



Zastosowanie mobilnego systemu monitoringu przemieszczeń do oceny stanu konstrukcji mostu w kontekście obronności

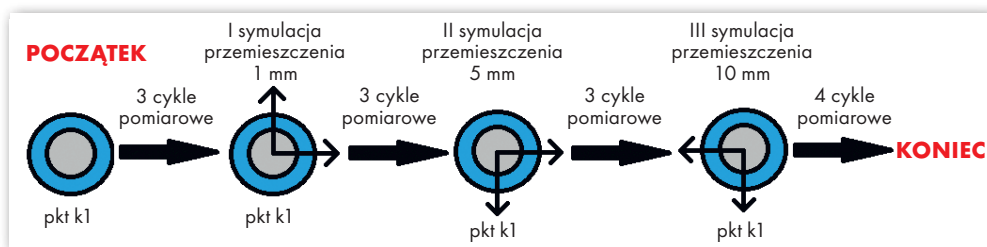
Pod kontrolą tachimetru

Monitoring przemieszczeń i deformacji to prężnie rozwijająca się dziedzina geodezji inżynierskiej. Istniejące na rynku systemy zyskują coraz większe uznanie w świecie budownictwa (inżynierii lądowej), wykonawstwa geodezyjnego oraz wojska.

**Michał Grudziński,
Krzysztof Karsznia**

Dzięki zastosowaniu systemów monitoringu – zarówno komercyjnych, rozwijanych przez czołowych producentów sprzętu geodezyjnego, jak i powstających w pracowniach i laboratoriach uczelnianych – zwiększa się poziom bezpieczeństwa obiektów inżynierskich oraz infrastruktury technicznej. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera stałe zwiększanie ich niezawodności operacyj-

Testowany mobilny system do monitoringu przemieszczeń przed Kolejowym Mostem Gdańskim w Warszawie



Opracował: M. Grudziński

Rys. 1. Schemat symulacji przemieszczenia monitorowanych punktów na przykładzie punktu k1

nej oraz mobilności. Aspekt bezpieczeństwa w znacznym stopniu odnosi się do zapewnienia przejeźdźności ciągów komunikacyjnych, a co za tym idzie – infrastruktury drogowej. Kluczową rolę odgrywają tutaj mosty oraz wiadukty przenoszące niekiedy znaczny ruch kołowy i kolejowy oraz stanowiące trzon sieci drogowej.

Badania nad zastosowaniem mobilnych systemów monitoringu deformacji stanowią jeden z głównych nurtów rozwojowych Zakładu Geodezji i Nawigacji Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Niniejszy artykuł przedstawia wyniki prac badawczych prowadzonych przez dr. inż. Krzysztofa Karsznię zrealizowanych w ramach projektu inżynierskiego sierżanta podchorążego Michała Grudzińskiego. Zostały one też zaprezentowane podczas XV Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu „Aktualne problemy w geodezji inżynierskiej” (Politechnika Warszawska, 27-28 maja 2021 r.).

• Ważna praca

Monitoring deformacji to jedno z kluczowych zagadnień geodezyjnych zarówno w sferze badań naukowych, jak i działań wdrożeniowych. Choć pierwsze wzmianki w postaci opracowań branżowych i artykułów na temat zintegrowanych systemów wykrywania przemieszczeń obiektów inżynierskich pochodzą z lat 70. ubiegłego wieku (na uwagę zasługują choćby prace niezjącego już dr. inż. Mariana Kowalczyka z Politechniki Wrocławskiej), to ich dynamiczny rozwój obserwowany jest od połowy lat 90. Kamie-

niem milowym było pojawienie się na rynku tzw. wideotachimetru firmy Leica Geosystems oraz rozwój technologii automatycznego rozpoznawania celu (ATR), umożliwiających bezobsługową i powtarzalną akwizycję danych przestrzennych.

W Polsce pierwsze kompleksowe rozwiązania komercyjne wprowadzono w połowie lat 2000. Na temat rozwoju i wdrożeń geodezyjnych systemów monitoringu pisano w krajowej prasie branżowej już kilka lat temu – m.in. w miesięczniku GEODETA. Od tego czasu postęp technologiczny w dziedzinie informatyki, łączności oraz przetwarzania danych spowodował znaczne ich rozpowszechnienie.

Obecnie w Polsce każdego roku startuje kilkadziesiąt projektów związanych z monitoringiem. Są one pokłosiem współpracy geodezji z budownictwem w ramach nowej dyscypliny naukowej inżynieria lądowa i transport, a także nowych inwestycji, niekiedy bardzo ambitnych i technologicznie wymagających, których realizacja bez aktywnego wykorzystania systemów monitoringu geodezyjnego byłaby albo bardzo trudna, albo wręcz niemożliwa.

W tym miejscu warto chociażby wspomnieć wdrożenie kompleksowego systemu monitoringu geodezyjnego przez konsorcjum warszawskiej firmy Wektor (mgr inż. Mariusz Józwiak) oraz Politechniki Warszawskiej (dr inż. Waldemar Odziemczyk, mgr inż. Mariusz Pasik) podczas budowy najwyższego w Unii Europejskiej wysokościowca Varso Tower. O wynikach wdrożenia pod-

czas wspomnianej konferencji APGI mówił Mariusz Pasik, a o obsłudze geodezyjnej budowy konstrukcji żelbetowej Varso pisał GEODETA 2/2021.

• Ciągły rozwój

Powszechność technologii monitoringu geodezyjnego nie oznacza jednak, że zaprzestano prac rozwojowych, szczególnie w zakresie ustalenia wiarygodnych kryteriów doboru instrumentarium, a także tworzenia systemów alertowych odpowiadających specyfice badanych obiektów. Wręcz przeciwnie – w wielu instytucjach na świecie, nie wspominając o centrach rozwojowych producentów urządzeń pomiarowych, prace te wręcz zintensyfikowano.

W nurt badań nad geodezyjnymi systemami monitoringu deformacji (*geodetic monitoring systems*, GMS), które funkcjonują w sposób komplementarny do powszechnie znanych systemów SHM (*structural health monitoring*), aktywnie włącza się Zakład Geodezji i Nawigacji WAT. Rozwój tej tematyki realizowany jest głównie w zakresie bezpieczeństwa infrastruktury. W tym celu testowane są rozmaite rozwiązania bazujące na instrumentach różnych producentów. W dalszej części artykułu omówimy wstępne wyniki uzyskane w efekcie implementacji kompleksowego systemu Leica Geosystems.

• Zaczynamy od testów

Zgodnie z definicją monitoringu sformułowaną przez prof. Piotra Witakowskiego z Instytutu Techniki Budowlanej, jednym z głównych i koniecznych modułów jest odpowiednio dobrany i dosto-

sowany do rozpoznanych warunków zestaw instrumentów pomiarowych. Do naszych celów wykorzystaliśmy wysokiej klasy zrobotyzowany tachimetr elektroniczny Leica TM30 sterowany z poziomu komputera przenośnego przez specjalistyczne oprogramowanie Leica GeoMoS.

Przed przystąpieniem do pomiarów rzeczywistego obiektu zdecydowaliśmy się na przeprowadzenie kwalifikującej walidacji metrologicznej. Eksperyment pomiarowy na terenie kampusu Wojskowej Akademii Technicznej (plac apelowy) miał potwierdzić rzeczywistą precyzję wybranego instrumentu (stanowiącego zasób Laboratorium Geodezji Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT), ocenić jego funkcjonalność, a także sprawdzić sposób przetwarzania danych przez system informatyczny.

Polegał on na pomiarze pryzmatów niemieckiej firmy Goecke (10 punktów kontrolowanych oraz 2 punktów kontrolnych), rozmieszczonych w taki sposób, aby celowe reprezentowały różne odległości oraz położenie geometryczne względem przyjętego lokalnego układu odniesienia. Punkty kontrolowane przytwierdziłmy za pomocą magnesów neodymowych do różnych metalowych elementów infrastruktury placu apelowego, takich jak maszty flagowe, latarnie czy elementy bram. W trakcie realizacji testu trzykrotnie zmieniliśmy ich położenie, symulując w ten sposób wystąpienie przemieszczeń (rys. 1). Aby móc dokładnie ustalić wartości symulowanych przemieszczeń reflektorów, pod ich magnetycznymi korpusami przykleiliśmy tarcze z podziałem milimetrowym. Punkty kontrolne umieściliśmy z kolei na stabilnych słupach z wykorzystaniem spodarek, adapterów pomiarowych oraz centrowania wymuszonego.

• Wyniki eksperymentu

Wstępną walidację systemu wykonaliśmy, wizu-



Punkty pomiarowe na Kolejowym Moście Gdańskim w Warszawie

alizując otrzymane wyniki w postaci wykresów – zarówno w oprogramowaniu GeoMoS, jak i w postprocessingu. Przedstawiają one zmiany położenia badanych punktów podczas symulacji względem średniego położenia. Analizowane obserwacje poddaliśmy następnie testowi normalności wielowymiarowej w celu potwierdzenia, czy wielowymiarowy rozkład normalny został w tym przypadku zachowany. Jeżeli wartości złożone z wielu zmiennych (np. wypadkowe pomierzonych przemieszczeń 3D) zachowują rozkład normalny, to

również pojedyncze zmienne będące ich składowymi charakteryzują się takim rozkładem. Badanie to kwalifikuje instrumentarium do określonego typu zadań.

Po wykonaniu wspomnianych analiz statystycznych mogliśmy przystąpić do właściwego określenia precyzji – tzw. rozdzielczości badanego instrumentu. W wynikach obserwacji oraz na wykresach zaobserwowaliśmy wpływy automatycznego rozpoznawania celu w trybie ATR, a także niewielkich błędów: instrumentalnych, wynikających z warunków pogodowych czy osobowych.

Składają się one na niepewność pomiarową, która jest głównym parametrem określającym wynik walidacji testowanego urządzenia.

Oczywiście należy pamiętać też o wiarygodności samego pomiaru, którą charakteryzuje się odpowiednim przedziałem ufności. W specyfikacjach technicznych producenci instrumentów podają na ogół wartości możliwych błędów pomiarowych na poziomie tzw. 1σ – czyli zgodnie z rozkładem Gaussa 67% obserwacji znajdzie się w przedziale pojedynczego odchylenia standardowego od średniej. W zadaniach

metrologicznych jest to zdecydowanie za mało. Dlatego podczas metrologicznej oceny (walidacji) urządzeń pomiarowych zwykle zakłada się akceptowalną niepewność pomiarową na poziomie 99,7% (3σ).

W naszym przypadku (test wykonywano w warunkach zewnętrznych z przeznaczeniem również do takich zastosowań) przyjęliśmy poziom pozytywnej walidacji urządzenia 2σ , czyli 95%. Warunek ten udało się spełnić, a zatem wszystkie symulowane przemieszczenia wykryte zostały z prawdopodobieństwem 95%.



Zgodnie z rozporządzeniem w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowie obiekty inżynierskie i ich usytuowanie do obiektów poddawanych obowiązkowym badaniom należą m.in. mosty, tunele, przepusty i konstrukcje oporowe. W naszych badaniach zdecydowaliśmy się na most. Na tego typu obiekty regularnie oddziałują znaczne obciążenia, które mogą nieść ze sobą różne negatywne dla konstrukcji skutki. Jeżeli nie zostaną one w porę wykryte, obiekt może ulec uszkodzeniu, a nawet zniszczeniu. Nabiera to szczególnego znaczenia w aspekcie obronności oraz zapewnienia bezpieczeństwa infrastruktury technicznej kraju.

Same obciążenia dzieli się na statyczne oraz dynamiczne. Skutki ich oddziaływania na geometrię konstrukcji mogą być poddawane zarówno inwentaryzacji (pomiar kontrolny), jak i ciągłemu monitorowaniu. Każdy pomiar realizowany podczas monitoringu metrologicznego odnosi się do wcześniej określonego stanu wyjściowego, czyli pewnego „wzorca” – nazywanego także „epoką zerową”. Wszelkie rozbieżności pomiędzy stanem wyjściowym a pomiarem bieżącym traktuje się jako potencjalne nieprawidłowości. W celu właściwego wykrywania i szacowania stanu zagrożenia, jaki wywołują, ustala się też próg graniczny, którego przekroczenie uruchamia podsystem ostrzegawczy. System monitoringu jest w stanie wygenerować odpowiedni komunikat bądź alert natychmiast po analizie wyników obserwacji (w czasie rzeczywistym – bądź wyrażając się bardziej precyzyjnie – quasi-rzeczywistym).

● Pomiar w Warszawie

Mobilny system monitoringu przetestowaliśmy na Kolejowym Moście Gdańskim w Warszawie. Na wybór obiektu wpływ miała specyfika konstrukcji oraz dostępność infrastruktury pomiarowej.

W latach 2015-2018 prowadzone były tam pomiary w ramach projektu NCBiR „Moduł pomiaru i oceny odpowiedzi dynamicznej eksploatowanych kolejowych konstrukcji mostowych MODO” i zachowała się sieć kontrolno-pomiarowa złożona z precyzyjnych pryzmatów do monitoringu metrologicznego oraz geodezyjnych folii odbaskowych.

Kolejowy Most Gdański w Warszawie jest obiektem o długości 504,70 m przekraczającym rzekę Wisłę na 425,55 km. Składa się z dwóch konstrukcji stalowych opartych na wspólnych podporach i posiada dwa niezależne tory o szerokości 1435 mm. Most to w sumie 9 swobodnie podpartych przęseł stalowych posadowionych na przyczółkach i podporach kamiennych. Krótsze skrajne przęsła wykonane są w formie przęseł blachownicowych, natomiast długie to kratownice o różnej konstrukcji pod każdym z dwóch torów. Obiekt jest częścią obwodnicy miasta dla pociągów towarowych, w sytuacjach wyjątkowych pełni również funkcję objazdu linii kolejowej nr 2 na trasie Warszawa Centralna – Terespol.

● Analiza danych

Test monitoringu zrealizowaliśmy w konwencji stanowiska swobodnego. Z uwagi na to, że badane punkty były stabilizowane specjalnymi pryzmatami (reflektory do monitoringu Leica GPR112) oraz foliami odbaskowymi, podczas programowania monitoringu wybraliśmy dwa tryby pomiaru: ATR (automatyczne rozpoznawanie celu dla pryzmatów) oraz ciągły tryb obserwacji zmian odległości (dla folii). Za kontrolne przyjęliśmy punkty zlokalizowane na przyczółkach mostu. Prowadzony monitoring deformacji konstrukcji postanowiliśmy zestawzić z czasami przejazdów pociągów. Notowaliśmy więc czasy przemieszczania się składów kolejowych, kiedy konstrukcja poddawana była wynikającym z tego faktu obciążeniami.

Analizując otrzymane wyniki, stwierdziliśmy, że przedział niepewności pomiaru dla pryzmatów w przeważającej mierze wyniósł około ± 1 mm. W przypadku kilku punktów wystąpiły większe wartości rozrzutu. Były to przesłanki do tego, aby podczas właściwej analizy zwrócić większą uwagę na te punkty i zastanowić się, co mogło być tego przyczyną. Przedziały niepewności pomiaru dla obserwacji na tarcze odbaskowe były znacznie większe: od ± 1 mm do $\pm 3,5$ mm. Podobnie jak w przypadku walidacji na terenie kampusu WAT, analizowane obserwacje poddaliśmy również testowi normalności wielowymiarowej.

Na wykresach dla pewnych punktów można zaobserwować charakterystyczne odstępstwa. Jeden z nich (rys. 2) już podczas wstępnej analizy charakteryzował się wyjątkowo dużą wartością rozrzutu obserwacji dla przemieszczenia podłużnego oraz pionowego. Tak jak wspomnieliśmy, należy dokładnie sprawdzić badany punkt, aby stwierdzić, co jest tego przyczyną. W tym celu nie należy jednak analizować każdego wykresu z osobna, lecz wszystkie łącznie. Po porównaniu raportu z programu Leica GeoMoS z rozkładem jazdy pociągów stwierdziliśmy, że odstająca obserwacja pokrywa się z odnotowanym przejazdem składu kolejowego. Badany punkt przemieścił się pionowo o wartość około 4 mm, a poziomo około 1 mm.

Dane z pomiarów wykorzystaliśmy też do wyznaczenia przemieszczeń długookresowych. W tym celu odnieśliśmy uzyskane wyniki do tych z lat 2017 i 2018. Stwierdziliśmy, że od 2017 r. konstrukcja zachowuje stabilność, a wykryte wartości przemieszczeń 3D w niewalidycznych miejscach nie przekraczają wartości 6 mm.

● Dla bezpieczeństwa

Uzyskane wyniki pokazują, że system monitoringu speł-

● Czas na obiekt mostowy

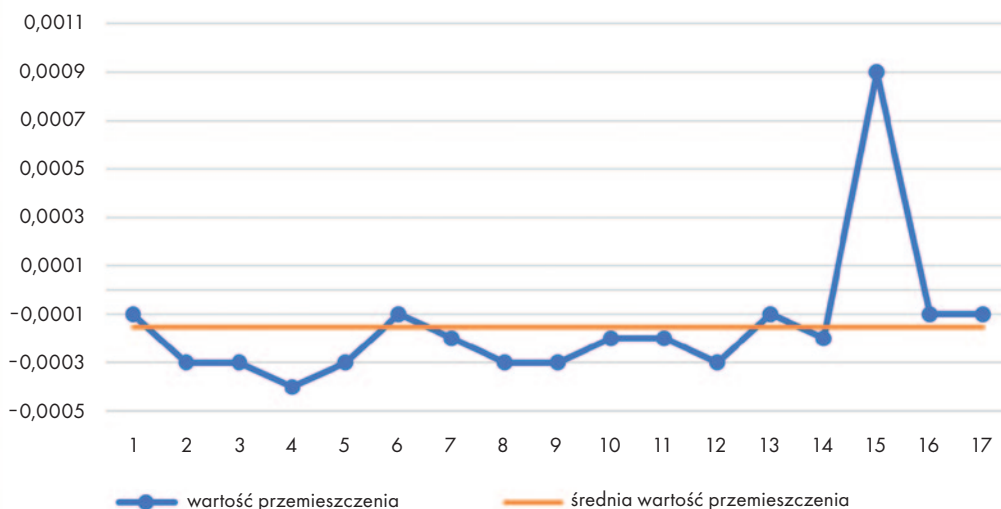
Przygotowując system do praktycznego wykorzystania, przyjęliśmy następujące założenia:

- ma on mieć charakter mobilny (stanowisko swobodne ustawiane w szybki sposób przy nawiązaniu do punktów kontrolnych uznawanych jako odniesienie),

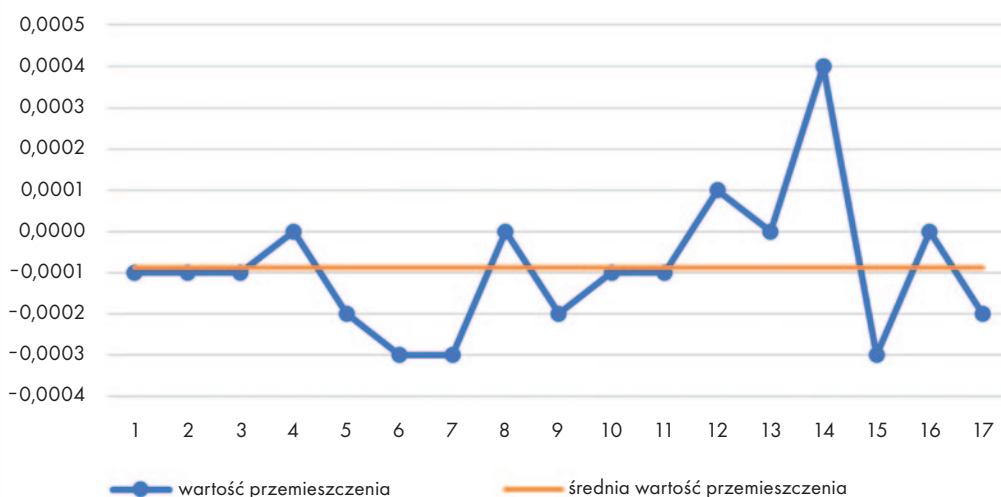
- ma oceniać kinematykę badanej konstrukcji w zależności od przenoszonych obciążeń chwilowych,

- ma posłużyć, w miarę możliwości, do oceny długo-okresowych zmian geometrii badanego obiektu (pomiar przemieszczeń 3D).

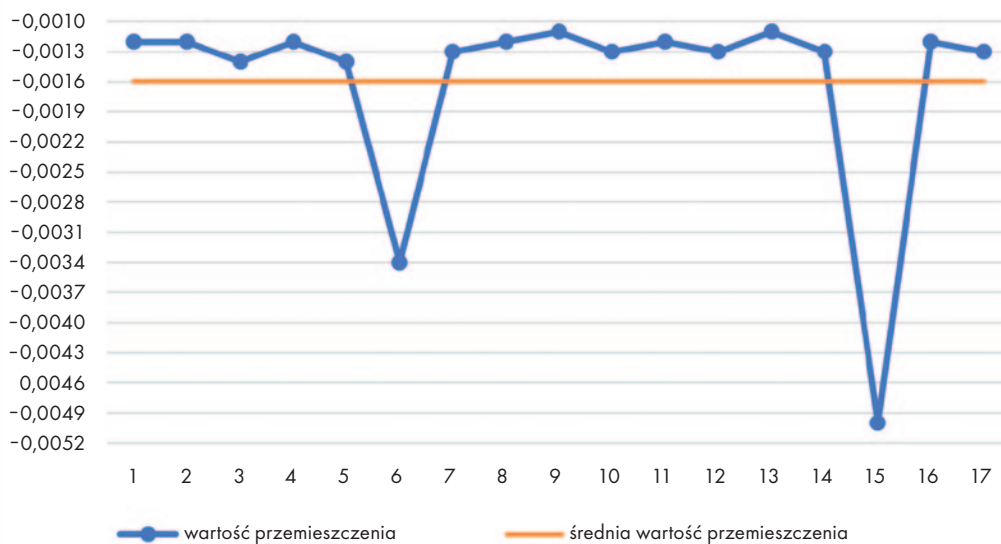
Przemieszczenie podłużne [m] L3N



Przemieszczenie poprzeczne [m] L3N



Przemieszczenie pionowe [m] L3N



Rys. 2. Wykresy z próby monitoringu na Kolejowym Moście Gdańskim. Na ostatnim wykresie doskonale widać, kiedy przez most przejeżdżały pociągi

nia postawione przed nim zadania. Wykazaliśmy, że na kinematykę konstrukcji znacząco wpływa ruch składów kolejowych. Będąc ich skutkiem odkształcenia wracają do stanu wyjściowego, gdy pociąg opuści most, są to więc deformacje sprężyste, w pełni naturalne i akceptowalne.

Wykorzystanie mobilnych systemów monitoringu znajduje zatem zastosowanie w zapewnieniu bezpieczeństwa mostowej infrastruktury technicznej. Pozwala w sposób wiarygodny zarządzać ryzykiem takich obiektów oraz na bieżąco oceniać ich możliwości transportowe. Ponadto dzięki takim rozwiązaniom można również w sposób wiarygodny oceniać długookresowe przemieszczenia konstrukcji, co jest szczególnie istotne w przypadku utrudnionych warunków panujących w otoczeniu takich obiektów, braku miejsca do stabilizacji wielu stanowisk pomiarowych, a także czasu, który można pozyskać na wiarygodne pozyskanie oraz opracowanie wyników pomiaru.

Sierż. pchor. inż. Michał Grudziński
Dr inż. Krzysztof Karsznia
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Zakład Geodezji i Nawigacji

Autorzy dziękują dr. hab. inż. Ireneuszowi Wyczałkowi, prof. Politechniki Poznańskiej, głównemu wykonawcy geodezyjnej części projektu MODO za udostępnienie infrastruktury pomiarowej Kolejowego Mostu Gdańskiego w Warszawie. Powstała praca (autor: sierż. pchor. Michał Grudziński, promotor: dr inż. Krzysztof Karsznia) zgłoszona została do konkursu Rektora WAT na najlepszą pracę dyplomową w roku akademickim 2020/2021.