

Artykuł recenzowany: Wykorzystanie techniki satelitarnej GPS do badania konstrukcji mostowych

SYSTEM AUTORSKI WAT

Interpretacja wyników pomiarów GPS ugięć i przemieszczeń mostu w Zakroczymiu pokazała zasadność stosowania opracowanej na WAT metodyki badania drgań konstrukcji budowlanych poddanych obciążeniom dynamicznym. Zarówno odbiorniki 20, jak i 10 Hz pozwalają uzyskać podobne wyniki, zgodne z teoretycznymi wartościami ugięcia przęsła mostu.

MARIUSZ FIGURSKI
RYSZARD CHMIELEWSKI
KRZYSZTOF KROSCZYŃSKI
PAWEŁ KAMIŃSKI
MARCIN GAŁUSZKIEWICZ
MACIEJ WRONA

Analiza wyników pomiarów odkształceń konstrukcji mostowych została wykonana na podstawie metod pomiarowo-obliczeniowych GPS i mechaniki konstrukcji. Ma ona cha-

rakter interdyscyplinarny. W artykule skupiono uwagę przede wszystkim na zagadnieniach związanych z pomiarami GPS.

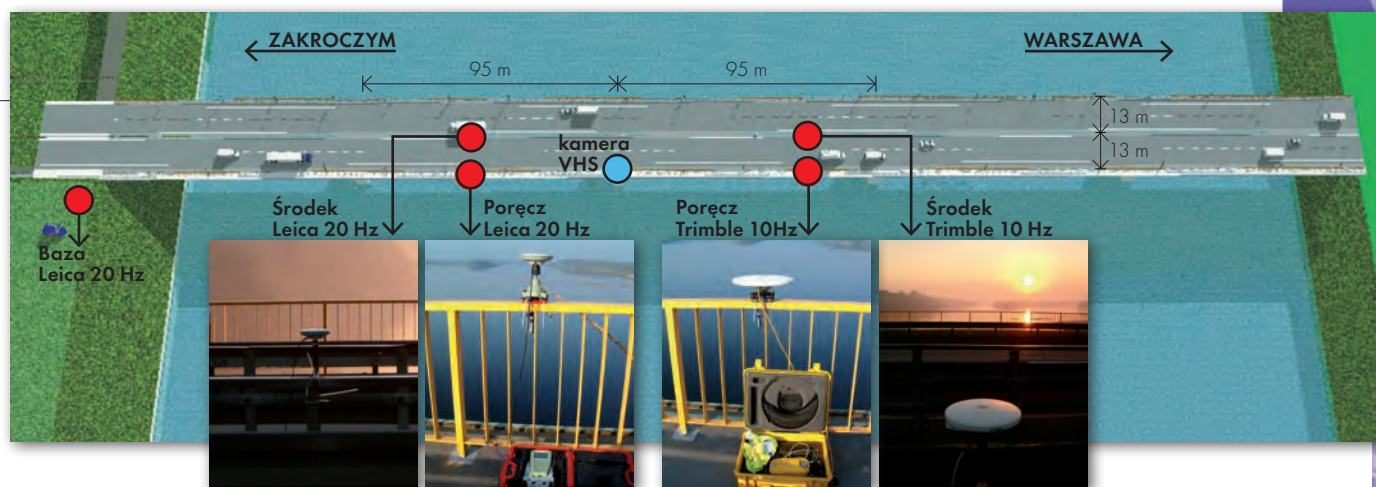
Analizując literaturę przedmiotu, zauważyć można brak metodyki prowadzenia tego typu badań. Z tego względu na wstępie przeprowadzono studium ich wykonalności z wykorzystaniem dostępnego sprzętu i oprogramowania. Po pierwsze, zbadano możliwość zastosowania systemów komercyjnych. Okazało się, że poza produktem GeoMos firmy

Leica rynek sprzętu i oprogramowania również nie dostarcza odpowiednich rozwiązań (Karsznia, 2007). System GeoMos – ze względu na brak dostępu do algorytmów przetwarzania danych GPS – nie spełnił naszych oczekiwań. Znajomość tych algorytmów umożliwiłaby na przykład odpowiednią analizę dokładności wyników. Z powyższych powodów zdecydowano się na konstrukcję własnego systemu opartego na odbiornikach GPS spełniających podstawowe wymagania pomiarów wybranych konstrukcji mostowych i programach pozwalających na opracowanie danych pomiarowych.

Biorąc pod uwagę typowe wartości drgań występujące w konstrukcjach mostowych, ustalono, że minimalna częstotliwość próbkowania pomiarów powinna być nie mniejsza niż 10 Hz (Madaj i Wołowicki, 2007). Wykorzystano w tym przypadku podobieństwo do przekształcenia sygnału z postaci analogowej na cyfrową, które wskazuje, że częstotliwość próbkowania sygnału musi być nie mniejsza niż podwojona szerokość jego pasma częstotliwościowego (Otnes i Enochson, 1978). W szczególności wartość częstotliwości próbkowania powinna być dobierana indywidualnie, w zależności od konstrukcji i charak-

STRESZCZENIE: Wykorzystanie techniki satelitarnej GPS do badania konstrukcji mostowych. W pracy przedstawiono założenia teoretyczne, algorytmy opracowania danych oraz wyniki badań odkształceń obiektu mostowego za pomocą odbiorników GPS (GNSS). Pokazano możliwość wykorzystania wysokoczęstotliwościowych pomiarów kinematycznych do badania przemieszczeń obiektów inżynierskich z zastosowaniem oprogramowania TRACK z MIT, wykorzystującego m.in. filtrację Kalmana. W zasadniczej części autorzy zaprezentowali kompleksową analizę danych zarówno pod kątem geodezyjnym, jak i budowlanym (mostowym). Opisany został wpływ wymuszeń w postaci przejeżdżających pojazdów na odkształcenia przęsła mostu.

ABSTRACT: Bridge constructions study using satellite technique of GPS. The following paper describes theoretic reflections as well as scientific results of bridge dynamic movements generated through the use of GPS receivers (GNSS). TRACK MIT software (with the usage of Kalman Filter) helped the authors to show the utility of high rate kinematics measurements to investigate dynamic movements of engineering constructions. The authors presented compound data analysis from both geodetic and engineering point of view to show the movements caused by heavy vehicles.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia odbiorników GPS i kamery VHS na moście w Zakroczymiu

teru obciążeń, którym one podlegają. Dodatkowym warunkiem wyboru było wykorzystanie odbiorników dwuczęstotliwościowych różnych typów i producentów (np. Leica, Trimble), co miało istotne konsekwencje związane z oprogramowaniem.

• WYBÓR OPROGRAMOWANIA GPS

Mając na uwadze założenia dotyczące wyboru odbiorników, analizie poddano dostępne na rynku programy komercyjne do opracowania pomiarów. Stwierdzono, że do tego celu można by użyć kilku z nich, ponieważ umożliwiają one analizę obserwacji zarówno o częstotliwości 10 Hz, jak i 20 Hz. Istotnym ograniczeniem oprogramowania komercyjnego jest jednak brak dostępu do algorytmów obliczeniowych. Powoduje to trudność interpretacji dokładności uzyskanych wyników.

Z tego powodu zdecydowano się na wykorzystanie oprogramowania ogólnodostępnego. W naszej opinii optymalnym rozwiązaniem było zmodyfikowanie programu TRACK (Trajectory Calculation with Kalman filter) z MIT (Massachusetts Institute of Technology), który pierwotnie był stosowany do opracowania obserwacji o częstotliwości 1 Hz (Chen i in., 1998). Program bazuje na różnicowych pomiarach fazy fali nośnej, wykorzystując do rozwiązania stosowaną również w geodezji metodę filtracji Kalmana.

Metoda ta używana jest wówczas, gdy badany system podlega zakłóconym szumem zmianom, które można zamodelować liniowym układem dynamicznym, i gdy istnieje możliwość pomiaru jego stanu. W takich warunkach błędy procesu pomiarowego, w naszym przypadku pomiaru GPS, są skorelowane w czasie. Filtr Kalmana ma dwie fazy: predykcję stanu układu oraz jego uaktualnienie. Faza predykcji dotyczy wyznaczenia

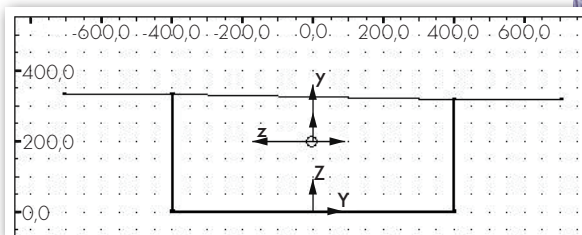
aktualnego wektora stanu na podstawie stanu wcześniejszego z wykorzystaniem zakładanego modelu dynamicznego. Faza uaktualnienia używa danych obserwacyjnych do poprawienia wyznaczonego uprzednio wektora stanu. W obu fazach uwzględniane są macierze kowariancji błędu stanu układu i procesu pomiarowego. Szczegóły związane z filtracją Kalmana, jak również z jej algorytmiczną stroną, są opisane w bogatej literaturze przedmiotu (Welch i Bishop, 2006; Kalman, 1960).

Modyfikacje programu TRACK dokonane przez autorów polegały głównie na korekcie jego algorytmów i formatów czytania danych. Program akceptuje dane obserwacyjne zapisane w formacie RINEX 2.1 lub 3.0, czyli można opracować obserwacje niezależnie od typu użytego odbiornika, co było naszym pierwotnym założeniem. Wprowadzone poprawki umożliwiły opracowanie obserwacji z centymetrową dokładnością. Poprawność funkcjonowania adaptowanego oprogramowania dla pomiarów odbiornikami 10 Hz i 20 Hz została potwierdzona testami laboratoryjnymi. W testach tych analizowano wyniki pomiarów GPS drgań układów poddanych periodycznym i aperiodycznym wymuszeniom o znanych amplitudach i częstotliwościach.

• ZAKROCZYM – BADANIA TESTOWE

Na pierwszy poligon pomiarowy wybrano most na Wiśle w Zakroczymiu na drodze krajowej nr 7 Gdańsk – Warszawa – Kraków. Wybór tego obiektu nie był przypadkowy. Był on konsekwencją uzyskania nie-

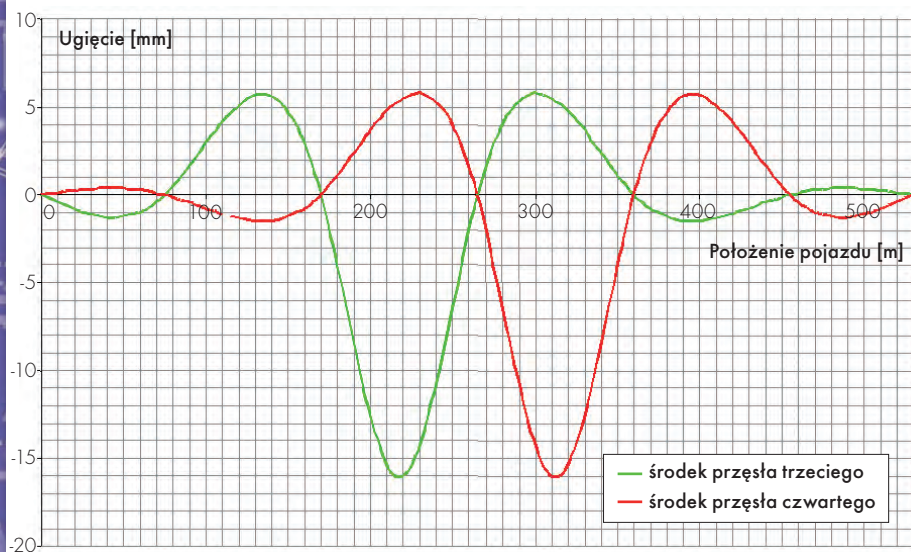
zbędnych pozwoleń na wykonanie badań testowych. Podobne badania zostały wykonane na moście Siekierskim w Warszawie, o czym informowano na łamach październikowego GEODETY. Pomiaru ugięć konstrukcji mostu w Zakroczymiu przeprowadzono na nitce prawej, która została wybudowana w 1992 roku. Zrealizowano je 24 sierpnia w godzinach od 3 do 8: nocą (kiedy natężenie ruchu jest względnie małe, ale z przewagą samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 20 t) i rano (kiedy wyraźnie wzrasta ruch pojazdów osobowych). Spodziewano się, że duże natężenie ruchu osobowego może być przyczyną wzrostu szumu pomiarowego.



Rys. 2. Przekrój przeszłowy mostu w Zakroczymiu (JNI 15360005)

MOST W ZAKROCZYMIE: PARAMETRY GEOMETRYCZNO-WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Powierzchnia pola przekroju	$A = 3998,400 \text{ cm}^2$
Położenie środka ciężkości	$y_c = -1,5 \text{ cm}$ $z_c = 197,6 \text{ cm}$
Momenty bezwładności	$I_y = 531\,038\,444,045 \text{ cm}^4$ $I_z = 84\,476\,901,568 \text{ cm}^4$
Promienie bezwładności	$i_y = 364,4 \text{ cm}$ $i_z = 145,4 \text{ cm}$
Współczynniki sztywności ścinania	$A_y = 926,613 \text{ cm}^2$ $A_z = 2784,840 \text{ cm}^2$
Wskaźniki wytrzymałości na zginanie	$W_{ely} = 753\,034,586 \text{ cm}^3$ $W_{elz} = 416\,871,771 \text{ cm}^3$
Wskaźniki wytrzymałości na ścinanie	$W_y = 862,354 \text{ cm}^2$ $W_z = 2321,326 \text{ cm}^2$
Szywność konstrukcji	$EI_y = 1\,093\,939\,194,733 \text{ kNm}^2$



Rys. 3. Teoretyczne ugięcie konstrukcji mostu w środku przęsła trzeciego i czwartego

W pomiarach terenowych wykorzystano jednocześnie 5 geodezyjnych odbiorników GPS:

- Leica GX1230 z anteną Leica X1202 – Baza 20 Hz,
- Leica GX1230GG z anteną Leica

X1202GG – Leica 20 Hz (2 sztuki),

- Trimble 5700 z anteną Zephyr – Trimble 10 Hz,

- Trimble 5700 z anteną Zephyr Geodetic – Trimble 10 Hz.

W trakcie pomiarów odbiorniki GPS

ustawiono w dwóch przekrojach, tj. w środku rozpiętości przęsła trzeciego i czwartego, licząc od strony Gdańska (odległość między odbiornikami wynosiła 95,0 m). Od strony północnej ustawiono poprzecznie do kierunku ruchu odbiorniki Leica (rys. 1). Na sąsiednim przęśle zamontowano odbiorniki Trimble 5700. Odbiornik bazowy został umieszczony na zewnątrz konstrukcji, tak aby drgania pochodzące od obiektu mostowego lub też od pojazdów na drodze krajowej nr 7 nie wpływały na jego pracę. Dodatkowo między odbiornikami Leica i Trimble ustawiono kamerę VHS zwróconą w stronę pojazdów nadjeżdżających od strony Gdańska. Informacje uzyskane z zapisu wideo w fazie analizy posłużyły do precyzyjnego określenia wpływu ruchu pojazdów na drgania i odkształcenia mostu. Dzięki synchronizacji czasu zapisu w kamerze z czasem GPS możliwe było jednoznaczne stwierdzenie reakcji konstrukcji pod wpływem obciążenia danym pojazdem (lub grupą pojazdów).

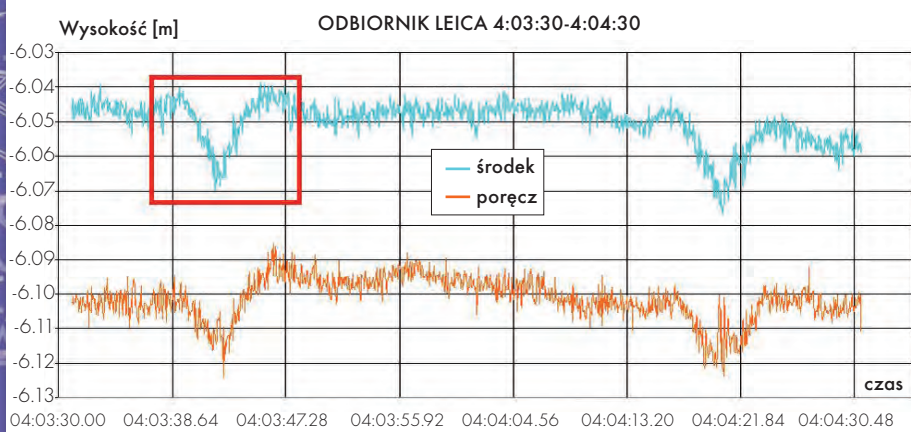
● KONSTRUKCJA MOSTU

W celu pełnej interpretacji wyników pomiarów uzyskanych za pomocą odbiorników GPS niezbędne jest ustalenie rzeczywistych charakterystyk wytrzymałościowych konstrukcji badanego mostu. Układ statyczny mostu to belka ciągła sześcioprzęsłowa z przęsłami o zmiennej rozpiętości 75,0 + 95,0 + 95,0 + 95,0 + 95,0 + 75,0 m. Jej przekrój poprzeczny to skrzynia ze stali odpornej na korozję 12HNNbA. Pomost obiektu stanowi stalowa płyta ortotropowa z żebrami o przekrojach zamkniętych. Schemat przekroju przęsłowego wykorzystany do obliczeń teoretycznych ugięć przedstawiono na rys. 2, natomiast w tabeli pod rysunkiem zestawiono podstawowe parametry geometryczne i wytrzymałościowe.

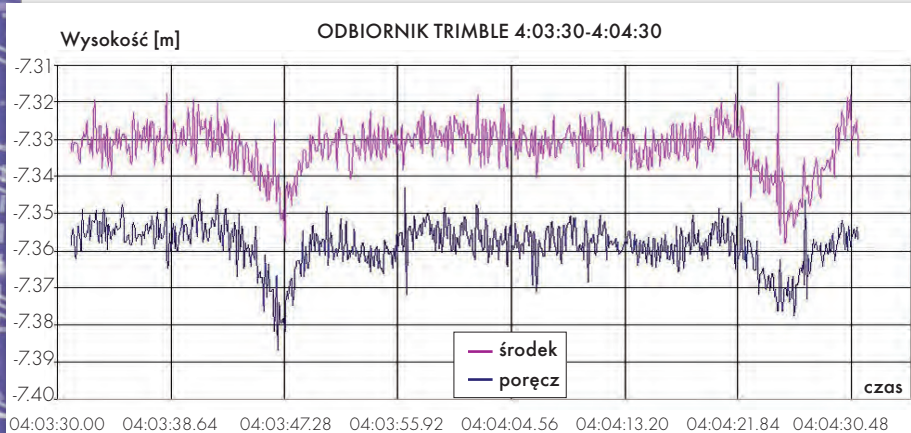
Na podstawie tych parametrów określono teoretyczny przebieg linii ugięć pod obciążeniem statycznym 300 kN, które rozłożono na odcinku 10,0 m (rys. 3). Linie te wyznaczono metodami mechaniki konstrukcji i posłużyły one do porównania z przebiegami ugięć rzeczywistych pomierzonych odbiornikami GPS.

● ANALIZA WYNIKÓW

Do opracowania wyników przygotowano wszystkie obserwacje w formacie RINEX (w plikach podzielonych na kolejne godziny eksperymentu) i efemerydy precyzyjne. Obliczenia wykonano z efe-



Rys. 4. Ugięcie konstrukcji pod wpływem obciążenia zarejestrowane odbiornikami Leica (20 Hz)



Rys. 5. Ugięcie konstrukcji pod wpływem obciążenia zarejestrowane odbiornikami Trimble (10 Hz)

merydami w formacie SP3c: *rapid*, *ultra rapid* i *final*, uzyskując podobne wyniki. Natomiast użycie efemeryd pokładowych we wstępnej analizie obserwacji prowadziło do trzykrotnie większych błędów niż w przypadku efemeryd precyzyjnych. Głównym powodem były mało dokładne poprawki zegarów satelitarnych w depeszy pokładowej.

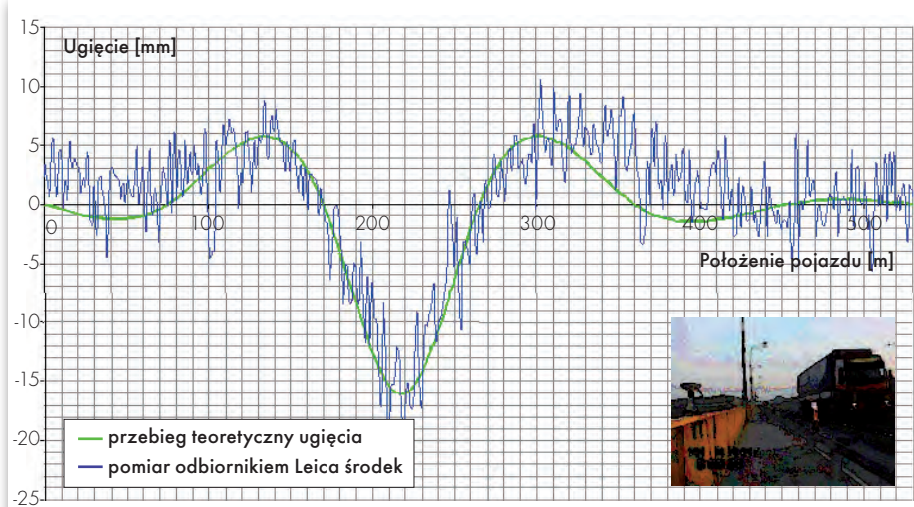
Analiza wyników została podzielona na dwa obszary. W pierwszym – rozważano obserwacje satelitarne i stabilność uzyskiwanych rozwiązań kinematycznych. W drugim – dokonano analizy w odniesieniu do badanej konstrukcji mostu. Podejście takie ma charakter interdyscyplinarny, co wymusza bezpośrednio zaangażowanie w badaniach specjalistów z zakresu geodezji satelitarnej, fizyki i mechaniki konstrukcji inżynierskich.

Przedstawienie wszystkich wyników badań w jednym artykule nie jest możliwe, dlatego wybrano tylko dwa reprezentatywne dla prowadzonych badań przykłady. W pierwszym analizujemy obciążenie wywołane przejazdem pojedynczej ciężarówki, w drugim pokazano przejazd kolumny samochodów. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowy przebieg wartości ugięcia przęsła w przypadku przejazdu pojedynczych pojazdów. Z przebiegu wykresów wyraźnie widać wielkość ugięć w momencie najazdu na przęsło mostu oraz moment zjazdu. Zarejestrowane ugięcia w tych momentach dochodzą do 2-3 cm. Analizując kilkanaście następnych przejazdów, uzyskano podobne wartości ugięć.

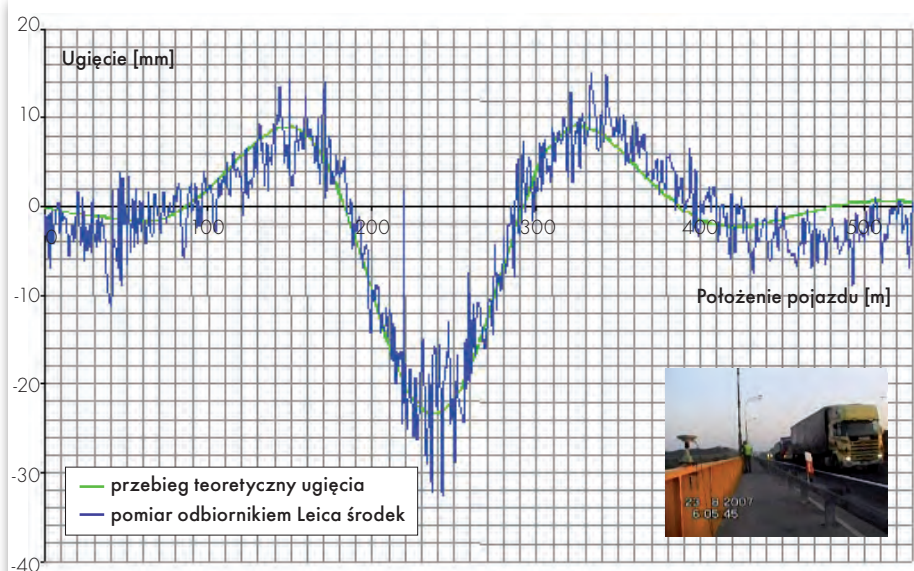
Na rysunkach 4 i 5 można zauważyć wyraźnie zwiększone ugięcia konstrukcji pod wpływem przejazdu ciężkich pojazdów. Zarejestrowana liczba obciążeń takimi pojazdami pozwala wyciągnąć wnioski dotyczące liczby przejazdów ponadnormatywnych, co związane jest z możliwością określenia poziomu zmęczenia materiału konstrukcyjnego przęsła mostu oraz jego trwałości (Madałaj i Wołowicki, 2007).

Na rysunku 6 przedstawiono przebieg rzeczywistego (z pomiaru GPS odbiornikiem Leica-środek) i teoretycznego ugięcia konstrukcji pod wpływem obciążenia jednym pojazdem o szacunkowej masie 30 ton oraz prędkości 97,7 km/h (czerwony prostokąt na rys. 4). Prędkość pojazdu ustalono na podstawie czasu jego przejazdu pomiędzy liniami odbiorników (na odcinku 95,0 m).

Rysunek 7 prezentuje przebieg rzeczywistego ugięcia konstrukcji (odbiornik



Rys. 6. Ugięcie konstrukcji mostu (w środku trzeciego przęsła) pod wpływem obciążenia pojedynczym pojazdem. Czas pomiaru 4:03:34-4:03:54



Rys. 7. Ugięcie konstrukcji mostu (w środku trzeciego przęsła) pod wpływem obciążenia dwoma pojazdami jadącymi w odległości 40 m. Czas pomiaru 4:05:37-4:06:06

Leica-środek) pod wpływem obciążenia dwoma pojazdami o szacunkowej masie 30 ton każdy, prędkości 72,8 km/h i odległości pomiędzy nimi blisko 40 m.

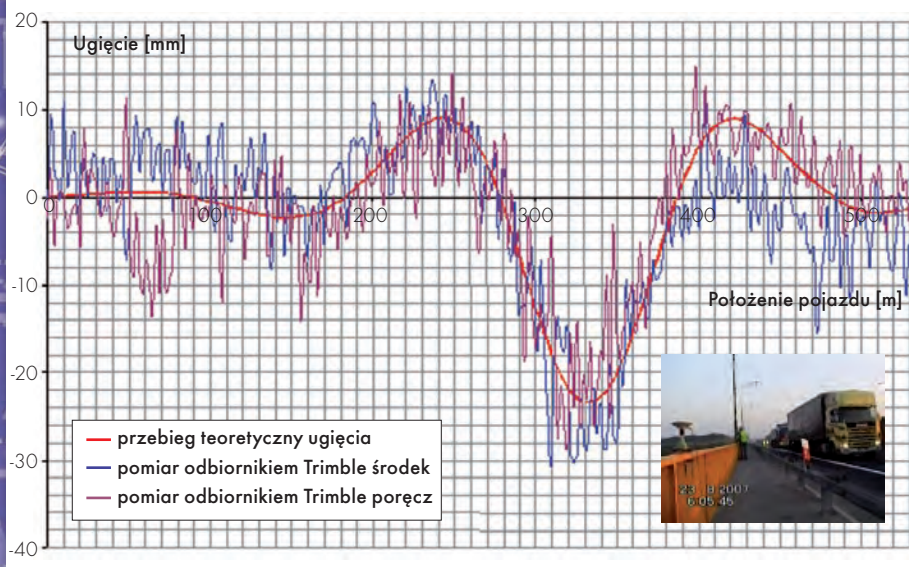
Wykres na rys. 8 prezentuje przebieg rzeczywistego ugięcia konstrukcji zarejestrowany odbiornikami Trimble 5700 na poręczy i na środku mostu, pod wpływem obciążenia dwoma pojazdami o szacunkowej masie 30 ton każdy, prędkości przejazdu 72,8 km/h i odległości pomiędzy nimi blisko 40 m.

Przeprowadzone pomiary wykazały, zgodnie z rzeczywistością, mimośrodkowe przemieszczenia przęsła będące skutkiem nierównomierności wpływu obciążenia wynikającego z przejazdu po określonym pasie ruchu (rys. 8). Na ry-

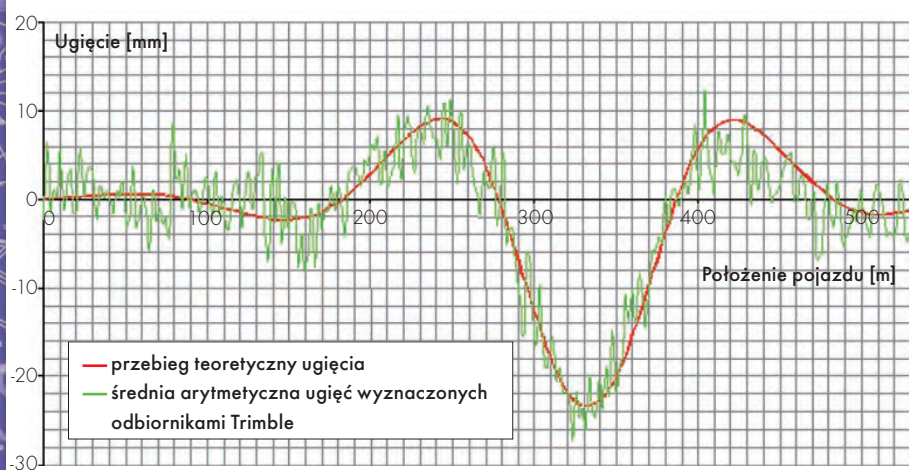
sunku widać, że wartości ugięć w momencie wjechania pojazdu na przęsło są mniejsze dla strony przeciążonej (linia brązowa) od wartości ugięć uzyskanych na odbiorniku umieszczonym przy sąsiednim pasie ruchu (Trimble – środek). Wskazuje to na występowanie zjawiska skręcania przęsła. Uzyskane wyniki można wykorzystać zarówno do określenia współczynnika dynamicznego obciążeń (rys. 10), jak i rzeczywistego współczynnika przeciążenia pokazanego na rys. 9 (Polska Norma PN-85/S-10030).

• WNIOSKI KOŃCOWE

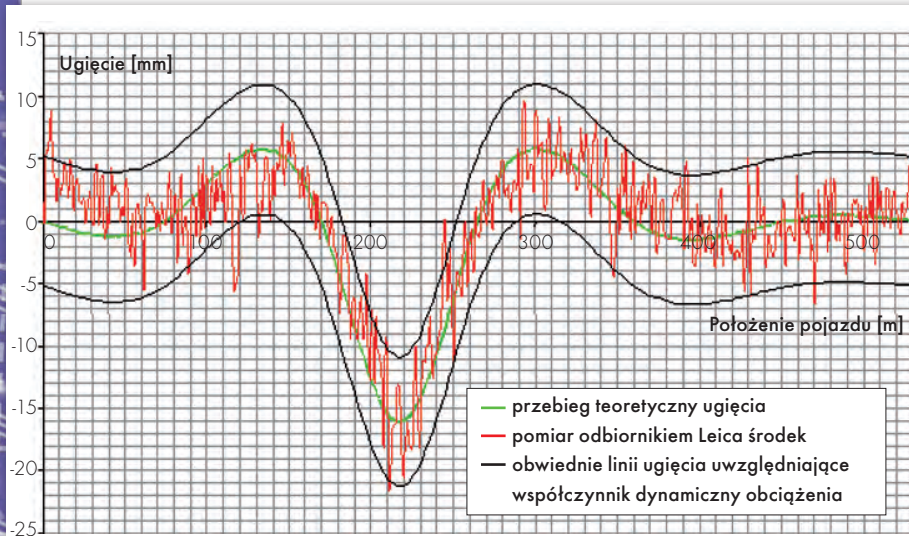
Przeprowadzone badania pozwoliły na:
a) wyznaczenie obwiedni przemieszczeń wskazujących zakres oddziaływań



Rys. 8. Ugięcie konstrukcji mostu (w środku czwartego przęsła) pod wpływem obciążenia dwoma pojazdami jadącymi w odległości 40 m. Czas pomiaru 4:05:37-4:06:06



Rys. 9. Wykres średniej arytmetycznej ugięć w przekroju mostu przedstawionych na rys. 8



Rys. 10. Ugięcie środka przęsła trzeciego pod wpływem obciążenia jednym pojazdem

dynamicznych obciążenia ruchomego na konstrukcję mostu,

b) określenie liczby przejazdów pojazdów ponadnormatywnych po danym obiekcie, a w konsekwencji możliwość określenia poziomu zmęczenia materiału prześel,

c) ustalenie zakresu rzeczywistego przeciążenia konstrukcji od przejazdu mimośrodowego.

Interpretacja wyników pomiarów GPS ugięć i przemieszczeń mostu w Zakroczymiu pokazała zasadność stosowania opracowanej metodyki badania drgań konstrukcji budowlanych poddanych obciążeniom dynamicznym. Wykorzystane w badaniach odbiorniki zarówno 20 i 10 Hz pozwalają uzyskać podobne wyniki, które są zgodne z teoretycznymi obliczeniami wartości ugięcia prześel mostu.

Dr hab. inż. MARIUSZ FIGURSKI,
prof. WAT – prodziekan ds. naukowych
Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji,
kierownik Zespołu Geomatyki Stosowanej.

Dr inż. RYSZARD CHMIELEWSKI, adiunkt
w Katedrze Inżynierii i Komunikacji.

Dr inż. KRZYSZTOF KROSCZYŃSKI, adiunkt,
Zespół Geomatyki Stosowanej, WLiG.

Mgr inż. PAWEŁ KAMIŃSKI, asystent,
Zespół Geomatyki Stosowanej, WLiG.

Mgr inż. MARCIN GAŁUSZKIEWICZ, asystent,
Zespół Geomatyki Stosowanej, WLiG.

MACIEJ WRONA, student V roku kierunku
Geoinformatyka na WLiG.

RECENZENT:

PROF. IRENEUSZ WINNICKI,
dziekan WLiG WAT w Warszawie

Literatura

1. Chen, G., Herring T.A. and King R.W: TRACK software manual, MIT, 1998;
2. Kalman R.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME, „Journal of Basing Engineering”, vol. 82, March 1960;
3. Karsznia K.: Leica GeoMos, GEODETA 9/2007;
4. Madaj A., Wołowicki W.: Budowa i utrzymanie mostów. Arkady, 2007;
5. Otnes R. K., Enochson L.: Analiza numeryczna szeregów czasowych, WNT, Warszawa, 1978;
6. Polska Norma PN-85/s-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia
7. Welch G., Bishop G.: An Introduction to the Kalman Filter, Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, 2006, <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalmanIntro.html>;
8. Zarządzenie nr 14 generalnego dyrektora dróg krajowych i autostrad z 7 lipca 2005 r., załącznik Instrukcja przeprowadzenia przeglądów drogowych obiektów inżynierskich.

Podziękowania

Autorzy artykułu dziękują firmie Leica Geosystems i Warszawskiemu Przedsiębiorstwu Geodezyjnemu S.A. za aktywną pomoc w pomiarach. Szczególnie podziękowania składamy Waldemarowi Kubiszowi z Leica Geosystems, który wspólnie z nami spędził na mierzonych mostach (Zakroczym i most Siekierski) wiele wyczerpujących godzin.