

Inspekcja obiektów mostowych z użyciem mobilnej aplikacji



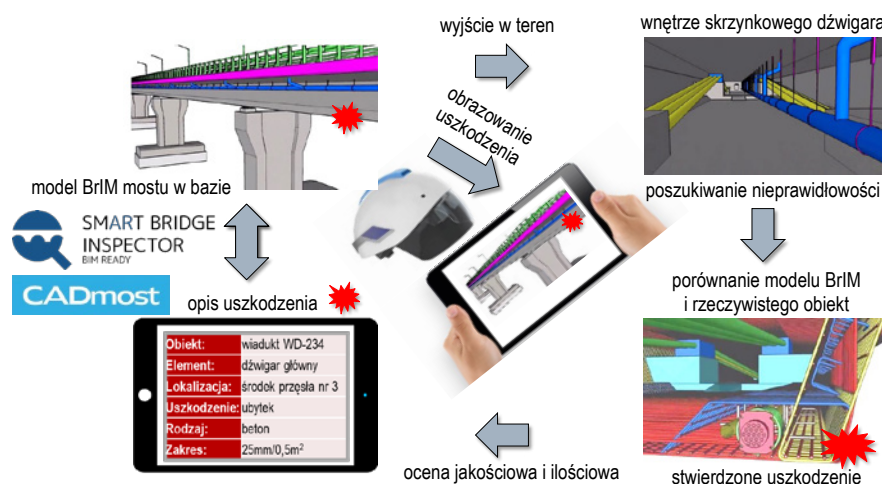
tekst: dr. hab. inż. MAREK SALAMAK, prof. PŚ, Politechnika Śląska, Katedra Mechaniki i Mostów

Cyfryzacja procesu inspekcji mostów wkrótce stanie się koniecznością. Przyczyni się do tego rozwój oraz coraz powszechniejsze wykorzystanie metodyki BIM (*Building Information Modeling*) [1], podobnie jak dzieje się to w przypadku oceny stanu nawierzchni drogowych, gdzie coraz częściej wykorzystuje się mobilne platformy sensoryczne. Umożliwiają one automatyczny pomiar i elektroniczną rejestrację wielu różnorodnych parametrów wskazujących na stan techniczny i nośność nawierzchni drogi. Są to często pojazdy wyposażone w czujniki laserowe, georadary, skanery, kamery wideo itd. Wyniki tych pomiarów przekazywane są już tylko w postaci cyfrowej do systemów zarządzania zasobami (*Infrastructure Asset Management*) i po analizie mogą być w przystępny sposób wizualizowane i wykorzystywane do planowania robót utrzymaniowych.

Oczywiście taki poziom automatyzacji inspekcji mostów długo jeszcze będzie niemożliwy. W odróżnieniu od dróg obiekty mostowe posiadają większą różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Podczas inspekcji oceniana jest dużo większa liczba elementów i parametrów. Znacznie bardziej złożone są również modele degradacji konstrukcji. Wszystko to sprawia, że w przypadku obiektów mostowych wizualne inspekcje wciąż będą traktowane jako konieczne i priorytetowe. Natomiast na pewno jest już możliwe zapisywanie wyników takiej inspekcji w postaci cyfrowej. Z pewnością usprawni to dalsze przetwarzanie tych danych, a w konsekwencji poprawi jakość i skuteczność zarządzania infrastrukturą mostową.

Propozycja polskiej aplikacji mobilnej dla inspektorów mostowych

Gromadzone latami doświadczenia przez zespół inżynierów mostowych firmy CADmost z Gliwic, a zdobywane podczas licznych inspekcji i badań obiektów mostowych, zaowocowały pomysłami, które zostały docenione przez instytucje wspierające rozwój i innowacje. Nie bez znaczenia były również posiadane od dawna kompetencje programistyczne i wiedza z zakresu technik CAD i BIM. Dzięki temu w latach 2017–2019 w spółce CADmost zrealizowano projekt badawczo-rozwojowy *Wykorzystanie technologii BIM oraz poszerzonej rzeczywistości AR w planowaniu i inspekcji obiektów infrastruktury technicznej z użyciem mobilnej aplikacji*

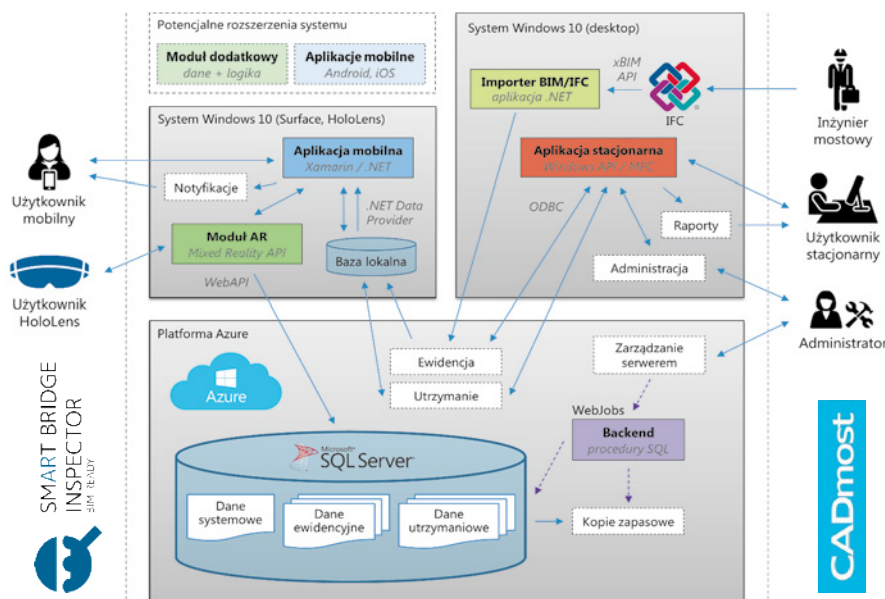


Ryc. 1. Rejestracja stwierdzonego w terenie uszkodzenia w modelu BIM konstrukcji mostu

InfraSmArT-Inspection. Jednym z jego efektów było opracowanie pierwszej w Polsce aplikacji przeznaczonej dla inspektorów mostowych. W podstawowej wersji spełnia ona wszystkie obecne wymagania formalne zarządców infrastruktury mostowej w Polsce, które wymieniono we wprowadzeniu. Natomiast opcje zaawansowane pozwalają wyświetlać na urządzeniach mobilnych modele BIM mostów, a także potrafią wykorzystać dostępną w nich technologię mieszanej rzeczywistości [2]. Aplikacja ta otrzymała niedawno nową nazwę *Smart Bridge Inspector* [3].

Scenariusz pracy inspektora mostowego, który będzie korzystał z takiej aplikacji, zaprezentowano na rycinie 1. Inspektor wyposażony w zaproponowane urządzenia mobilne z technologią AR (w prostszej wersji wystarczy tablet lub smartfon) udaje

się na most w terenie. Tam, wykonując oględziny konstrukcji, poszukuje ewentualnych nieprawidłowości. Porównuje przy tym wyświetlany na urządzeniu model BIM z rzeczywistym obiektem, który ocenia. Ma dzięki temu dostęp do bazy wiedzy na temat tego obiektu wraz z całą historią jego użytkowania i postępującym procesem degradacji. Po stwierdzeniu uszkodzenia dokonuje oceny jakościowej i ilościowej, a następnie archiwizuje powiązane z uszkodzeniem dane wprost w modelu BIM. Na tej podstawie automatycznie tworzony jest multimedialny raport z inspekcji, który razem ze stwierdzonymi uszkodzeniami trafia do bazy administratora obiektu. Od tego momentu opis uszkodzenia przechowywany jest w modelu BIM i może być razem z nim obrazowany również w trakcie kolejnych inspekcji. Oczywiście zawsze istnieje



Ryc. 2. Architektura systemu wspomagającego inspekcję mostów z aplikacją stacjonarną i mobilną

możliwość wygenerowania klasycznego, papierowego raportu z inspekcji, i to nawet w obowiązującej obecnie formie narzuconej przez wytyczne rekomendowane Ministra Infrastruktury WR-M-81 [4] oraz nieco starsze instrukcje obowiązujące na drogach krajowych [5]. Ilość gromadzonych podczas takiej inspekcji danych i tak przewyższa potrzeby tego typu formularzy. Dlatego w przyszłości łatwo będzie można dostosować aplikację do zwiększonych wymagań każdej organizacji odpowiedzialnej za infrastrukturę mostową. Zwłaszcza po upowszechnieniu się metodyki BIM.

System składa się z dwóch części – aplikacji mobilnej i stacjonarnej. Różnią się funkcjonalnością i przeznaczeniem. Wynika to z tego, że zarządzanie planowanymi i wykonanymi inspekcjami będzie łatwiejsze przy użyciu tradycyjnych komputerów. Docelowo takie planowanie i analiza uzyskanych podczas inspekcji wyników musi odbywać się w dużych i wielowątkowych systemach zarządzania mostami. Takimi systemami są np. aplikacje SGM [6] lub

SZOK [7], które dziś wymagają już dostosowania do wymagań metodyki BIM. Systemy te powinny dawać możliwość obsługi na różnych poziomach dostępu głównie za pomocą stacjonarnych komputerów, ale ze wsparciem urządzeń mobilnych i przetwarzaniem chmurowym. W ten sposób baza wiedzy o obiektach mostowych i ich stanie technicznym udostępniana będzie zarówno decydom pracującym na stacjonarnych urządzeniach, jak i inspektorom, którym w terenie łatwiej będzie korzystać z urządzeń mobilnych. Będzie też możliwość integracji z elektronicznymi systemami monitoringu stanu technicznego konstrukcji typu SHM (*Structural Health Monitoring*), które już dziś instalowane są na wielu kluczowych dla ruchu mostach.

W skład takiego systemu wchodzi następujące elementy (ryc. 2):

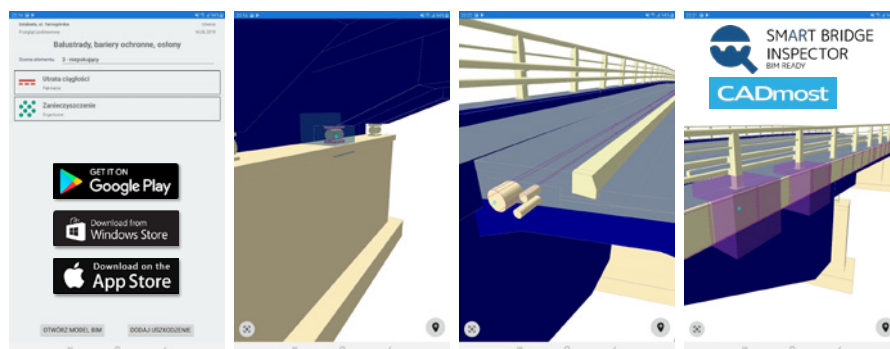
- centralna relacyjna baza danych, w której przechowywane są informacje ewidencyjne oraz utrzymaniowe,
- aplikacja typu desktop (stacjonarna) do wprowadzania i modyfikacji danych ewi-

dencyjnych (w tym dodawania nowych obiektów) oraz do przeglądania i analizy danych utrzymaniowych, generowania raportów; może to być moduł systemu aplikacji wspomagającej zarządzanie mostami typu SGM lub SZOK,

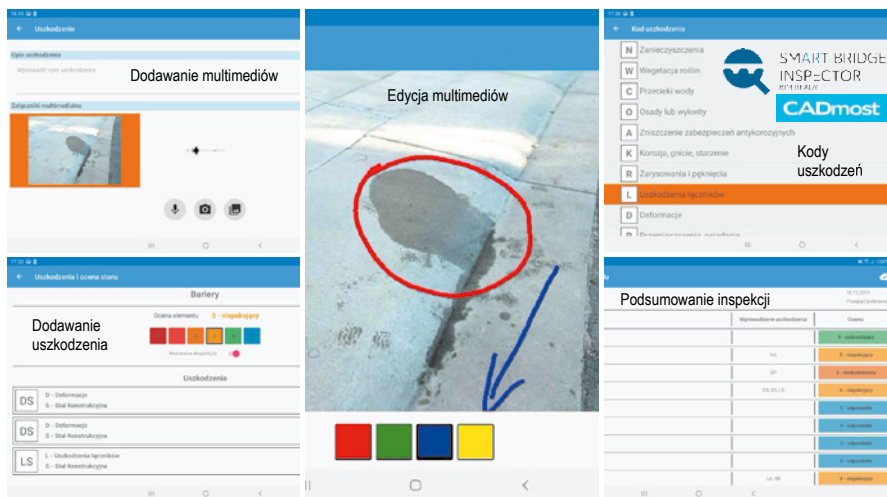
- aplikacja mobilna, przeznaczona do wprowadzania danych podczas pracy w terenie, w szczególności w ramach inspekcji obiektu; posiada też własne narzędzia do edycji danych ewidencyjnych,
- narzędzia wymiany danych ze środowiskiem BIM, w tym importer formatu IFC do bazy danych SQL,
- moduł AR, pozwalający na współpracę z urządzeniami poszerzonej rzeczywistości.

Aplikacja mobilna została przygotowywana na urządzenia przenośne z systemem operacyjnym Windows 10 i Android (ryc. 3). Wkrótce powinna być dostępna również w systemie iOS. Chodzi o notebooki, tablety i smartfony, a w szczególności takie urządzenia, jak Microsoft Surface, Samsung Tab i Google Pixel, które posiadają wystarczająco mocne wsparcie sprzętowe. Duża konkurencja w tym zakresie sprawi, że niebawem na rynku liczba dostępnych urządzeń o zbliżonej funkcjonalności znacznie wzrośnie. Funkcjonalność aplikacji mobilnej jest skoncentrowana na działaniach związanych z inspekcją stanu technicznego mostu w terenie. Celem korzystania z tej aplikacji jest wydajne wprowadzanie danych podczas inspekcji (głównie danych o stwierdzonych uszkodzeniach) wraz z towarzyszącą im dokumentacją multimedialną (fotografie, szkice, komentarze głosowe). Do pełnego korzystania z aplikacji niezbędne jest połączenie sieciowe z serwerem bazy danych, które powinno zapewnić urządzenie bazowe (tablet lub smartfon) przez sieć komórkową LTE lub Wi-Fi. Ponieważ może zdarzyć się sytuacja, w której oceniany obiekt znajduje się poza zasięgiem sieci, to wyniki inspekcji zapisywane są w pamięci operacyjnej urządzenia, a synchronizacja danych uruchamiana jest dopiero po uzyskaniu dostępu i wystarczającej prędkości transmisji.

Na rycinie 4 pokazano różne elementy interfejsu użytkownika, który pracuje z mobilną aplikacją na urządzeniu z systemem operacyjnym Windows 10. Widać m.in. mechanizmy definiowania uszkodzenia, dodawania kodowego opisu i multimedialnych z możliwością ich edycji oraz podsumowanie inspekcji będące podstawą wygenerowania raportu końcowego. Istnieje też możliwość rejestrowania zdjęć



Ryc. 3. Interfejs użytkownika aplikacji mobilnej widziany w smartfonie z systemem Android



Ryc. 4. Elementy interfejsu aplikacji mobilnej widziane w tablecie z systemem Windows 10

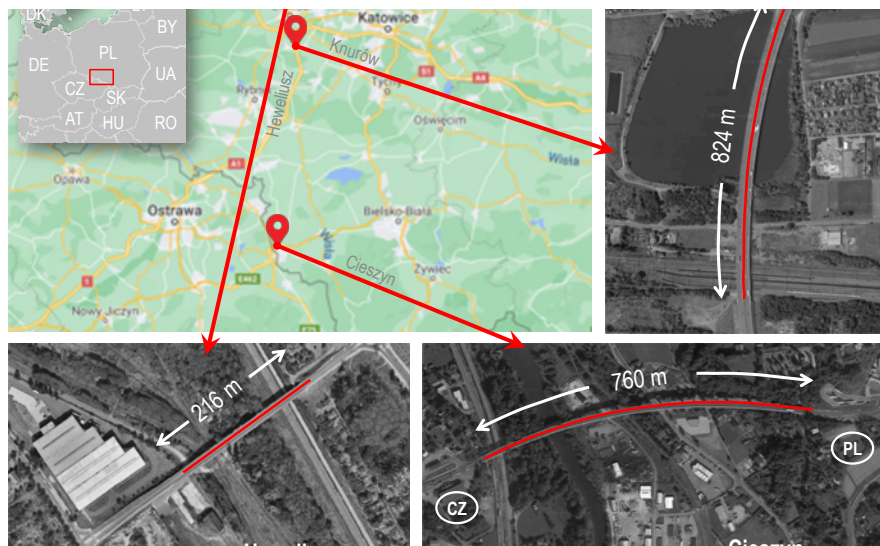


Ryc. 5. Skrzynka inspektora mostowego z urządzeniem bazowym i dodatkowym wyposażeniem

uszkodzeń i ich edycji ze szkicowaniem na ekranie urządzenia.

Jednak opracowany w ramach projektu prototyp to nie tylko sama aplikacja mobilna. To właściwie skrzynka narzędziowa inspektora mostowego, która może być dowolnie konfigurowana (ryc. 5). Podstawą oczywiście jest urządzenie bazowe z tabletem w etui ochronnym, paskiem i wy-

godnym uchwytem. Dzięki temu jest ono zabezpieczone przed złymi warunkami terenowymi (wilgoć, deszcz, pył, uderzenia, upadek). Oprócz tego skrzynka może również zawierać kamerę endoskopową, kamerę 360° oraz smartsondy, które mogą łączyć się z tabletem bezprzewodowo. Tu akurat zastosowano pirometr i czujnik temperaturowo-wilgotnościowy.



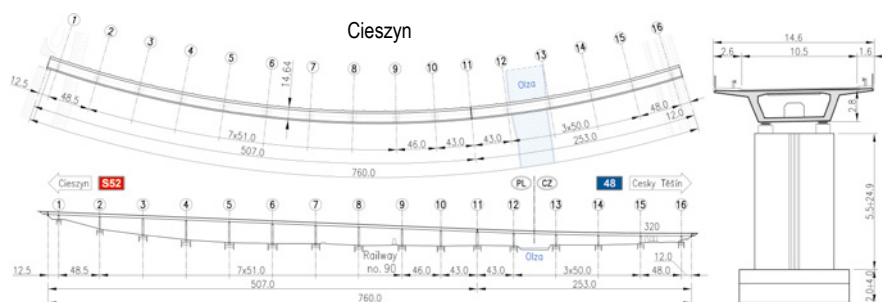
Ryc. 6. Mosty polygonowe do testowania aplikacji podczas inspekcji

Testowanie aplikacji na obiektach w terenie

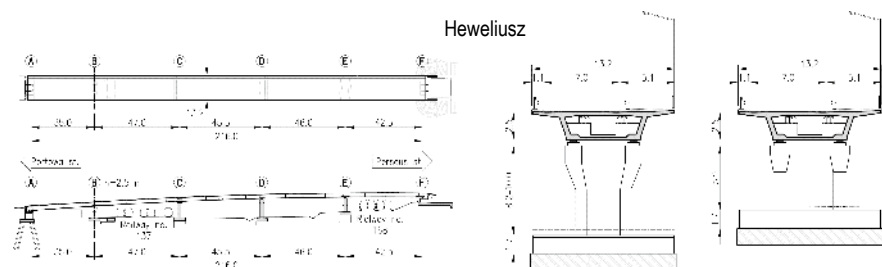
Opisana aplikacja została sprawdzona podczas testów na kilku obiektach mostowych. Przy typowaniu kierowano się przede wszystkim kryteriami związanymi z ich geometrią, rozmiarem i złożonością. Poszukiwane były obiekty, które można potraktować jako reprezentatywne dla klasy średnich, a nawet dużych drogowych obiektów mostowych, które jednocześnie pełnią ważne funkcje w sieci drogowych połączeń miejskich, krajowych lub nawet międzynarodowych. Ich inspekcje są często czasochłonne i mogą być utrudnione ze względu na dostęp do niewłaściwych elementów konstrukcji i wyposażenia. Nie chodziło też wcale o obiekty charakterystyczne typu *landmark* czy o nietypowej konstrukcji (np. podwieszane albo łukowe). Takie przypadki mogłyby na tym etapie zbytnio rozpraszać pracę zespołu przy rozwiązywaniu drugorzędnych problemów, wynikających np. ze zbyt trudnej geometrii, złożonego systemu konstrukcyjnego lub pracochłonnego modelowania albo zagrożeń podczas inspekcji. Nie bez znaczenia była również sama lokalizacja obiektu. Chodziło o to, by znajdował się on jak najbliżej siedziby autorów, tak aby można było częściej i łatwiej prowadzić eksperymenty oraz testować różne scenariusze inspekcji.

Na tym pierwszym etapie prac wytypowano więc trzy obiekty i oznaczone je roboczo: Cieszyń, Heweliusz i Knurów. Nazwy te wynikają przede wszystkim z lokalizacji każdego obiektu pokazanej na poglądowej mapie na rycinie 6.

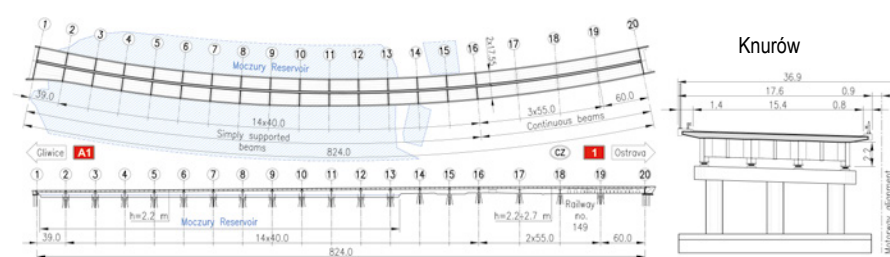
Na początek most graniczny w Cieszyń (ryc. 7). Jest to drugi w Polsce most zbudowany w technologii nasuwania podłużnego. Został zaprojektowany jeszcze w latach 80. XX w. i był wtedy traktowany jako obiekt prototypowy. Znajduje się w nim wiele bardzo trudno dostępnych podczas inspekcji elementów konstrukcyjnych. Są tu jedne z najwyższych w Polsce filarów (ok. 25 m nad terenem). Również skrzynkowy dźwigar o długości 760 m położony jest bardzo wysoko (lokalnie nawet 30 m nad terenem). Wszystko to przy dodatkowym ograniczeniu korzystania z przestrzeni pod mostem powoduje duże utrudnienia podczas inspekcji. A znajduje się pod nim głęboka rzeka, rozległa dolina, mocno eksploatowana linia kolejowa i ruchliwe ulice polskiego i czeskiego Cieszyńska. Rzetelna inspekcja mostu jest więc sporym wyzwaniem i potrzebne jest zaangażowanie większych niż w innych obiektach zasobów ludzkich i sprzętowych.



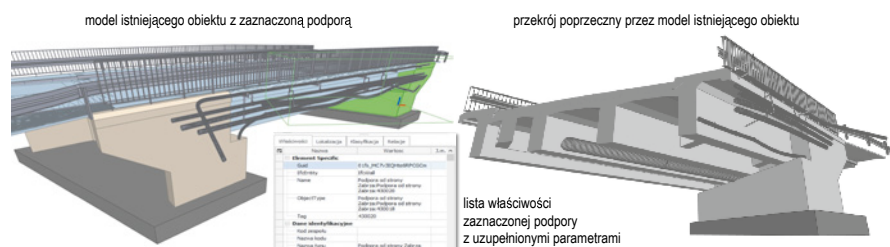
Ryc. 7. Most graniczny w Cieszynie



Ryc. 8. Estakada Heweliusza w Gliwicach



Ryc. 9. Most w Knurowie w ciągu autostrady A1



Ryc. 10. Model BIM mostu na Kłodnicy w Gliwicach

spekcji i znacznie podnosi koszty utrzymania. Dodatkowo występujące w tym rejonie wpływy eksploatacji górniczej wymuszają stały monitoring zmian geometrii konstrukcji i dojazdów do mostu.

Oprócz tych trzech dużych obiektów zdecydowano się jeszcze ująć w badaniach niewielki miejski most na Kłodnicy w Gliwicach, który ze względu na duży stopień degradacji został niedawno przeznaczony do rozbiórki. Z powodu swoich licznych i bardzo zróżnicowanych uszkodzeń stanowił świetny poligon doświadczalny do testowania nowych narzędzi wspomagających proces inwentaryzacji technikami rekonstrukcji 3D i modelowaniem BIM (ryc. 10), oczywiście głównie w zakresie oceny aktualnego stanu technicznego, ale też na potrzeby projektu rozbiórki i budowy nowego mostu.

Zasadniczą zaletą nowego podejścia do inspekcji mostów było używanie tylko jednego urządzenia (tabletu lub smartfona), które służyło do multimedialnej rejestracji i opisu uszkodzeń (ryc. 11). Tablet jest zabezpieczony profesjonalnym etui i przez to jest odporny na niekorzystne warunki terenowe. Ma też pasek i wygodne uchwyty oraz elektroniczny pisak. Podczas inspekcji stosowano nie tylko wbudowaną w tablet kamerę (ryc. 12), ale również możliwość szkicowania na fotografiach, a nawet rejestrację głosu (potem mógł być automatycznie zamieniany na tekst pisany). Użyto również kamery endoskopowej, która może być podłączona do tabletu bezprzewodowo z użyciem protokołu Wi-Fi lub Bluetooth (ryc. 13).

Na estakadzie Heweliusza w Gliwicach sprawdzano takie elementy scenariusza pracy inspektora, jak działanie modułów podstawowych aplikacji, użycie kamery sferycznej, rejestrowanie przez aplikację multimedialnych (notatki głosowe, zdjęcia, szkice), działanie czujników w terenie (smartsondy) i współpracę z urządzeniami bazowymi.

Na moście granicznym w Cieszynie wykorzystane zostały drony i technika fotogrametryczna do utworzenia chmury punktów oraz budowy wirtualnego modelu wysokich filarów. Te same obrazy wykorzystano następnie do identyfikacji uszkodzeń, a dokładniej rys i pęknięć na powierzchni betonowego filara. Po ich zidentyfikowaniu i zmierzeniu utworzony został wektorowy model tego uszkodzenia, który na koniec przeniesiono do modelu BIM całego filara.

W przypadku mostu w Knurowie mobilna aplikacja usprawniła pracę inspektorów

Drugim obiektem jest estakada Heweliusza nad torami kolejowymi w Gliwicach. Jest to pięcioprzęsłowy wiadukt o długości całkowitej 216 m (ryc. 8). Zbudowany został również w technologii nasuwania podłużnego. W przekroju poprzecznym jest to betonowa skrzynka z zewnętrznym sprężeniem. Obiekt ten jest najkrótszym spośród omawianych tu trzech konstrukcji, ale też znajduje się najbliżej siedziby autorów. Ponieważ ma podobny przekrój dźwigara jak opisany wcześniej most w Cieszynie, to częściej można będzie wykonywać na nim eksperymenty charakterystyczne dla często budowanych w tej technologii mostów z dźwigarami skrzynkowymi.

Trzeci most to długa na ponad 800 m estakada w Knurowie w ciągu autostrady A1 (ryc. 9), położona niedaleko polsko-czeskiej granicy. Przebiega nad zbiornikiem wodnym, drogą wojewódzką i wielotorową stacją kolejową. Jednak co najistotniejsze, znajduje się na terenach podlegających wpływom eksploatacji górniczej. Skutkowało to podziałem konstrukcji na część z 15 przęslami swobodnie podpartymi i część z czterema przęslami w układzie ciągłym. To spowodowało, że estakada wyposażona jest aż w 160 łożysk mostowych i 34 duże, wielomodułowe urządzenia dylatacyjne, które generują uciążliwy dla otoczenia hałas. Dostęp do nich jest bardzo trudny. Sprawia poważne problemy podczas in-



Ryc. 11. Edycja zdjęcia uszkodzenia z adnotacjami w tablecie w terenie



Ryc. 12. Wykorzystanie kamery wbudowanej w tablet i modułu poszerzonej rzeczywistości



Ryc. 13. Praca z kamerą endoskopową połączoną bezprzewodowo z tabletem

przede wszystkim przez możliwość gromadzenia i porządkowania fotografii wraz z opisem uszkodzeń 160 łożysk, przypisując je automatycznie do określonego łożyska i kolejnej podpory. Znacznie skróciło to sam proces inspekcji, ale też późniejszego generowania raportu.

Podsumowanie

Artykuł opisuje testy z użyciem prototypu urządzenia mobilnego do wspomaganie inspekcji obiektów mostowych w terenie. Podstawą tego urządzenia jest aplikacja mobilna działająca w ogólnodostępnych tabletach lub smartfonach. W przypadku, gdy tablety te posiadają możliwość użycia technik poszerzonej rzeczywistości, to funkcjonalność aplikacji wzbogacona jest o wyświetlanie przygotowanego wcześniej

modelu BIM obiektu mostowego, który akurat podlega inspekcji. Na potrzeby opisanych tu testów wytypowano grupę obiektów mostowych, które były wykorzystywane jako poligony doświadczalne. W pierwszym etapie dla wskazanych i istniejących już obiektów opracowano modele BIM. Proces modelowania wykorzystywał scenariusz odtwarzania archiwalnej dokumentacji papierowej lub techniki rekonstrukcji 3D (skanowanie laserowe i fotogrametria). Drugi etap to liczne eksperymenty pokazujące skuteczność pracy i zalety wynikające z wyposażenia inspektora mostowego w mobilną aplikację *Smart Bridge Inspector*. Po przerwie spowodowanej pandemią aplikacja została zaktualizowana, aby w zakresie formalnym była zgodna z najnowszymi wymaganiami inspekcji obiektów mostowych w Polsce.

Przeszła też do fazy komercjalizacji, w której uzupełniona będzie m.in. o narzędzia do obsługi kont użytkowników.

Należy podkreślić, że do skutecznego wdrożenia metodyki BIM i cyfryzacji procesów zarządzania infrastrukturą mostową potrzebna jest gruntowna zmiana kluczowych przepisów. W przypadku infrastruktury drogowej chodzi przede wszystkim o rozporządzenie [8]. Tylko wtedy będzie możliwe odejście od tradycyjnych książek obiektów mostowych i papierowych protokołów z przeglądów, które zapychają pękające w szwach archiwa. Zamiast tego będziemy mogli zacząć budować modele informacyjne zawierające dane już tylko w formie cyfrowej. Dzięki temu dane te będą mogły być łatwiej gromadzone, przechowywane, przetwarzane i udostępniane.

Artykuł bazuje na wynikach badań przeprowadzonych w ramach projektu *Wykorzystanie technologii BIM oraz poszerzonej rzeczywistości AR w planowaniu i inspekcji obiektów infrastruktury technicznej z użyciem mobilnej aplikacji InfraSmArT-Inspection* (UDA-RPSL.01.02.00-24-0667/16-00).

Literatura

- [1] Salamak M.: *BIM w cyklu życia mostów*. PWN. Warszawa 2020.
- [2] Salamak M., Januszka M., Płaszczyk T.: *Cyfrowe technologie w zarządzaniu mostami*. „Builder” 2019, nr 1, s. 94–98.
- [3] Płaszczyk T., Salamak M.: *Proces inspekcji mostu z użyciem metodyki BIM*. „Mosty” 2020, nr 1, s. 46–49.
- [4] WR-M-81 *Wytyczne oceny stanu technicznego drogowych obiektów inżynierskich*. Ministerstwo Infrastruktury. Warszawa 2022.
- [5] *Instrukcje przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich*. Wyd. 3. GDDKiA. Warszawa 2020.
- [6] Bień J.: *Uszkodzenia, diagnostyka obiektów mostowych*. WKŁ. Warszawa 2010.
- [7] Bień J., Rawa P., Bień B.: *Komputerowe wspomaganie zarządzania autostradowymi obiektami mostowymi*. „Inżynieria i Budownictwo” 2001, nr 11, s. 669–672.
- [8] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 r. w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych, obiektów mostowych, tuneli, przepustów i promów oraz rejestru numerów nadanych drogom, obiektom mostowym i tunelom*. Dz.U. 2005, nr 67, poz. 582.

