punkt obiektu. Dzięki temu monitoring obiektu może być prowadzony niemal w pełnym wymiarze. Osiągnięcie wysokiej rozdzielczości jest możliwe dzięki zastosowaniu specjalnej techniki skokowej modulacji częstotliwości fali ciągłej.

Wskazanie konkretnych punktów obiektu, podlegającym obserwacji, nie jest możliwe tak jak w przypadku np. metod geodezyjnych. Obserwacji podlegają te elementy konstrukcji, które silnie rozpraszają padające na nie fale. Natężenie echa, wyrażone stosunkiem sygnału do szumu (SNR – signal to noise) w decybelach jest przedstawione na profilu radarowym (rys.3) w zależności od odległości między instrumentem a obserwowanym punktem.



4. Reflektory mikrofalowe zamontowane na obiekcie



5. Przyrząd MPL-01: **a** – podczas pomiaru ugięć mostu, **b** – widok ogólny z mocowaniem na statywie

W przypadku, gdy jednoznaczna identyfikacja obserwowanych punktów jest trudna ze względu na silne odbicia zakłócające, na konstrukcji można umieścić reflektory odbijające wiązkę mikrofal (rys.4).

Wyraźnie maksima widoczne na profilu radarowym (rys.3) wynikają z zamontowania reflektorów na obiekcie. Ich montaż nie jest konieczny do przeprowadzenia pomiaru, jednak pomaga zidentyfikować punkty obserwowane.

Przyrząd MPL-01

Przyrząd MPL-01 został zaprojektowany i zbudowany z wykorzystaniem inkrementalnego enkodera optycznego i służy do pomiaru przemieszczeń liniowych w szczególności przemieszczeń szybkozmiennych (rys.5).

Zastosowany w przyrządzie enkoder składa się z dwóch podstawowych elementów:

- precyzyjnego pierścienia pomiarowego o średnicy zewnętrznej $\varnothing = 52\text{mm}$ z naniesioną na zewnętrznej powierzchni pierścienia strukturą prążków o szerokości $20\mu\text{m}$.
- głowicy odczytowej przeznaczonej do rejestracji położenia prążków z pierścienia pomiarowego identyfikującej prążki w dwóch kanałach cyfrowych A i B przesuniętych fazowo o 90° .

Przemieszczenie liniowe realizowane za pośrednictwem struny stalowej zaczepionej do badanego elementu konstrukcji oraz przewiniętej przez wałek przyrządu jest zamieniane

na ruch obrotowy pierścienia pomiarowego. Sygnały z głowicy odczytowej rejestrowane są przez mikroprocesor i przeliczane na rzeczywistą długość przemieszczenia.

Inkrementalność enkodera pozwala rejestrować dodatnie i ujemne przyrosty przemieszczenia liniowego. Rozdzielczość układu pomiarowego wynosi $5\mu\text{m}$, przy częstotliwości rejestrowanych sygnałów na poziomie 1000 Hz .

Sygnały z głowicy rejestrowane są przez mikroprocesor na zasadzie przerwań gwarantując niezakłóconą ciągłość pomiaru.

Oprogramowanie mikroprocesora przetwarza dane pomiarowe na wyniki odczytowane według ustalonej procedury, rejestrując je w pamięci EPROM sterownika. Użytkownik zarządza pracą urządzenia za pomocą klawiszy, odczytując informacje na wyświetlaczu sterownika. Zgromadzone dane po zakończeniu pomiaru można przekazać drogą radiową za pomocą łącza Bluetooth do komputera PC celem dalszego przetwarzania. Sterownik miernika jest wyposażony we własny baterijny system zasilania pozwalający na ciągłą pracę urządzenia przez 8 godzin.

Charakterystyka badań terenowych i testowanego obiektu

Badania przeprowadzono w maju 2011 r. mierząc ugięcia od obciążeń dynamicznych IV przęsła toru nr 2 mostu kolejowego na rzece Raba (rys.1). Most o długości całkowitej $132,56\text{ m}$ zlokalizowany jest w km $34,726$

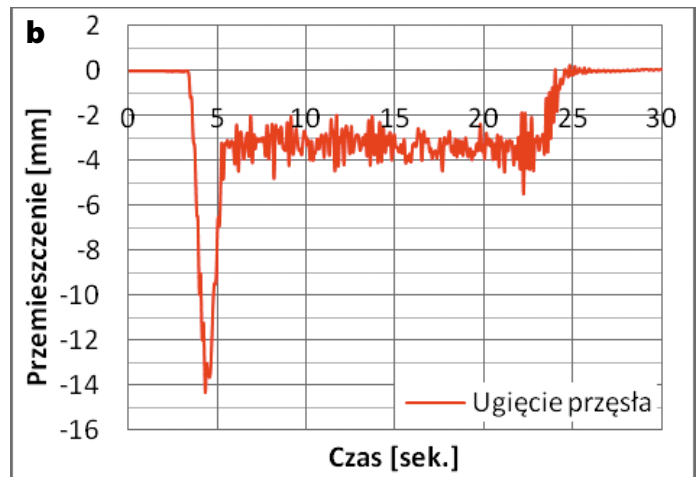
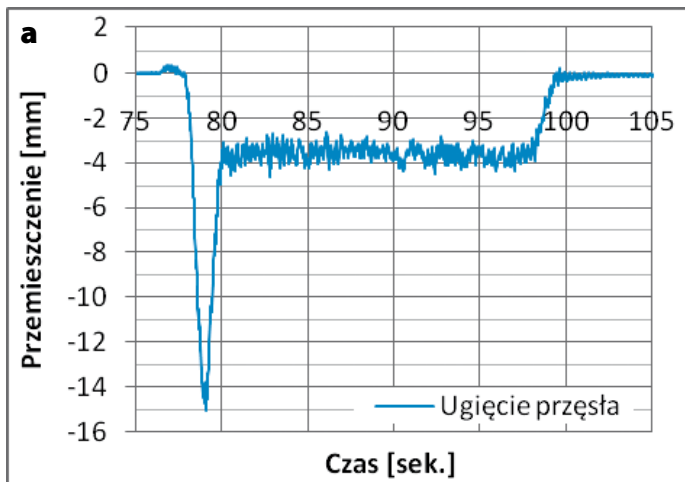
linii kolejowej nr 91 Kraków-Medyka. Obiekt ten posiada 5 przęseł w każdym torze o długości konstrukcyjnej każdego z nich $25,40\text{ m}$. Przęsła z jazdą górą zostały wykonane z blachownicy spawano-nitowanej o wysokości $2,47\text{ m}$. Na obiekcie ułożone są tory o nawierzchni S60 z przytwierdzeniem sprężystym na mostownicach typu II i długości $2,50\text{ m}$.

Dla wybranego obiektu zostały przeprowadzone badania ugięć dynamicznych. Reflektory mikrofalowe o numerach 1, 2, 3 zostały zamontowane odpowiednio w $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ długości mierzonego przęsła. Dodatkowo reflektor nr 4 został umieszczony na końcu przęsła nad podporą mostu (rys.4). W połowie długości badanego przęsła, oprócz reflektora mikrofalowego nr 2, zamocowano na wsporniku stalową strunę. Jej drugi koniec został założony na urządzeniu MPL-01 (rys.5b).

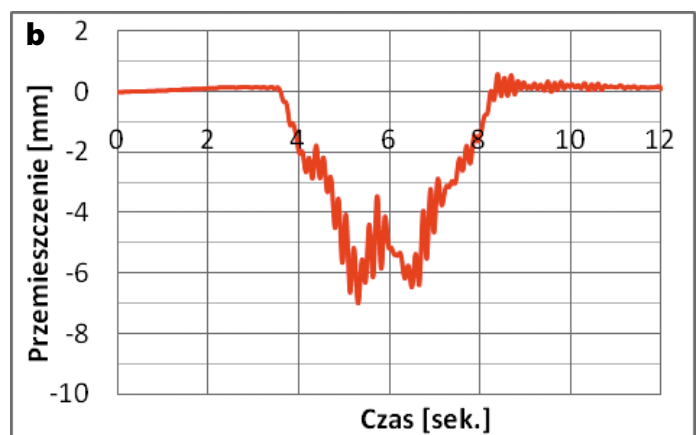
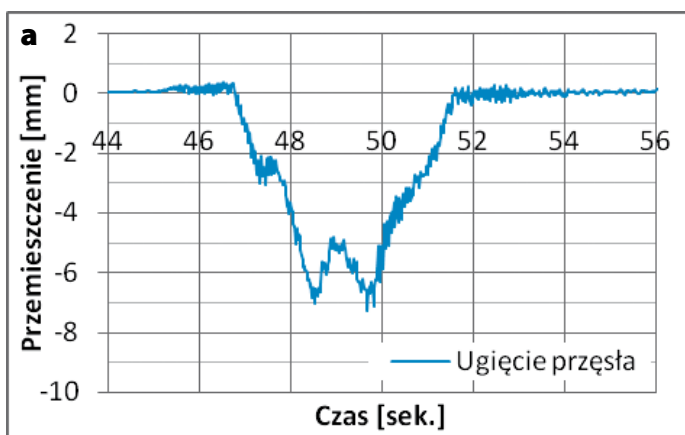
Pomiary ugięć prowadzono równocześnie dwoma przyrządami: zestawem IBIS-S, ustawionym przy podporze badanego przęsła oraz urządzeniem MPL-01, ustawionym pod badanym przekrojem.

Analiza wyników

Interferometr radarowy IBIS-S umożliwia jednoczesny pomiar i późniejszą analizę ugięć (przemieszczeń) badanego przęsła w wielu jego punktach. Szczególnie przydatne stają się reflektory mikrofalowe montowane w wybranych przekrojach analizowanego obiektu. W opisywanym przypadku



6. Wykres przebiegu ugięć przęsła mostu podczas przejazdu pociągu towarowego. Pomiar zarejestrowany urządzeniem: **a** – IBIS-S, **b** –MPL-01



7. Wykres przebiegu ugięć przęsła mostu podczas przejazdu pociągu osobowego. Pomiar zarejestrowany urządzeniem: **a** – IBIS-S, **b** –MPL-01

należało się jednak ograniczyć do jednego z przekrojów na przęsle. Miało to związek z przyrządem MPL-01, wykorzystanym w badaniach. Urządzenie może rejestrować przemieszczenia liniowe obiektu w punkcie zaczepienia stalowej linki. Zdecydowano więc, że pomiar i analiza porównawcza możliwości obu systemów będzie dotyczyła przekroju zlokalizowanego w połowie długości przęsła, w miejscu montażu reflektora mikrofalowego z numerem 2.

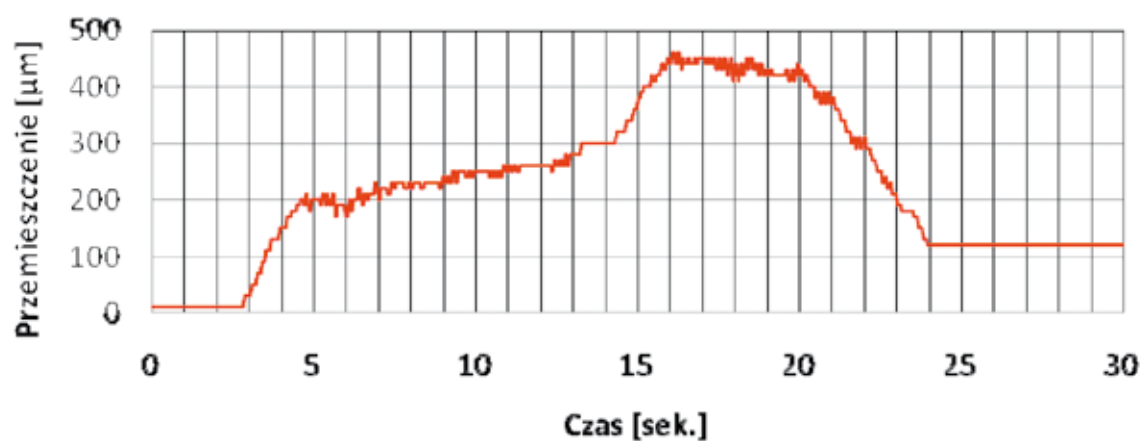
W trakcie testów terenowych zarejestrowane zostały ugięcia badanego przęsła podczas przejazdu różnych pojazdów, zarówno po analizowanym torze, jak i torze sąsiednim. Wśród nich znalazły się: wózek motorowy, pociągi towarowe oraz pociągi osobowe złożone zarówno z elektrycznych zespołów trakcyjnych jak i wagonów osobowych. Ze względu na ograniczenia w rozmiarze, artykuł prezentuje wyniki z przejazdu wybranych pociągów. Na rysunku nr 6 zostały zestawione wykresy obrazujące charakterystykę ugięć środka przęsła zarejestrowanych oboma technikami pomiarowymi. Wyniki przedstawiają zachowanie się konstrukcji podczas przejazdu pociągu towarowego.

Składał się on z tego samego rodzaju wagonów i przewoził jednorodny rodzaj ładunku. Charakterystyczne jest tutaj maksymalne ugięcie przęsła podczas przejazdu ciężkiej lokomotywy elektrycznej serii 182 ČD o masie służbowej 120 ton, ciągnącej wagony – cysterny. Urządzenia zarejestrowały ugięcie przęsła dochodzące do wartości -15,0mm (IBIS-S) oraz -14,4mm (MPL-01). Daje to różnicę we wskazaniach przyrządów o wartości 0,6mm. Obciążenie przęsła wagonami wpłynęło na jego ugięcie w granicach -2,6mm ÷ -4,6mm (IBIS-S) oraz -1,9 ÷ -5,4 (MPL-01). Przejście z zarejestrowanego urządzenia MPL-01 lokalnego maksimum (22,129 sek.) do minimum (22,229 sek.) nastąpiło w ciągu 0,1 sekundy.

Kolejny zestaw wykresów przedstawia ugięcie badanego przęsła podczas przejazdu elektrycznego zespołu trakcyjnego serii EN57. Pojazd ten ma konstrukcję trójczłonową, złożoną z dwóch wagonów rozrządowych (sterowniczych) i jednego silnikowego, który jest umieszczony w środku zespołu. Masa służbowego tego pojazdu wynosi 123 tony przy długości 64,97m. Kształt wykresów przybliża zróżnicowanie wagi każde-

go w wagonów. IBIS-S zarejestrował dwie wartości minimalne na poziomie -6,8mm oraz -7,3mm z lokalnym maksimum między nimi o wartości -4,7mm (rys.7a). W przypadku MPL-01 uzyskano wartości minimum: -6,8mm oraz -6,3mm z maksymalną wartością między nimi -3,5mm (rys.7b).

Do czynników wpływających na jakość wyników oraz ich charakterystykę można zaliczyć oddziaływania dynamiczne, powstające od przejeżdżających pojazdów po sąsiednim torze. Konstrukcja mostu posiada wspólne podpory w gruncie (rys.1). Takie rozwiązanie sprawia, że dynamiczne obciążenie toru nr 1 wpływa na sprężyste skrócenie budowli. W trakcie testów terenowych zarejestrowano przejazd pociągu osobowego po sąsiednim torze. Był to pociąg pośpieszny, złożony z wagonów osobowych (rys.7b). Jego przejazd wpłynął na podniesienie przęsła w badanym przekroju w stosunku do urządzenia MPL-01 o maksymalną wartość równą 0,45mm (rys.7a).



a



b

8. Wykres przemieszczeń spowodowanych sprężystym skróceniem wspólnej podpory w gruncie (a) w czasie przejazdu pociągu towarowego po sąsiednim torze (b)

Wnioski

Urządzenia wykorzystane w badaniach doświadczalnych różnią się między sobą w wielu aspektach. Wśród różnic można wymienić: technologię pomiarów, zasięg i częstotliwość pracy, algorytmy i dokładność uzyskanych wyników, wymóg dostępu i umiejscowienia w stosunku do badanego obiektu, liczbę obserwowanych punktów reprezentujących obiekt, uniwersalność w zastosowaniu, cenę. Pomimo tak skrajnych różnic wyznaczone wartości przemieszczeń pionowych przęsła mostu nie różnią się istotnie między sobą. Wyniki otrzymane z obu urządzeń są bardzo zbliżone. Analiza wyników dla testowanych technologii pomiarowych ukazuje, że różnice w maksymalnych wartościach ugięć przęsła mostu nie przekraczają 1mm. Świadczą o tym również wykresy ugięć, przyjmujące niemal identyczny kształt. W podsumowaniu można stwierdzić, że oba urządzenia wykorzystane w testach terenowych wykazały pełną przydatność w zakresie badania wpływu obciążeń dynamicznych na konstrukcję mostu. ◀

Materiały źródłowe:

- [1] Ansari F., Practical Implementation of Optical Fiber Sensors in Civil Structural Health Monitoring, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, No. 8, 2007
- [2] Czudek H., Radomski W., *Podstawy mostownictwa*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1974
- [3] Gentile C., Application of Radar Technology to Deflection Measurement and Dynamic Testing of Bridges, *Radar Technology*, InTech, 2010
- [4] Gentile C., Bernardini G., Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements, *NDT&E International*, Vol. 41(7), 2008
- [5] Instytut Techniki Budowlanej, *Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych*, Instrukcje, Wytuczne, Poradniki, 443/2009, Warszawa, 2009
- [6] Kopáček A., Kyrinovič P., Lipták I., Erdélyi J., *Automated Monitoring of the Danube Bridge Apollo in Bratislava*, FIG Working Week, Marrakech, 2011
- [7] Meng X., Dodson A.H., Roberts G.W., Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers, *Engineering Structures*, Vol. 29(11), 2007
- [8] Paultre P., Proulx J., Talbot M., Dynamic Testing Procedures for Highway Bridges Using Traffic Loads, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 2, 1995
- [9] Pieraccini M., Fratini M., Parrini F., Macaluso G., Atzeni C., High-speed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures, *Electronics Letters*, Vol. 40(14), 2004
- [10] Polska Norma PN-89/S-10050. *Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Wymagania i badania*, Polski Komitet Normalizacji, Miary i Jakości
- [11] Polska Norma PN-90/B-03200. *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*, Polski Komitet Normalizacji, Miary i Jakości
- [12] Salawu O.S., Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 9, 1997
- [13] Stypuła K., *Drgania wywołane eksploatacją miejskiego transportu szynowego – badania i zapobieganie*, *Transport Miejski i Regionalny*, nr 10/2006
- [14] US Army Corps of Engineers, *Engineering and Design. Structural Deformation Surveying*, Engineer Manual, EM 1110-2-1009, 2002