



Zastosowanie współczesnych metod wyznaczania przemieszczeń konstrukcji inżynierskich na przykładzie mostu Brama Przemyska

# Krakowski SMOK w Przemysłu

Projekt „System Monitorowania Odkształceń Konstrukcji” (w skrócie SMOK) realizowany przez studentów z Koła Naukowego Geodetów „Dahlta” powoli dobiega końca. Młodych naukowców z Krakowa czeka jednak jeszcze sporo wysiłku przy opracowaniu pozyskanych danych.

## Adam Wala

Tachimetry, odbiorniki GPS oraz niwelator, wcześniej rozgrzane do czerwoności, do skrzyniek pochowaliśmy już w październiku 2017 r. W ruch wprawiliśmy natomiast komputery stacjonarne, laptopy oraz kalkulatory niezbędne do żmudnych obliczeń. Ale zaznajmy może od początku. Głównym celem realizowanego przez nas projektu było stworzenie uniwersalnego systemu – składającego się z dwóch segmentów – umożliwiającego monitorowanie przemieszczeń budowli w trybie ciągłym oraz okresowo. Pomiar w trybie ciągłym miał być realizowany z wykorzystaniem przymocowanych na elementach konstrukcyjnych wybranego obiektu anten GNSS oraz stacji meteorologicznej. Dodatkowo zaplanowaliśmy obserwacje za pomocą tradycyjnych instrumentów geodezyjnych oraz innych czujników, aby uzyskać możliwie jak najwięcej informacji na temat zachowania konstrukcji.

W naszym kole naukowym działającym na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH zarys projektu krystalizował się od początku 2017 r., a bodźcem umożliwiającym rozpoczęcie prac było otrzymanie w styczniu ub.r. dofinansowania w ramach konkursu o Grant Rektora AGH 2017.

### • Wybór obiektu

Uskrzydleni pozyskaną dotacją przystąpiliśmy do prac organizacyjnych: zdobycia pozwolenia na wykonywanie prac na obiekcie, wyboru metod pomiarowych zapewniających satysfakcjonujące wyniki dokładnościowe, planowania wyjazdów pomiarowych czy poszukiwania firm, które zechciałyby wspomóc nas merytorycznie w realizacji projektu. W wielu tych kwestiach nieoceniony okazał się opiekun naukowy projektu dr inż. Przemysław Kuras.

Już podczas roboczych spotkań ustaliliśmy, że w pierwszej kolejności będziemy starali się o otrzymanie pozwolenia na monitorowanie mostu. Byliśmy zainteresowani trzema obiektami (Bramą Przemyską w Przemysłu, kładką im. Ojca Bernatka w Krakowie oraz mostem w ciągu autostrady A1), z zarządcami których nawiązaliśmy kontakt w lutym 2017 r. Ostatecznie nasz wybór padł na Bramę Przemyską – ponadpółkilometrowy (wraz z estakadą dojazdową) most wawontowy przez San w ciągu drogi krajowej nr 77. Jest to obiekt reprezentatywny i stosunkowo nowy (został otwarty w listopadzie 2012 r.), na którym nie zainstalowano dotychczas żadnych czujników monitorujących. Mielismy więc szerokie pole do popisu. Nie bez znaczenia było też entuzjastyczne nastawienie dyrekcji Zarządu Dróg Miejskich w Przemysłu (zarządcy mostu) do naszego projektu.

Rys. 1. Schemat działania systemu do monitorowania ciągłego, który umożliwia zdalne otrzymywanie wyników pomiarów



Fot. 1. Antena GNSS zamontowana na pylonie północnym mostu

Z początkiem lutego 2017 r. nawiązaliśmy współpracę z dwoma dystrybutorami sprzętu. Firma Geoida ze Słupska wypożyczyła nam dwa odbiorniki Topcon Legacy-E wraz z antenami GNSS. Kolejne dwa zestawy (odbiornik + antena GNSS Trimble 5700) otrzymaliśmy od firmy Geotronics Dystrybucja z Krakowa.

Od marca do października 2017 r. zorganizowaliśmy osiem wyjazdów do Przemysłu, z czego podczas sześciu wykonywaliśmy pomiary okresowe. Dwa pierwsze poświęciliśmy na oględziny obiektu, planowanie rozmieszczenia naszego sprzętu oraz wykonanie czynności montażowych.

Kilka metrów poniżej, wewnątrz pylonów, znajdowały się odbiorniki, które z kolei podłączyliśmy do stale uruchomionych laptopów. Największym problemem, który napotkaliśmy przy realizacji tego zadania, była komunikacja między elementami systemu. Router zapewniający dostęp do sieci znajdował się wewnątrz jednego z pylonów zbudowanych z grubych żelbetonowych ścian. Aby sygnał docierał do drugiego pylonu, musieliśmy skorzystać z anten Ubiquiti umożliwiających przesyłanie oraz odbieranie sygnału wi-fi na duże odległości.

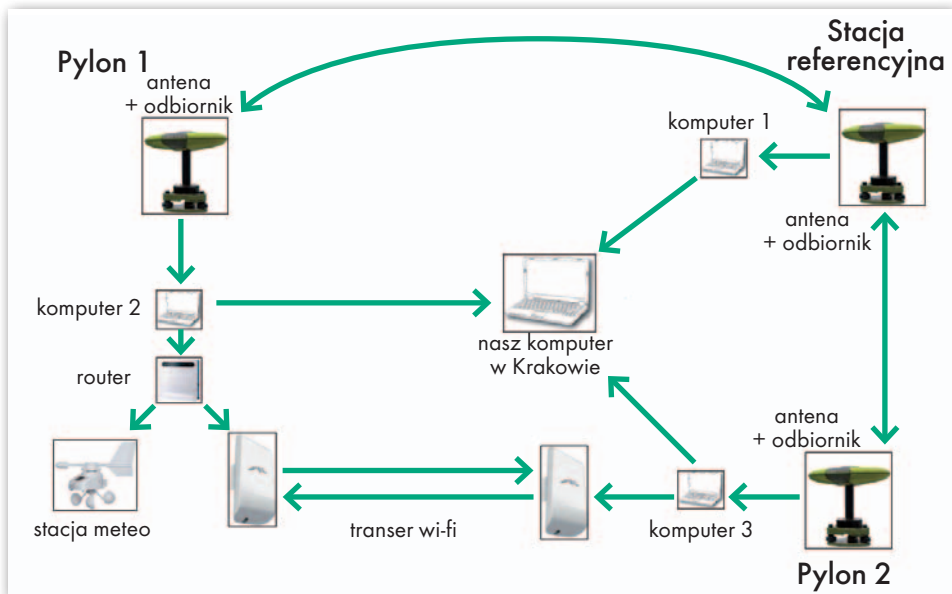
### • Monitorowanie ciągłe

Odbiorniki GNSS wykonywały pomiary metodą statyczną. Dodatkowo na dachu budynku Zarządu Dróg Miejskich w Przemysłu zamontowaliśmy kolejny odbiornik, który służył za stację referencyjną. Wszystkie dane pomiarowe mogliśmy na bieżąco analizować z poziomu naszego komputera w Krakowie. Cały schemat zaprojektowanego systemu został przedstawiony na rysunku 1.

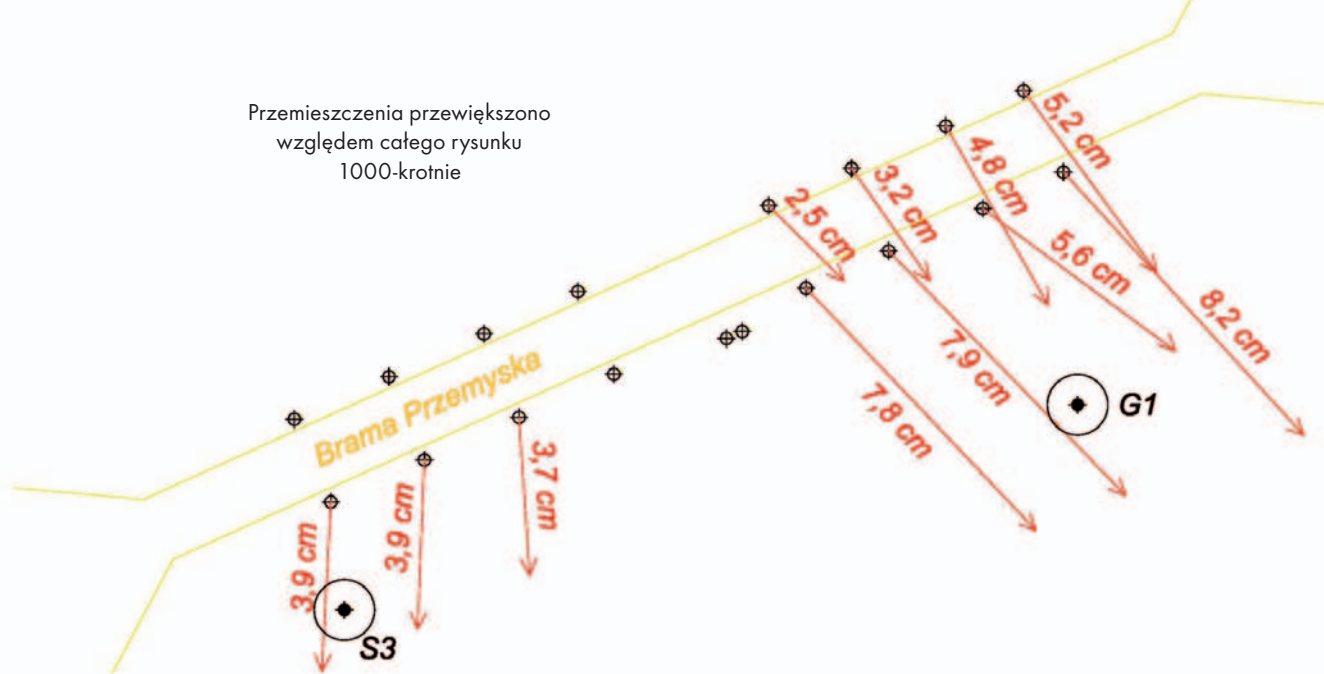
Na pylonie, w którym znajdował się router, zamontowaliśmy także stację meteorologiczną składającą się z termohigrometru oraz wiatromierza. Informacje o warunkach atmosferycznych otrzymywaliśmy poprzez aplikację mobilną WeatherHub co niecałe 4 minuty. Ostatecznie dane meteorologiczne archiwizowały się w formie tabelarycznej, możliwej do odczytania w arkuszach

Na pylonie, w którym znajdował się router, zamontowaliśmy także stację meteorologiczną składającą się z termohigrometru oraz wiatromierza. Informacje o warunkach atmosferycznych otrzymywaliśmy poprzez aplikację mobilną WeatherHub co niecałe 4 minuty. Ostatecznie dane meteorologiczne archiwizowały się w formie tabelarycznej, możliwej do odczytania w arkuszach

Na pylonie, w którym znajdował się router, zamontowaliśmy także stację meteorologiczną składającą się z termohigrometru oraz wiatromierza. Informacje o warunkach atmosferycznych otrzymywaliśmy poprzez aplikację mobilną WeatherHub co niecałe 4 minuty. Ostatecznie dane meteorologiczne archiwizowały się w formie tabelarycznej, możliwej do odczytania w arkuszach



Przemieszczenia powiększono  
względem całego rysunku  
1000-krotnie



Rys. 2. Wektory przemieszczeń poziomych folii rozklejonych na moście między pierwszą a ostatnią sesją pomiarową (III-X 2017)

kalkulacyjnych. Dzięki nim zbadamy wpływ warunków atmosferycznych na zachowanie się obiektu. System ciąglego monitorowania działał od 24 marca do 6 października 2017 r., a pozyskane dane w dalszym ciągu opracowujemy. Sprawdzamy, czy wykonane przez nas obliczenia są prawidłowe.

### • Pomiar tachymetryczny i satelitarne

Poza obserwacjami prowadzonymi w sposób ciągły wykonaliśmy także okresowe pomiary kątowno-liniowe, niwelacyjne oraz satelitarne na podstawie punktów sieci kontrolno-pomiarowej założonej w pobliżu obiektu.

Na potrzeby pomiarów tachymetrycznych, korzystając z wózka rewizyjnego podwieszono pod mostem, rozmieściliśmy na przesłach Bramy Przemyskiej 16 folii dalmierczych (tarcz). Dodatkowo dwie tarczki przykleiliśmy wzdłuż pionowej osi pylonu. Ich położenie konsultowaliśmy z opiekunem naukowym projektu, jednak ostatecznie na umiejscowienie folii duży wpływ miała dostępność wybranych części mostu.

Dla wszystkich tych punktów planowaliśmy wyznaczyć przemieszczenia poziome. Obserwowaliśmy je z sieci trygonometrycznej niepełnej, na którą składały się m.in. trzy słupy z wymuszonym centrowaniem umiejscowione w okolicach mostu jeszcze w czasie jego budowy. Sieć zagęściliśmy jednym punktem stałym, ponadto korzystaliśmy ze stanowisk swobodnych.

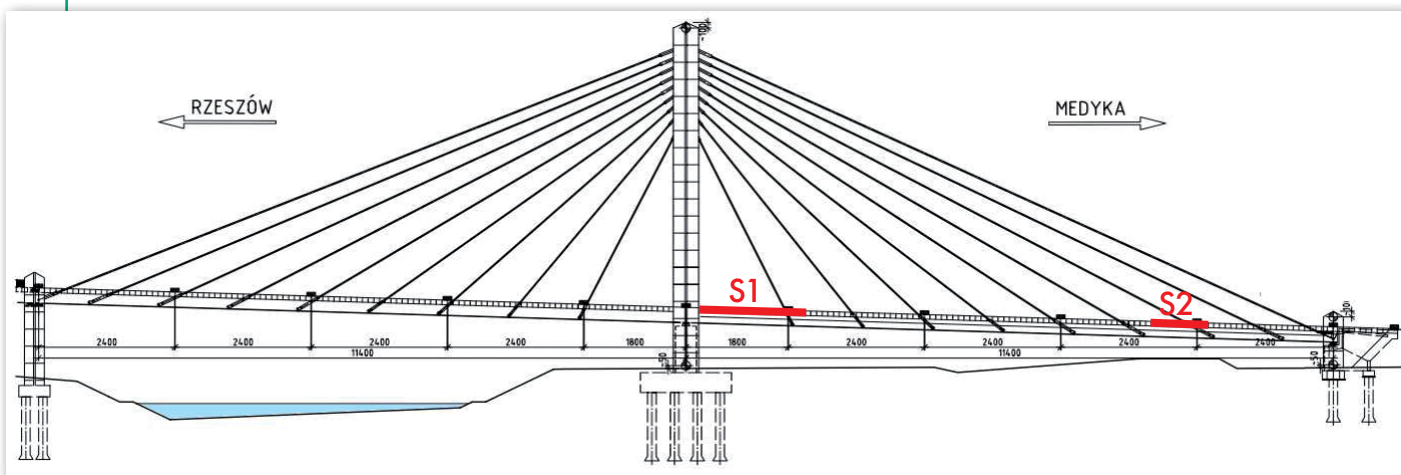
Przed pomiarem kątowno-liniowym tarcz wyznaczaliśmy kierunki do dalekich punktów orientujących: wieży kościelnej, piorunochronu zlokalizowanego na szczycie komina przemysłowego lub anten satelitarnych zamontowanych na dachach domów jednorodzinnych. Stała wartość otrzymanych kątów pomiędzy dalekimi celami w kolejnych sesjach świadczyła o stabilności punktów sieci. Na każdym stanowisku pomiar osnowy oraz folii na moście wykonywaliśmy w dwóch seriach metodą wypełnienia horyzontu. W pracy wykorzystaliśmy tachimetr Topcon OS103 wypożyczony z Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH.

Podczas wyrównania za stałe przyjęliśmy położenie jednego z punktów z wymuszonym centrowaniem oraz azymut z tego punktu na inny punkt z wymuszonym centrowaniem. Każdorazowo wyrównane współrzędne przeliczaliśmy do układu pomiaru zerowego. Do wyrównywania sieci wykorzystaliśmy także wektory obliczone z sesji statycznych pomiarów satelitarnych na punktach osnowy.

Otrzymane wyniki dokładnościowe sieci były zadowalające, a wartości przemieszczeń większości punktów kontrolowanych co najmniej dwukrotnie przekraczały błąd wyznaczenia ich położenia. Mogliśmy zatem przyjąć, że są to rzeczywiste przemieszczenia konstrukcji. Na rys. 2 przedstawiliśmy wektory wykrytych przemieszczeń poziomych. Za pomiar „zerowy” przyjęliśmy pierwszą sesję pomiarową z marca 2017 r. i porównaliśmy ją z wynikami otrzymanymi podczas ostatnich pomiarów w październiku.

### • Niwelacja precyzyjna

Pomiary okresowe to także niwelacja precyzyjna, którą wykonywaliśmy na



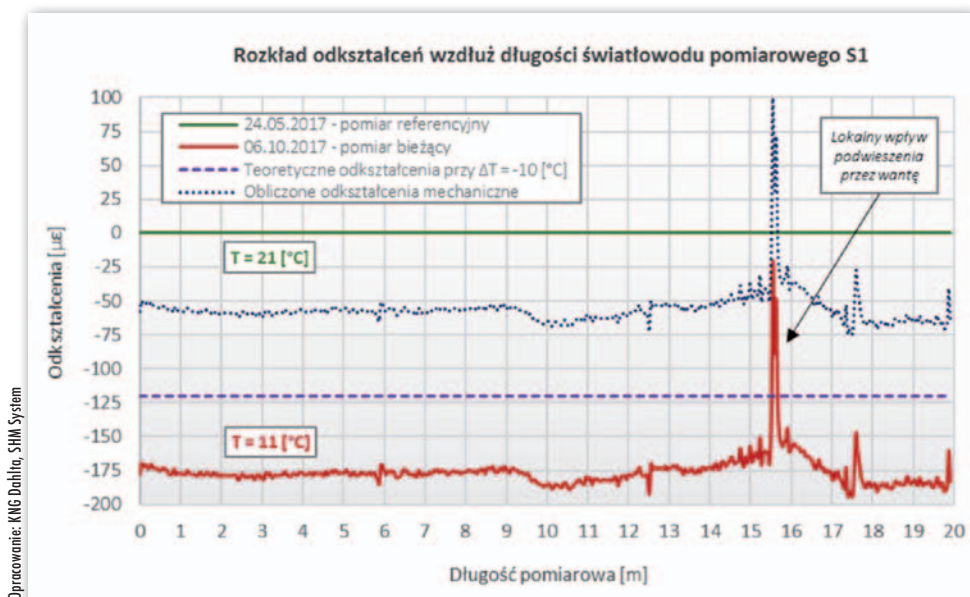
Rys. 3. Schemat przedstawiający miejsce montażu włókien światłowodowych na Bramie Przemyskiej

obu brzegach Sanu niwelatorem Leica DNA03. Za punkty charakterystyczne przyjęliśmy repery, które zostały posadowione na obiekcie jeszcze podczas budowy. Kontrolowaliśmy przemieszczenia pionowe sześciu punktów (po dwa na: podstawie pylonów, podporze przęsła oraz przyczółku mostu).

Założyliśmy dwie sieci po wschodniej i zachodniej stronie rzeki. Za ich punkty główne, względem których wyznaczaliśmy różnice wysokości, przyjęliśmy bolce umieszczone na słupach z wymuszonym centrowaniem. Znajdowały się one w odległości około 100 m od obiektu. Zgodnie z zasadą ograniczonego zaufania postanowiliśmy skontrolować osiadanie także tych punktów. W tym celu założyliśmy lub przyjęliśmy w promieniu 300 m dodatkowe punkty kontrolne, do których również wykonywaliśmy pomiary metodą niwelacji precyzyjnej. Brak zmian w różnicach wysokości pomiędzy punktami sieci otrzymywanych w kolejnych sesjach pomiarowych pozwolił nam przyjąć rzędne punktów głównych za stałe. W trakcie naszych badań kontrolowane punkty osiadły o ponad 10 mm.

## • Pomiary światłowodowe

W ramach projektu SMOK podjęliśmy także współpracę naukowo-badawczą z firmą SHM System z Krakowa. Jej owocem były pomiary odkształceń z wykorzystaniem światłowodowej techniki pomiarowej. Współpraca rozpoczęła się od kursu obchodzenia się z włóknem światłowodowym oraz jego montażu na konstrukcji. Odpowiednio przeszkoleni, byliśmy już w stanie zainstalować włókna na półce dźwigara mostu. Montaż polegał na wyczyszczeniu oraz odłuszczeniu elementu, do którego następnie za pomocą żywicy przykleiliśmy włókno. Wszystkie czynności wykonywaliśmy z poziomu



Rys. 4. Wykres odkształceń dźwigara mostu wzdłuż odcinka pomiarowego S1

wózka rewizyjnego, którego niestabilność, niestety, nie ułatwiała nam pracy. Ostatecznie zamontowaliśmy dwa włókna o długości 20 i 13 metrów (rys. 3).

Odształcenia metodą światłowodową wyznacza się za pomocą reflektometru optycznego wykorzystującego zjawisko rozpraszania światła. Instrument ten pozwala na pomiary odkształceń wzdłuż włókna z rozdzielczością tak niewielką, że z punktu widzenia monitorowania konstrukcji inżynierskich można je uznać za geometrycznie ciągłe. Dokładność takiego pomiaru jest rzędu jednej mikrodeformacji. W czasie trwania projektu wykonaliśmy dwa odczyty ze światłowodów, z których jeden należy uznać za pomiar referencyjny (rys. 4). Znając różnicę temperatury pomiędzy kolejnymi odczytami, mogliśmy obliczyć teoretyczne wartości odkształcenia elementów stalowych ze względu na termikę, które odjęte od odkształceń zmierzonych przez światłowody dały wartości

będące wynikiem oddziaływań np. mechanicznych.

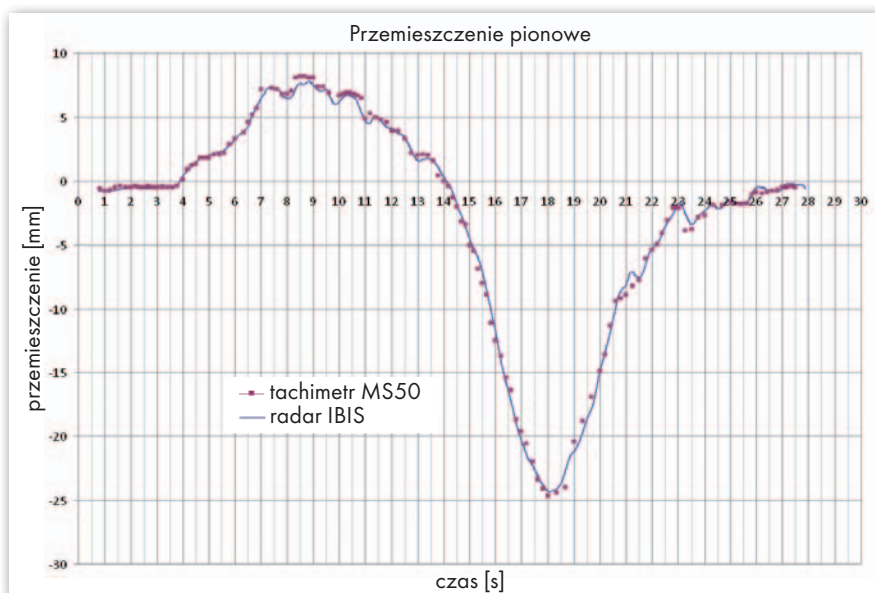
## • Radar i tachimetr

Projekt obejmował także trwający 5 godzin pomiar przemieszczeń pionowych przęsła w trybie ciągłym, gdy na moście odbywał się normalny ruch drogowy. Obserwacje wykonywaliśmy równocześnie dwiema metodami. Pierwsza opierała się na pomiarze tachimetrycznym w trybie śledzenia z zastosowaniem funkcji ATR (automatycznego rozpoznawania celu). Wykorzystaliśmy do tego tachimetr zrobotyzowany Leica Nova MS50 oraz przyrząd LeicaMini, który przymocowaliśmy do balustrady mostu. Błąd pomiaru kąta pionowego w instrumencie Leica to 1 sekunda, a odległości  $-1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$ . Pomiary wykonywane były z częstotliwością ponad 5 odczytów na sekundę. Drugą metodą wyznaczenia przemieszczeń przęsła była analiza natężenia odbicia oraz czasu powrotu mikrofal wysyłanych przez radar interferometryczny IBIS-S (fot. 2).

Do niewątpliwych zalet wykorzystania tachimetru MS50 można zaliczyć: prostotę w interpretacji danych, szybkość opracowania danych, możliwość jednoznacznego wskazania obserwowanego punktu czy dostępność sprzętu oraz oprogramowania na rynku. Za wykorzystaniem radaru interferometrycznego przy tego typu realizacjach przemawiają z kolei: możliwość pomiaru bez konieczności dostępu do konstrukcji, obserwacja wielu punktów równocześnie czy wysoka częstotliwość wykonywanego pomiaru. Analiza próbkowania obu instru-

Fot. 2. Radar interferometryczny w trakcie pomiaru





Rys. 5. Porównanie wykresów przemieszczeń otrzymanych z radaru oraz tachimetru robotycznego dla tego samego czasu (w momencie przejazdu pojazdu wielkogabarytowego)

mentów przedstawiona jest na wykresie na rys. 5. Ze względu na częstotliwość wykonywanego pomiaru przez radar na poziomie 200 odczytów na sekundę wykres przemieszczeń jest praktycznie linią ciągłą. Po wykonaniu obliczeń dokładnościowych z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów otrzymaliśmy błąd przemieszczenia punktu z pomiaru radarem wynoszący 0,1 mm, a z pomiaru tachimetrem – 0,2 mm.

### • Ambitne plany

Wracając z ostatniego wyjazdu pomiarowego (podczas którego zwiedziliśmy także wiele zabytków Przemysła), odczuwaliśmy ogromną satysfakcję z wykonanej przez ostatnie pół roku pracy. Warto wspomnieć, że w organizację oraz realizację projektu zaangażowanych było łącznie ponad 20 studentów. Każdy z nas miał niemały udział w tym, że system zadziałał prawidłowo. Poprawność działania systemu utwierdziła nas w przekonaniu, że sprzęt został dobrany właściwie. Gdy już będziemy mieli opracowany komplet danych, spotkamy się z przedstawicielami Zarządu Dróg Miejskich w Przemysku i zaprezentujemy im wyniki projektu.

To jednak nie koniec. W tym roku udało nam się uzyskać kolejne dofinansowanie w ramach konkursu o Grant Rektora

AGH 2018 oraz z macierzystego wydziału. Czas zatem na projekt SMOK 2! Tym razem pomiarami obejmiemy most

wantowy im. Tadeusza Mazowieckiego w Rzeszowie. Stosowną zgodę otrzymaliśmy już z Miejskiego Zarządu Dróg w Rzeszowie. W ramach nowego projektu chcemy sprawdzić, czy stworzony przez nas system uda się wdrożyć w innym miejscu, a także porównać wyniki otrzymane na różnych obiektach. Ponadto planujemy zastosować w monitoringu nowe czujniki oraz wykorzystać metodę RTK przy pomiarze satelitarnym na pylonie. Jesteśmy przekonani, że zapału nie zabraknie żadnemu uczestnikowi projektu, a rozwijane umiejętności zaowocują w przyszłej pracy zawodowej.

Adam Wala  
KNG Dahlta

Podziękowania kierujemy do dyrekcji Zarządu Dróg Miejskich w Przemysku za zgodę na pomiary na Bramie Przemyskiej oraz dyrekcji Zespołu Szkół Elektronicznych i Ogólnokształcących w Przemysku za udostępnienie miejsca na bazę sprzętowo-logistyczną.



## SMOK nagrodzony na konferencjach

Prezentacja podsumowująca projekt SMOK pt. „Integracja współczesnych metod wyznaczania przemieszczeń konstrukcji inżynierskich na przykładzie mostu Brama Przemyska” została wyróżniona w grudniu 2017 r. na dwóch studenckich konferencjach organizowanych na AGH w Krakowie. Uczestnicy projektu Joachim Pawliński (na fot. z lewej) i Adam Wala (na fot. z prawej) zajęli II miejsce w konkursie referatów podczas 58. Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego – Sekcja Geodezji oraz I miejsce podczas III Forum Uni-Biznes Geodezja Przedsiębiorcy Studentów.