



MAREK SALAMAK

Politechnika Śląska
marek.salamak@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-3602-0575

Mobilne aplikacje w cyfrowym zarządzaniu zasobami infrastruktury mostowej

Dzięki wciąż trwającemu w Polsce programowi budowy autostrad i dróg ekspresowych oraz modernizacji linii kolejowych, co roku powstaje wiele nowych obiektów mostowych. Sukcesywnie obniża się więc średnia wieku naszych mostów, co poprawia też ich wypadkową ocenę stanu technicznego. Nadrabiamy w ten sposób cywilizacyjne zapóźnienia spowodowane ograniczeniami funkcjonującej przez prawie pół wieku socjalistycznej gospodarki. Wkrótce jednak inwestycje skończą się i wejdziemy w etap, w którym znajduje się już wiele krajów rozwiniętych. Priorytetem staną się wówczas wydatki nie na budowę, a na utrzymanie i wymianę obiektów infrastruktury. Powinniśmy więc dzisiaj projektować i budować nasze mosty w taki sposób, aby koszty późniejszego utrzymania były jak najmniejsze, a ich trwałość była jak największa. Pozwoli to na bezpieczne wydłużenie ich cyklu życia i odsunięcie w czasie ich wymiany. Powinniśmy też wdrożyć sprawne metody zarządzania zasobami infrastruktury, wprowadzając do nich innowacyjne rozwiązania i konsekwentnie egzekwować wypracowane procedury regularnych kontroli i działań utrzymaniowych.

Rozwój metodyki BIM (*Building Information Modeling*) i sukcesywna cyfryzacja branży budowlanej [1] będą musiały podobne zmiany również w systemach zarządzania

infrastrukturą drogową i kolejową wraz z towarzyszącymi im obiektami mostowymi. Aktualny stan praktycznego wykorzystania modeli BIM w inżynierii mostowej jest wciąż jeszcze ograniczony. Na razie obejmuje głównie fazę projektowania (BIM 3D) i ewentualnie budowy – z tworzeniem harmonogramów (BIM 4D) lub kosztorysów (BIM 5D). Użycie modeli BIM do zarządzania i utrzymania mostów (wyższe wymiary BIM 6D i 7D) występuje jedynie w projektach pilotażowych i nadal wymaga badań [2]. Rzadkością jest też integracja modeli BIM z systemami monitoringu stanu technicznego konstrukcji typu SHM (*Structural Health Monitoring*) [3]. Podobnie dziś też jest z systemami zarządzania mostami (BMS, *Bridge Management System*), dla których w przyszłości modele BIM będą zapewne stanowić jeden z filarów działania [4].

Cyfryzacja procesów zarządzania obiektami mostowymi wkrótce stanie się koniecznością. Również w zakresie oceny ich stanu technicznego (rys. 1). Tak dzieje się już w przypadku oceny stanu nawierzchni drogowych, gdzie coraz częściej wykorzystuje się mobilne platformy sensoryczne. Pozwalają one na 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 do systemów zarządzania zasobami już tylko w postaci cyfrowej, a po przetworzeniu, mogą być w przystępny spo-



Rys. 1. Testy użycia cyfrowych technologii w procesach zarządzania obiektami mostowymi (materiały własne)

sób wizualizowane i wykorzystywane do planowania robót utrzymaniowych.

Niestety taki poziom automatyzacji w przypadku obiektów mostowych długo jeszcze nie będzie możliwy. W odróżnieniu od dróg, posiadają one większą różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Podczas inspekcji ocenia się większą liczbę 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. Takie możliwości dają mobilne aplikacje uruchamiane na cyberfizycznych urządzeniach. Z pewnością usprawni to dalsze przetwarzanie agregowanych danych, a w konsekwencji poprawi jakość i skuteczność zarządzania infrastrukturą mostową.

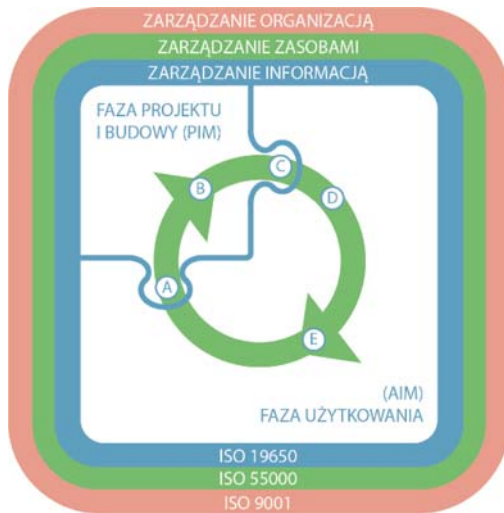
Systemy zarządzania infrastrukturą mostową

Zarządzanie zasobami lub inaczej aktywami (*assets*) jest połączeniem wiedzy na temat finansów, gospodarki, inżynierii i innych praktyk stosowanych w odniesieniu do aktywów fizycznych, a w szczególności samych procesów zarządzania. Przy opisie zarządzania zasobami często stosuje się anglojęzyczne terminy, w których w odniesieniu do infrastruktury drogowej, dominuje pojęcie *Infrastructure Asset Management* (IAM). Celem stosowania podejścia IAM jest zapewnienie najlepszego poziomu usług i redukcji kosztów związanych z faktem wykorzystywania posiadanych przez daną organizację (zarządcę) zasobów.

Z punktu widzenia czasu, IAM obejmuje zarządzanie całym cyklem życia poszczególnych zasobów. Zatem uwzględnia się w tym kolejne i w niektórych przypadkach, powtarzające

się procesy, takie jak projektowanie, budowę, uruchamianie, obsługę, konserwację, naprawę, modyfikację, wymianę czy likwidację zasobów. Eksploatacja i utrzymanie aktywów, przy zwykle ograniczonym budżecie zarządcy, wymaga przyjęcia pewnego mechanizmu ustalania priorytetów na wydatkowanie środków. Zarządzanie zasobami infrastrukturalnymi w XXI wieku stało się bardzo ważną dziedziną w większości rozwiniętych krajów świata. Wynika to z faktu, że sieć różnorodnej infrastruktury w tych krajach (drogi, koleje, energetyka, telekomunikacja itp.) jeszcze w XX wieku została już właściwie w pełni zbudowana. Dlatego obecnie podstawowym zadaniem właścicieli tych sieci jest efektywne zarządzanie nimi. Wykorzystać do tego można standardy zarządzania aktywami, które opisane są w serii norm PN-ISO 55000 [5]. Precyzują one terminologię, wymagania i wskazówki dotyczące wdrażania, utrzymywania i ulepszania skutecznego systemu zarządzania aktywami. I to bez względu na rodzaj tych zasobów, jak i na ich właścicieli.

Dużą nadzieję w rozwoju skutecznych systemów IAM pokłada się obecnie w użyciu metodyki BIM. Wynika to z faktu, że BIM jest obecnie najlepszą metodą zarządzania informacją o budowli, czyli właściwie o każdym wybudowanym składniku aktywów danej organizacji zarządzającej infrastrukturą. A dodatkowo, te informacje mogą być gromadzone i przetwarzane przez cały cykl życia tej budowli. Metodyka BIM nie tylko wspiera tworzenie modeli tych aktywów, ale może również dostarczać dane o ich aktualnej wartości czy stanie technicznym. Ułatwia też wymianę i wizualizację tych informacji przez użycie cyfrowych narzędzi i inteligentnych struktur danych obiektowych. Dzięki temu, zarządca może uniknąć utraty informacji podczas przechodzenia między różnymi etapami cyklu życia (projekt, budowa, odbiory, modernizacje) lub w efekcie przenoszenia obowiązków związanych z zarządzaniem zasobami (przekazanie placu budowy, odbiór obiektu, zmiana zarządcy).



Rys. 2. Relacja pomiędzy standardami opisującymi systemy zarządzania jakością, zasobami i informacją [6] (materiały własne)

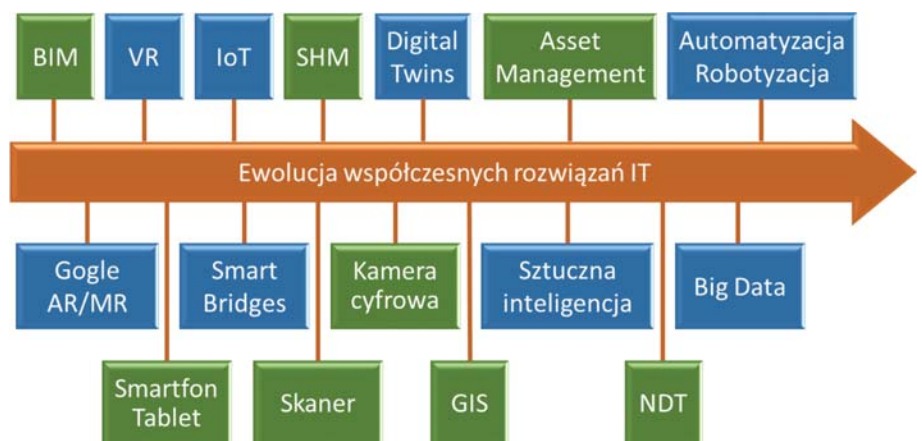
Trzeba jednak uświadomić sobie czym tak naprawdę jest metodyka i modele BIM w odniesieniu do obiektów infrastruktury. W tym przypadku cyfrowe modele BIM wcale nie muszą wyglądać jak wierna, trójwymiarowa kopia autostrady czy mostu. W wielu przypadkach byłoby to wręcz niekorzystne. Warto więc zaznajomić się z zapisami serii norm PN-EN ISO 19650 [6], które precyzują głównie sposób organizacji i cyfryzacji danych o budowlach w ich poszczególnych etapach cyklu życia, a nie wymagania dotyczące samego wyglądu tych modeli. Model BIM autostrady może być uproszczony w swojej reprezentacji graficznej. Ważne jednak, aby zawierał wszystkie potrzebne na danym etapie informacje. Wystarczy więc, że gromadzone w procesie utrzymania dane o stanie technicznym drogi powiązane będą z jej uproszczonym modelem liniowym. Nie trzeba wcale zapychać serwerów zbędnymi danymi opisującymi detale tej drogi. Co wcale nie znaczy, że w przyszłości nie zostaną one w ten sposób uzupełnione.

Niestety obiekt mostowy jest trudniejszym przypadkiem. Tutaj geometria i trójwymiarowy model mogą się już okazać potrzebne. Ale na pewno w odniesieniu do wielu małych mostów wystarczy może nawet model punktowy. Musi on być jednak zaopatrzony w informacje zapisane w sposób cyfrowy i to w odpowiednim standardzie. Tak zresztą funkcjonuje to w wielu współczesnych systemach BMS. Tyle że informacja ta niestety najczęściej jest dziś przechowywana tylko w papierowych archiwach. Dlatego kierunkiem rozwoju narzędzi do zarządzania obiektami mostowymi powinno być powiązanie ze sobą standardów z serii norm PN-ISO 55000 [5] i PN-EN ISO 19650 [6] oraz dobranie do nich adekwatnych informacyjnych modeli mostów z uwzględnieniem ich cyklu życia (rys. 2).

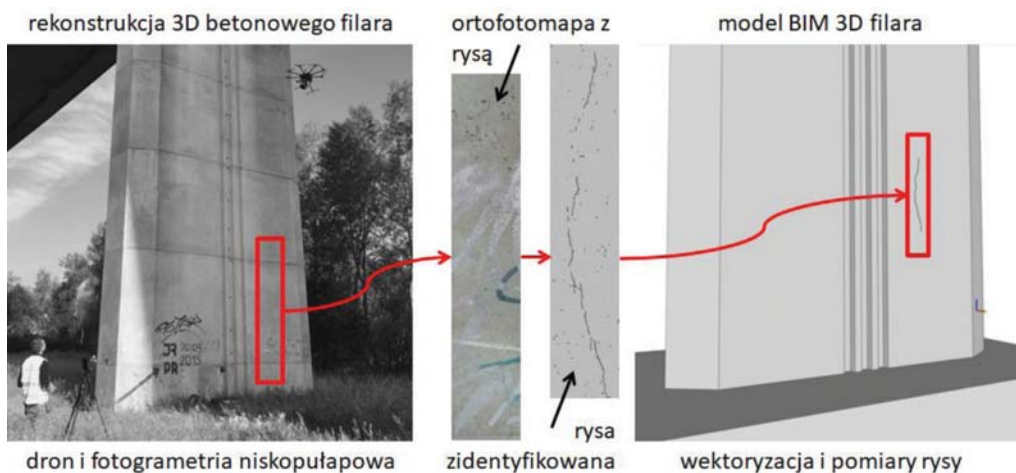
Początki komputerowych systemów wspomagających zarządzanie infrastrukturą mostową typu BMS sięgają przełomu lat 70. i 80. XX wieku. Evolucja tych narzędzi była ściśle powiązana z rozwojem technologii informatycznych IT (*Information Technology*). Były to głównie zmiany w metodach modelowania obiektów mostowych i związanych z nimi procesów zarządzania. Były to również szybko rosnące możliwości sprzętu komputerowego w zakresie gromadzenia i przetwarzania coraz większych ilości danych, ale też sprawności nowych interfejsów wraz z sieciowym rozproszeniem dostępu do informacji oraz miniaturyzacją i mobilnością narzędzi.

W Polsce, ze względu na polityczno-ekonomiczne przemiany, pierwsze instrukcje, procedury i aplikacje zaczęły powstawać z około dziesięcioletnim opóźnieniem. Podkreślić tu należy duże zasługi dwóch ośrodków naukowych. Z jednej strony był to zespół z Politechniki Rzeszowskiej (dzisiaj pod kierunkiem prof. Tomasza Siwowskiego), który odpowiada za utworzenie i rozwój instrukcji przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich [7]. Z drugiej – zespół z Politechniki Wrocławskiej (głównie pod kierunkiem prof. Jana Bienia), który rozwijał pierwsze aplikacje komputerowe wspomagające systemy zarządzania obiektami mostowymi [8]. Obydwa te zespoły wciąż organizują jedyne w Polsce szkolenia inspektorów mostowych zgodnie z programem uzgodnionym w GDDKiA.

Jednym z podstawowych i wręcz pierwotnych elementów wszystkich systemów BMS jest ewidencja obiektów mostowych. Jednak przy tak dużych zasobach, jakimi dysponuje choćby GDDKiA, nie może to już być statyczna baza zawierająca rekordy na wzór spisu inwentarza. Wiele jednostek administracji drogowej w naszym kraju wykorzystuje do tego jedynie papierowe karty katalogowe i książki obiektów. Są one ewentualnie uzupełniane zwykłymi arkuszami kalkulacyjnymi. Niektóre organizacje zdecydowały się na wdrożenie specjalnych aplikacji komputerowych, które wykorzystują już bazy danych, a nawet elementy wspomagające podejmowanie decyzji utrzymaniowych. Przykłady polskich programów, to m.in. SGM 2000, SZOK, SMOK [9]. Niestety rozwój niektórych z tych aplikacji został wiele lat temu zatrzymany i nie odpowiadają one



Rys. 3. Implementacja współczesnych rozwiązań IT w systemach zarządzania infrastrukturą mostową [1] (materiały własne)



Rys. 4. Identyfikacja i wektoryzacja rys na filarach mostu algorytmami uczenia maszynowego (materiały własne)

już w XXI wieku, można dziś nakreślić nowe perspektywy ewolucji systemów BMS i wskazać rozwiązania, które już wkrótce powinny być implementowane. Zielony kolor grafu na rysunku 3, to techniki, które już są wykorzystywane, a niebieski przedstawia te, nad którymi wciąż jeszcze się pracuje, ale są potencjalnie rozwojowe. Pominięto przy tym podział na narzędzia informatyczne i sprzęt komputerowy, gdyż wiele z tych technologii i rozwiązań przenika się wzajemnie, tworząc dziś bardzo specyficzne narzędzia.

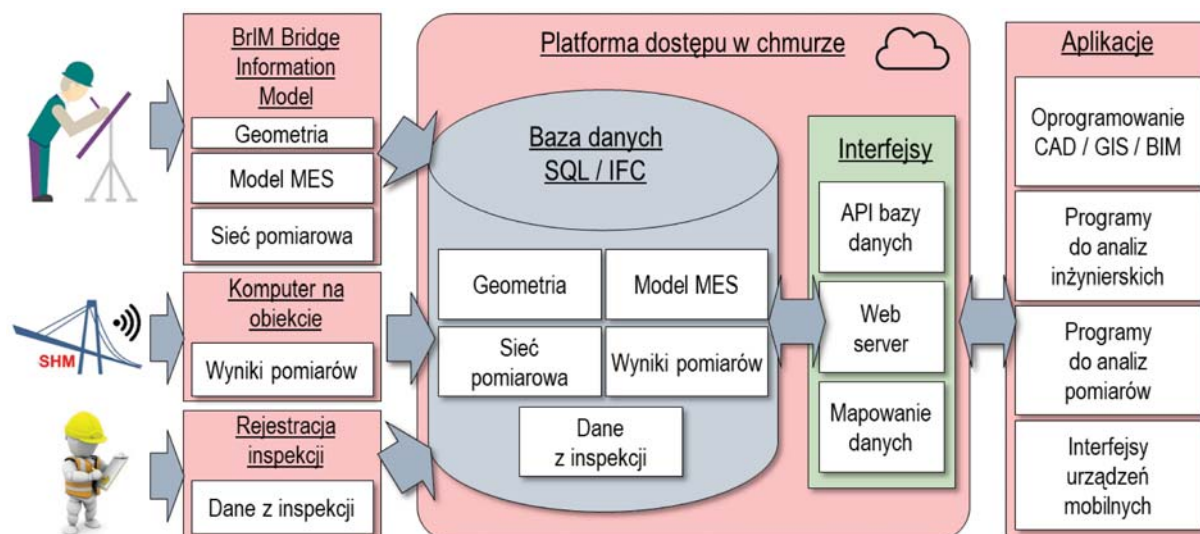
możliwościom, jakie niesie ze sobą szybki rozwój technologii IT.

Wraz z końcem XX wieku prof. J. Bień [9] przedstawił swoje przewidywania dotyczące ewolucji systemów BMS. Wśród wielu aspektów wyróżnił m.in. upowszechnienie relacyjnych baz danych i sukcesywne wypieranie ich przez bardziej efektywne obiektowe bazy danych z dalszym ich przekształcaniem do jeszcze bardziej zaawansowanych baz wiedzy. Dużo pisał, a nawet sam tworzył algorytmy eksperckie do wspomaganie procesu podejmowania decyzji utrzymaniowych z implementacją elementów sztucznej inteligencji i samouczących się algorytmów. Wspominał również o tworzeniu systemów sterujących parametrami konstrukcji mostów z wykorzystaniem wyników rejestrowanych przez elektroniczne układy monitorujące stan techniczny.

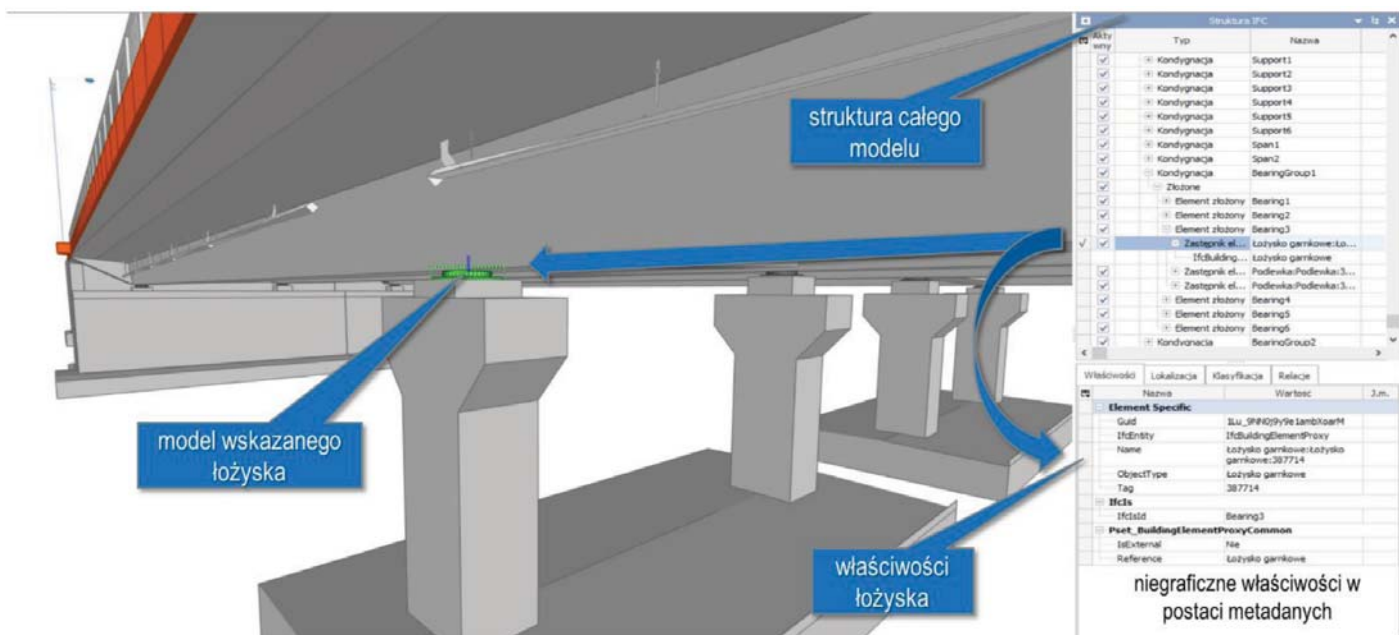
Było to wówczas z pewnością wizjonerskie spojrzenie. Wiele z tych rozwiązań ma już nawet praktyczne zastosowania w systemach BMS na świecie. Głównie w zakresie zmian w sposobie obsługi baz danych czy użycia systemów elektronicznego monitoringu klasy SHM. Biorąc pod uwagę aktualne kierunki rozwoju technologii IT, które pojawiły się

Elementem wspólnym dla niemal wszystkich rozwiązań IT z rysunku 3 jest sztuczna inteligencja, której algorytmy uczenia maszynowego mogą mieć zastosowanie np. w przetwarzaniu obrazów i chmur punktów pozyskiwanych kamerą cyfrową (fotogrametria) lub skanerami laserowymi. Przykład użycia takich algorytmów do wykrywania i wektoryzacji uszkodzeń na filarach mostu granicznego w Cieszynie pokazano na rysunku 4. Z powodzeniem wykorzystuje się je również w obróbce sygnałów cyfrowych rejestrowanych przez sensory systemów SHM czy urządzenia diagnostyczne typu NDT (*Non-Destructive Testing*). Można je też zastosować w analizie dużych zbiorów danych typu Big Data, jakie gromadzone są w procesie zarządzania zasobami IAM.

Jednak najbardziej uniwersalne są przede wszystkim możliwości metodyki BIM, która może integrować większość z opisywanych tu technologii. Cyfrowe modele BIM mogą mieć bardzo szerokie zastosowanie. Mogą stanowić fragment obiektowej bazy wiedzy na temat podlegających zarządzaniu zasobów albo służyć integracji i wizualizacji danych pozyskiwanych podczas rutynowych inspekcji, z użyciem narzędzi NDT lub systemów monitoringu SHM. Mogą one



Rys. 5. Schemat cyberinfrastruktury służącej zarządzaniu obiektami mostowymi (materiały własne)



Rys. 6. Przykład obiektowego modelu BrIM z łożyskiem mostowym z zaznaczonym łożyskiem mostowym [1] (materiały własne)

być wyświetlane i modyfikowane w urządzeniach wirtualnej, poszerzonej i mieszanej rzeczywistości VR/AR/MR (*Virtual / Augmented / Mixed Reality*). Można je też powiązać z numerycznymi modelami terenu DTM (*Digital Terrain Model*) i geograficznymi informacjami GIS (*Geographic Information System*). Wiele z tych urządzeń i technik może zostać zintegrowanych dzięki Internetowi Rzeczy (IoT, *Internet of Things*) tworząc ostatecznie tzw. cyfrowe bliźniaki fizycznych obiektów (*Digital Twins*).

Współczesne, zaawansowane systemy BMS przechowują bardzo dużą ilość danych, do których należą przede wszystkim dane ewidencyjne oraz informacje o aktualnym stanie technicznym każdego z obiektów. Oprócz tego, systemy te są wyposażone w narzędzia umożliwiające modelowanie i wizualizację zagregowanych danych, zadawanie pytań i prowadzenie analiz, a także w moduły wspomagające podejmowanie decyzji. Ze schematu na rysunku 5, który pokazuje przykładową strukturę takiego systemu, widać, że wprowadzane do niego różnorodne dane stanowią podstawę całego procesu decyzyjnego. Są to więc informacje z etapu projektowego i budowy, które umieszczane są w modelach BIM (a właściwie bardziej już BrIM, *Bridge Information Model*). Mogą to też być sygnały z elektronicznych systemów monitoringu typu SHM, a także tradycyjne inspekcje wizualne, które coraz częściej wykonywane są już z użyciem cyberfizycznych urządzeń. Do tego dochodzą jeszcze: rozwiązania chmurowe, przetwarzanie coraz większych zbiorów danych oraz aplikacje i interfejsy do prowadzenia analiz i udostępniania wyników. To wszystko sprawia, że systemy BMS wkrótce staną się bardzo złożonymi systemami cyberinfrastruktury.

Szczególną rolę w tych systemach będzie miała metodyka i związane z nią modele BrIM. Podstawowym jej założeniem jest przecież gromadzenie i zarządzanie informacjami o obiekcie mostowym i to w całym jego cyklu życia. Wyko-

rzystuje się do tego obiektowe narzędzia z grupy IT, które pozwalają na operowanie w wirtualnej rzeczywistości. Nie rysuje się więc kresek i okręgów, umawiając się z innymi, że oznaczają one np. łożysko mostowe (rys. 6). Zamiast tego wykorzystuje się klasę obiektów (rodzinę), która jest wcześniej zdefiniowana właśnie jako łożysko mostowe, wraz z wszystkimi swoimi właściwościami i parametrami. Wszystko co jest modelowane, widoczne jest na strukturze całego modelu razem z właściwościami niegraficznymi, które przechowywane są w postaci metadanych. Nie jest to więc już tylko tradycyjny rysunek, a raczej graficzna baza danych.

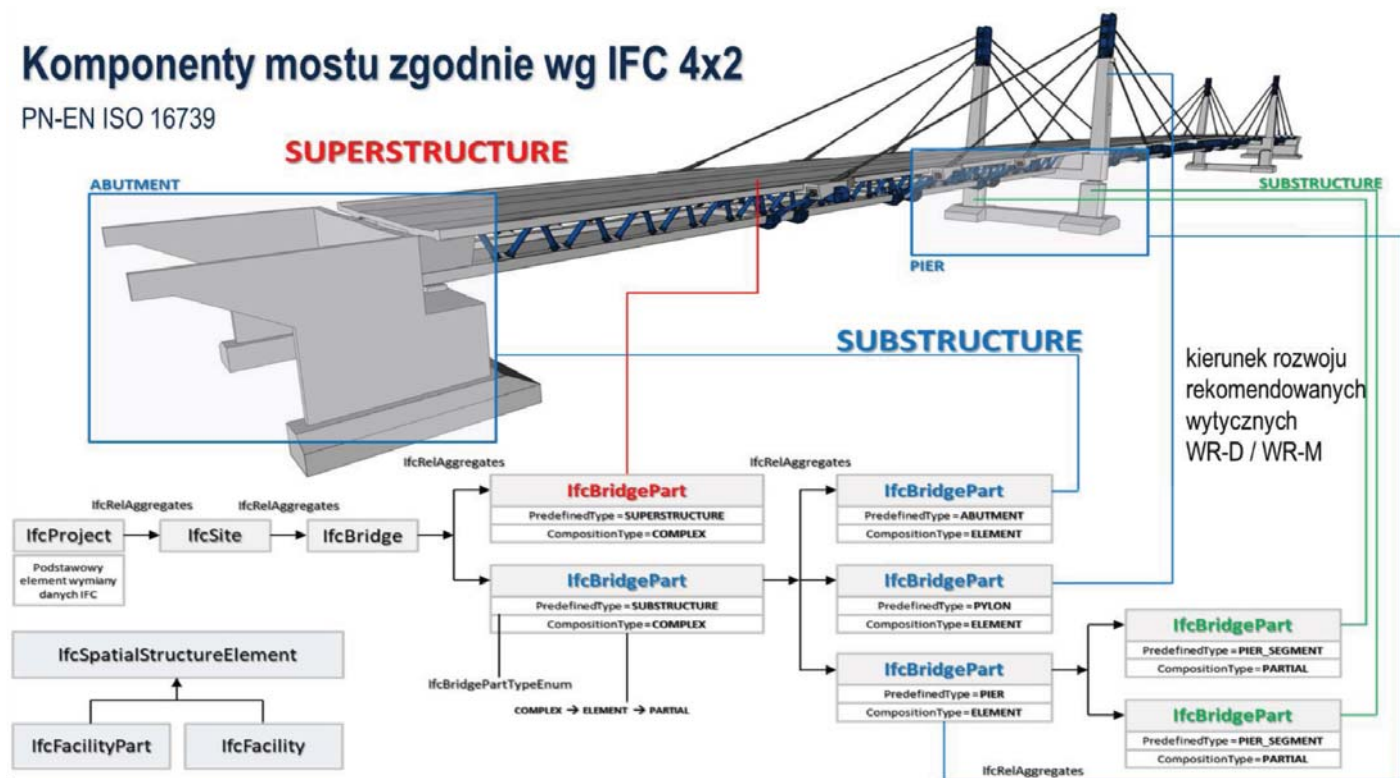
Modele informacyjne i urządzenia cyberfizyczne w inspekcji obiektów mostowych

Ważne jest, aby uświadomić sobie, że metodyka i wirtualne modele BIM nie służą wcale tylko do tworzenia atrakcyjnych trójwymiarowych modeli i wizualizacji nowych mostów czy animacji projektowanych autostrad. Ich wykorzystanie dotyczy raczej dobrze znanych nam procesów gromadzenia, dostępu i przetwarzania informacji podczas realizacji wszelkich inwestycji. A robiono to już przecież od dawna. Przy okazji każdego nowo projektowanego mostu, budowanego tunelu, czy utrzymywanej autostrady. Tyle, że robione to jest w tradycyjny sposób. Zapycha się więc archiwa dokumentami, które są tak trudne w dostępie, że zwykle zagląda się do nich dopiero wtedy, gdy dojdzie do jakiegś awarii.

Trzeba jednak podkreślić, że cyfryzacja tych procesów nie może polegać jedynie na skanowaniu papierowych dokumentów z archiwów do elektronicznych formatów, jak np. PDF. W tym nowym podejściu, jakie oferuje BIM, mamy do

Komponenty mostu zgodnie wg IFC 4x2

PN-EN ISO 16739



Rys. 7. Przykład opisu komponentów mostu w modelu BIM zgodnie ze standardem IFC [1] (materiały własne)

czynienia z tzw. modelami informacyjnymi. Wszystkie dane zapisywane są już tylko w postaci cyfrowej. W ten sposób potem będą mogły być później łatwo przetwarzane i udostępniane. W kolejnych fazach życia budowli modele te są w sposób ciągły zasilane nowymi informacjami. Zaczyna się to już na etapie pierwszych koncepcji i projektu budowlanego, gdy powstaje pierwotny model BIM przyszłej budowli. Potem jest on uszczegółowiany w projekcie wykonawczym lub technologicznym. Po rozpoczęciu robót budowlanych jest uzupełniany przez wykonawcę, podwykonawców i dostawców komponentów. W chwili odbioru końcowego jest przekazywany zamawiającemu lub zarządcy, który zaczyna wykorzystywać go jako narzędzie wspomagające procesy zarządzania zgodnie z podejściem IAM.

Widać więc, że taki model informacyjny może zawierać powiązane z obiektem mostowym, różnorodne informacje z dokumentacji projektowej i wykonawczej, a dotyczące zastosowanych materiałów, historii zrealizowanych procesów, certyfikaty, specyfikacje, instrukcje, gwarancje, wyniki inspekcji stanu technicznego, rejestry zdarzeń, modernizacji, napraw itd. Jednym słowem jest to olbrzymia baza wiedzy o utrzymywanym obiekcie. I to gromadzona przez cały jego cykl życia. Baza, która stanowić będzie podstawę przyszłych systemów BMS. Biorąc pod uwagę liczbę obiektów mostowych, którymi zarządza się w skali kraju, to z pewnością dla efektywnego przetwarzania tych danych zmuszeni będziemy wykorzystywać algorytmy jakie stosuje się w przypadku zbiorów typu Big Data [4].

Do skutecznego wdrożenia metodyki BIM i cyfryzacji branży drogowo-mostowej potrzebna jest gruntowna zmiana kluczowych przepisów. Chodzi przede wszystkim o Rozpo-

ządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 roku w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych oraz obiektów mostowych [10]. Tylko w ten sposób będzie można odejść od tradycyjnych książek obiektów mostowych i protokołów z przeglądów. Takie zalegające w archiwach i zakurzone papierowe dokumenty są mało przydatne. Nie jesteśmy w stanie efektywnie przetwarzać zapisanych tam informacji. Trzeba więc zacząć budować modele informacyjne, które zawierać będą już dane tylko w formie cyfrowej. Punktem wyjścia powinna być zmiana sposobu opisu struktury obiektu mostowego i wszystkich jego komponentów. Tu rozwiązaniem jest standard IFC (*Industry Foundation Class*) [14], który w najnowszej implementacji zawiera już klasy obiektów drogowych i mostowych. Pokazane jest to na przykładzie modelu BIM mostu św. Kingi w Starym Sączu widocznym na rysunku 7. Właśnie w tę stronę powinny być teraz rozwijane wszelkie nowe rozporządzenia, standardy i rekomendowane wytyczne drogowo-mostowe. Tylko w ten sposób zapewni się ich zgodność z metodyką BIM.

Pokazany na rysunku 5 schemat cyberinfrastruktury, w którą z czasem przekształcą się rozwijane dziś systemy BMS, wymaga jednak zastosowania i integracji dedykowanych temu systemów cyberfizycznych (CPS, *Cyber-Physical System*). Są one jednym z wyznaczników obserwowanej obecnie rewolucji przemysłowej, którą określa się hasłem *Przemysł 4.0* są. Należą do nich mechanizmy kontrolowane lub monitorowane przez algorytmy komputerowe, które są ściśle zintegrowane z Internetem i jego użytkownikami (IoT). Komponenty fizyczne i programowe w systemach CPS są ze sobą głęboko splecione i działają w różnych przestrzeniach czasowych i skalach. Przykłady takich systemów obejmują



Rys. 8. Cyberfizyczne urządzenia laboratorium zespołu mostowego Politechniki Śląskiej (materiały własne)

m.in. inteligentną sieć energetyczną, autonomiczne pojazdy, monitoring medyczny, systemy sterowania procesami, systemy robotyki, automatyczną awionikę, a nawet monitoring stanu technicznego typu SHM.

Biorąc pod uwagę specyfikę budownictwa i to, że obszarem działania jest najczęściej niezagospodarowany teren, większe znaczenie w naszej branży będą miały mobilne systemy CPS posiadające zdolność zdalnej lub nawet autonomicznej pracy. Przykłady takich systemów obejmują mobilną robotykę, ale również układy elektroniczne transportowane przez ludzi lub zwierzęta. Wzrost popularności smartfonów znacznie zwiększył zainteresowanie i możliwości wykorzystania mobilnych systemów CPS. Są to oczywiście wszelkie urządzenia typu tablet i smartfon, ale również mogą to być inteligentne zegarki, kaski, okulary, soczewki kontaktowe. Grupa tych urządzeń nosi nazwę *wearable devices*, co sprawia spore trudności w tłumaczeniu na język polski. Najważniejsze wymagania stawiane tego typu urządzeniom to m.in. znaczące zasoby obliczeniowe i zdolności przetwarzania, wiele opcji wejścia i wyjścia sensorycznego (ekrany dotykowe, kamery, moduły GPS, głośniki, mikrofony, żyroskopy, czujniki światła i zbliżeniowe, akcelerometry), różne protokoły komunikacyjne (Wi-Fi, 4G/5G, Bluetooth), języki programowania wysokiego poziomu z łatwo dostępnymi mechanizmami dystrybucji aplikacji, no i oczywiście trwałość, niezawodność oraz wygodne i szybkie podtrzymywanie zasilania.

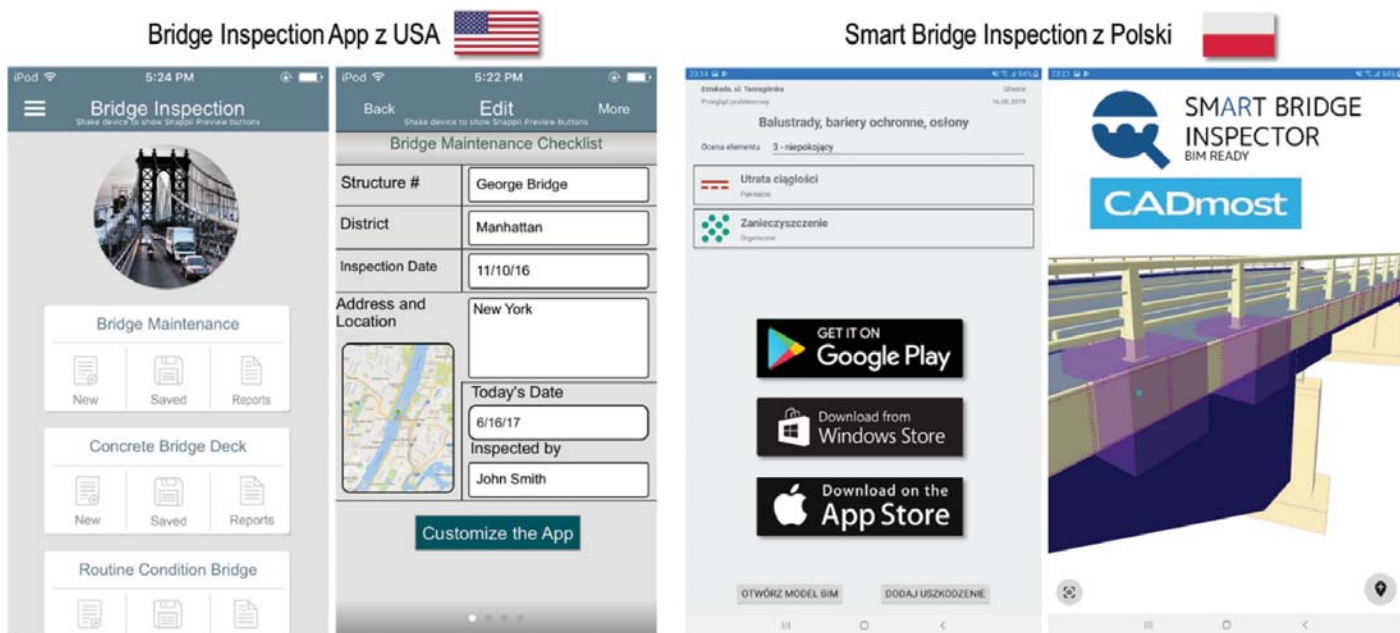
Zespół mostowy Politechniki Śląskiej dysponuje obecnie jednym z najlepiej wyposażonych laboratoriów z zakresu cyfryzacji budownictwa (rys. 8). Są tam urządzenia, które w większości należą do systemów CPS, a wszystkie są zgodne ze standardem IoT. Jest wśród nich profesjonalny dron DJI Matrice 210 RTK, który posiada silną kamerę z zoomem umieszczoną powyżej swojego korpusu. Dzięki temu może być użyty w inspekcji spodu konstrukcji wysoko położonych przęseł mostów. Kask budowlany Trimble XR10 zintegrowany z goglami MS HoloLens 2, który pracuje w trybie mieszanej rzeczywistości. Mieszaną rzeczywistość obsługuje również narzędzie Trimble SiteVision, które dzie-

ki odbiornikowi GNSS pozwala precyzyjnie wizualizować wirtualne obiekty na ekranie smartfona, ale w rzeczywistym otoczeniu. I na koniec wygodny w użyciu skaner laserowy Leica BLK360, mobilny skaner ZEB1 oraz profesjonalny zestaw do fotogrametrii cyfrowej.

Aplikacje mobilne dla inspektorów mostowych

Jednym z najbardziej obiecujących urządzeń CPS są narzędzia operujące w kontinuum świata rzeczywistego i wirtualnego [7]. W przeciwieństwie do lepiej znanej wirtualnej rzeczywistości VR, w której użytkownik jest całkowicie zanurzony w środowisku wirtualnym, rzeczywistość poszerzona AR albo też rzeczywistość mieszana MR, dają swobodę działania w środowisku rzeczywistym przy możliwości wzbogacania percepcji człowieka za pomocą wirtualnych obiektów lub doznań (np. dźwięk, dotyk). Jest to sposób na wizualizację informacji cybernetycznych na tle rzeczywistych obrazów fizycznych i manipulacji cybernetycznymi informacjami poprzez interakcje z obiektami świata rzeczywistego. Mogą one uzupełniać i jednocześnie wykorzystywać modele BIM.

W zasadzie wymagania w zakresie urządzeń CPS w pewien sposób spełnia też spora grupa powszechnie dostępnych smartfonów czy tabletek. Zresztą coraz częściej widzimy je już nawet na budowach. Przecież każdy inżynier podczas pracy ma ze sobą swój osobisty smartfon. Tyle, że najczęściej wykorzystuje jedynie zabudowany w nim aparat fotograficzny. Tymczasem urządzenia te są dziś na tyle uniwersalne i technologicznie zaawansowane, że właściwie mogłyby pełnić funkcje przyrządów wspomagających proces inspekcji. Niestety użytkownicy tej klasy systemów CPS nie mają wprost możliwości zobaczenia i manipulacji pozyskiwanymi informacjami z bazy wiedzy, które potrzebne są do podejmowania decyzji dotyczących procesów i fizycznego świata, który ich otacza. Do tego wymagane jest specjalne oprogramowanie, które rozwinie możliwości tego

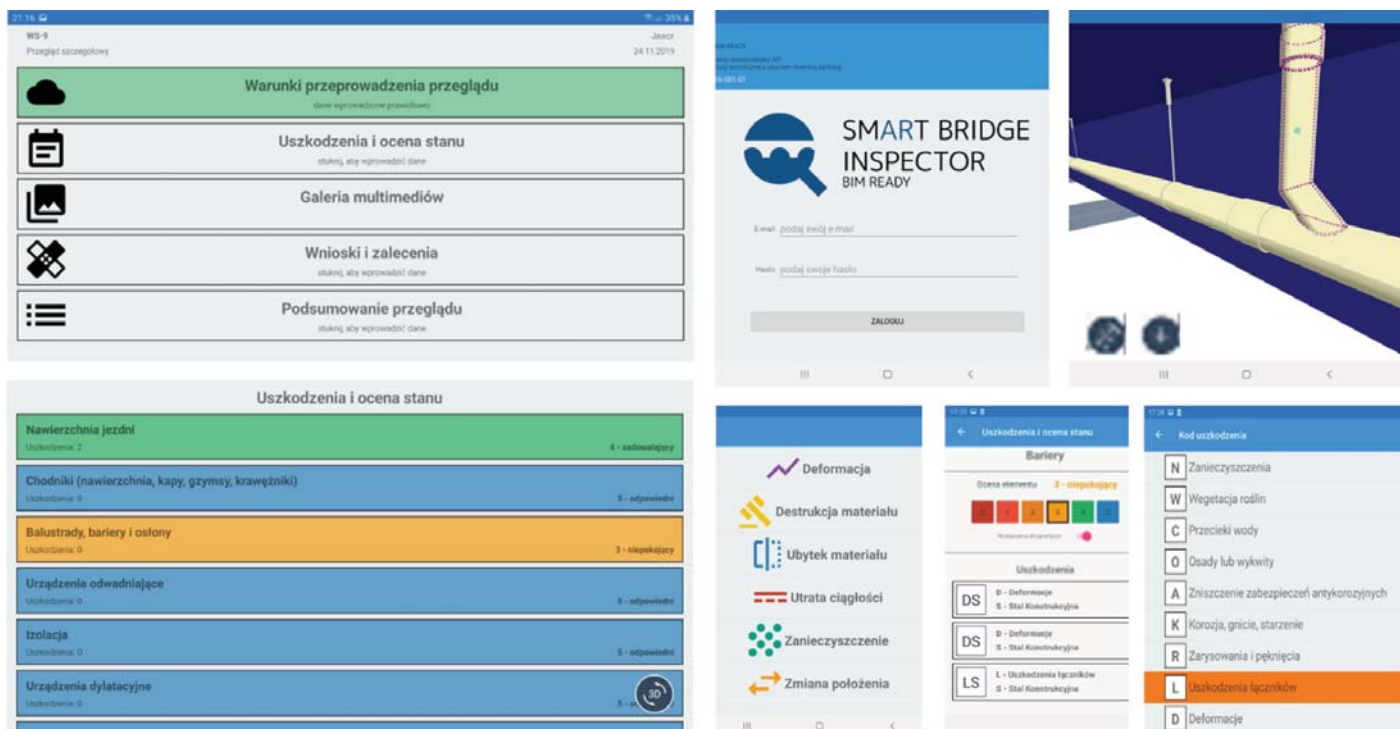


Rys. 9. Przykłady mobilnych aplikacji dla inspektorów mostowych (materiały własne)

powszechnego urządzenia. Inaczej inżynier na budowie nie zobaczy trójwymiarowego modelu budowli nałożonego na teren i nie sprawdzi, czy dotychczas zbudowane elementy są zgodne z projektem. Może jedynie wykorzystać swój tablet do pobrania odpowiedniej części projektu, żeby później „umysłowo” porównywać rysunki wyświetlane na ekranie z otaczającą go rzeczywistością. W ten sposób pojawiają się jednak błędy z powodu rozbieżności między informacjami świata fizycznego i cybernetycznego. Na rysunku 9

pokazano przykłady z USA i Polski dwóch takich mobilnych aplikacji, które wspomagają inspektora mostowego ze smartfonem w terenie.

Przejsie na cyfrowe rozwiązania i wykorzystanie metodyki BIM w zarządzaniu i utrzymaniu obiektów mostowych nie może jednak zablokować działania obecnie stosowanych metod i procedur. Dlatego w podstawowej wersji tego typu mobilnych aplikacji (ale też wszelkich nowych cyfrowych narzędzi), powinna być możliwość przeprowadzenia stan-



Rys. 10. Elementy interfejsu aplikacji mobilnej widziane na tablecie z systemem Windows 10 (materiały własne)

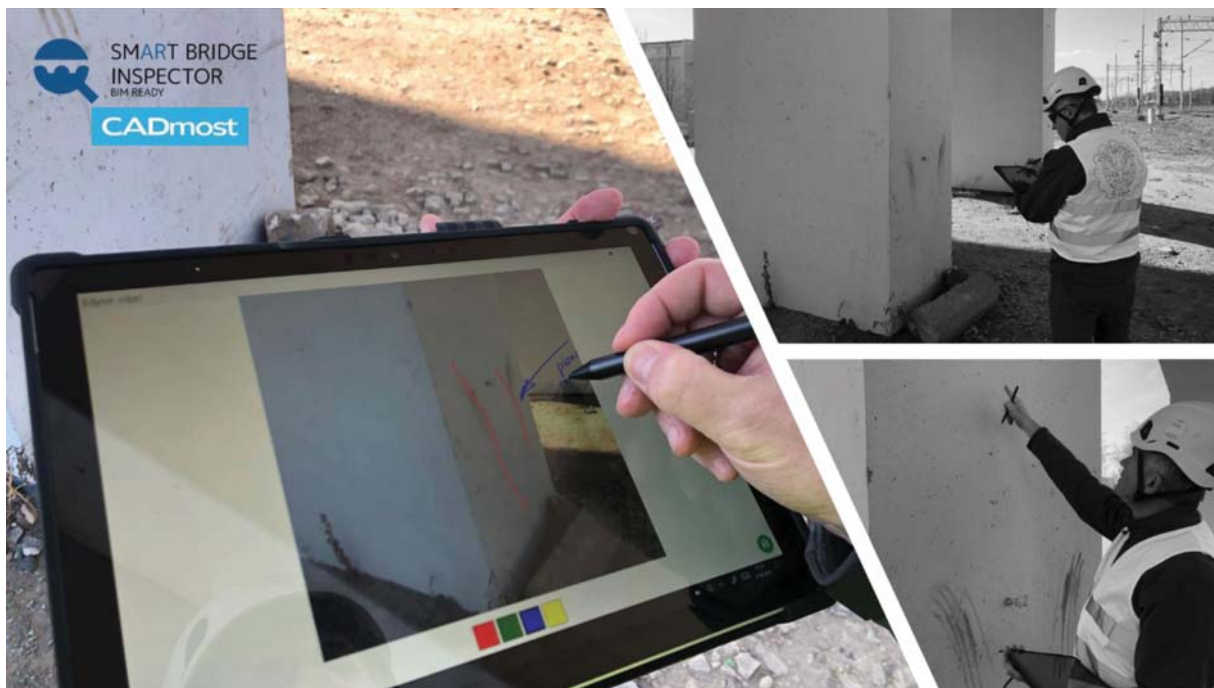


Rys. 11. Skrzynka inspektora mostowego z urządzeniem bazowym i dodatkowym wyposażeniem (materiały własne)

dardowego, wizualnego przeglądu mostu bez konieczności posiadania modelu BIM. Tak samo musi istnieć możliwość wygenerowania klasycznego raportu z inspekcji, który będzie dostosowany do krajowych wymagań w tym zakresie. Chodzi o najnowsze wytyczne rekomendowane Ministra Infrastruktury WR-M-81 [12] oraz nieco starsze instrukcje obowiązujące na drogach krajowych [7] czy na kolejowych obiektach inżynieryjnych [13]. Trzeba jednak mieć świadomość, że do pełnej cyfryzacji procesów zarządzania infrastrukturą, właściwie wszystkie te dokumenty będą musiały być kiedyś zaktualizowane i dostosowane do światowych standardów, które są już opisane w całej serii norm PN-EN

ISO w odniesieniu do metodyki i modeli BIM [6], [14], [15], [16]. Zwłaszcza że Polski Komitet Normalizacyjny rozpoczął już ich tłumaczenie na język polski.

Taką zgodność i minimalną funkcjonalność w tym zakresie spełnia polska mobilna aplikacja *Smart Bridge Inspection*. Powstała ona w spółce CADmost w ramach projektu badawczo-rozwojowego zatytułowanego *Wykorzystanie technologii BIM oraz poszerzonej rzeczywistości AR w planowaniu i inspekcji obiektów infrastruktury technicznej z użyciem mobilnej aplikacji InfraSmARt-Inspection*. W podstawowej wersji spełnia ona wszystkie obecne wymagania formalne zarządców drogowej infrastruktury mostowej w Polsce. Na-



Rys. 12. Edycja zdjęcia uszkodzenia z adnotacjami na tablecie w terenie (materiały własne)



Rys. 13. Testy kamery endoskopowej i sferycznej podłączonych bezprzewodowo do urządzenia bazowego (materiały własne)

tomiast opcje zaawansowane pozwalają wyświetlać na urządzeniach mobilnych modele BIM mostów, a także potrafią wykorzystać dostępną w nich technologię mieszanej rzeczywistości [17]. Warunkiem jednak jest posiadanie wcześniej utworzonych modeli [18].

System składa się z dwóch części – aplikacji mobilnej i stacjonarnej. Mają one różną funkcjonalność i przeznaczenie. Taka potrzeba wynika 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 BMS. Zwykle dają one możliwość obsługi na różnych poziomach dostępu, ale głównie poprzez stacjonarne komputery. Wsparciem dla nich mogą być mobilne urządzenia i przetwarzanie chmurowe. 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.

Aplikacja działa na popularnych smartfonach i tabletach z systemem Android i Windows. Wkrótce powinna być dostępna również w systemach iOS. Jest gotowa na metodykę BIM, ale na razie zarządcy infrastruktury nie mają jeszcze modeli BIM swoich obiektów. Na rysunku 10 pokazano różne elementy interfejsu użytkownika na urządzeniu z systemem operacyjnym Windows. Widać między innymi mechanizmy definiowania uszkodzenia, dodawania kodowego opisu i multimediów z możliwością ich edycji oraz podsumowanie inspekcji, które jest podstawą wygenerowania raportu końcowego. Jest też możliwość rejestrowania zdjęć 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 skonfigurowana (rys. 11). Podstawą oczywiście jest urządzenie bazowe z tabletem w etui ochronnym, paskiem i wygodnym uchwytem. Dzięki temu jest ono zabezpieczone na warunki terenowe (wilgoć, deszcz, pył, uderzenia, upadek). Oprócz tego skrzynka może również zawierać kamerę endoskopową, kamerę 360 stopni oraz smartsondy, które mogą łączyć się z tabletem bezprzewodowo. Tu akurat zastosowano pirometr i czujnik temperaturowo-wilgotnościowy.

Aplikacja jest obecnie testowana na kilku poligonowych obiektach mostowych w Polsce [19]. Sprawdzane są różne elementy scenariusza pracy inspektora oraz działanie podstawowych modułów aplikacji. Zasadniczą zaletą nowego podejścia do inspekcji mostów było używanie tylko jednego urządzenia (tabletu lub smartfonu), które służyło do multimedialnej rejestracji i opisu uszkodzeń (rys. 12). Tablet jest zabezpieczony profesjonalnym etui i przez to jest odporny na warunki terenowe. Ma też pasek i wygodne uchwyty oraz elektroniczny pisak. Podczas inspekcji stosowano nie tylko wbudowaną w tablet kamerę, ale również możliwość szkicowania na fotografiach, a nawet rejestrację głosu, który potem mógł być automatycznie zamieniany na pisany tekst.

W badaniach sprawdzano również możliwość użycia urządzeń peryferyjnych, które mogłyby być podłączone bezprzewodowo do urządzenia bazowego. Taką właśnie funkcję pełni tablet lub smartfon. Testowano więc kamerę endoskopową oraz kamerę sferyczną. Zostały one podłączone do tabletu poprzez protokoły Wi-Fi, a następnie Bluetooth (rys. 13). Oprócz tego przetestowano również działanie bezprzewodowych czujników (smartsondy).

Podsumowanie

Do efektywnego i skutecznego zarządzania infrastrukturą potrzebne są odpowiednie procedury i systematyczne praktyki z optymalnymi strategiami interwencji. W tych procesach przetwarzane są bardzo duże ilości danych i to nawet przy średniej wielkości sieci drogowej. Tymczasem ciągle zwiększa się liczba obiektów mostowych i stają się one coraz bardziej złożone. Dlatego proces podejmowania decyzji musi być wspierany przez zaawansowane systemy komputerowe z grupy BMS. Te nowoczesne aplikacje wspomagające zarządzanie obiektami mostowymi powinny zawierać m.in. takie elementy, jak ewidencję posiadanych zasobów, bazę wiedzy o poszczególnych obiektach z oceną ich stanu technicznego, która uzyskiwana jest dzięki systematycznym inspekcjom, modele degradacji, zasady biznesowe dotyczące kosztów i sposobów utrzymania, metody analityczne służące do wartościowania i wizualizacji wszystkich informacji istotnych przy podejmowaniu decyzji.

Dużą nadzieję na rozwój i doskonalenie systemów BMS wiąże się z ich integracją z modelami BIM. Metodyka BIM to nowe podejście do zarządzania informacją o budowlach wspierane przez cyfrowe technologie. Pozwala nie tylko usprawniać proces projektowania, ale przede wszystkim daje szansę na bardziej skuteczne i efektywne zarządzanie zasobami infrastruktury mostowej. Taka integracja BIM-BMS może być odpowiedzią na nowe potrzeby wynikające z ciągłego powiększania się utrzymywanych zasobów. Efektywniejsze zarządzanie wiedzą w postaci cyfrowej sprawi, że uwaga zarządców będzie mogła być skierowana na długoterminowe planowanie strategiczne, a nie tylko na doraźne działania. Ocena i zapis uszkodzeń podczas inspekcji z mobilnymi aplikacjami będą bardziej obiektywne i dokładne. Dzięki temu, modele degradacji konstrukcji staną się bardziej wiarygodne i kompleksowe. Ulepszony zostanie również proces szkolenia i podnoszenia poziomu kompetencji inspektorów mostowych, a także menedżerów.

Należy jeszcze raz podkreślić, że do skutecznego wdrożenia metodyki BIM i cyfryzacji procesów zarządzania infrastrukturą mostową potrzebna będzie gruntowna zmiana kluczowych przepisów i opracowania krajowych standardów, które muszą być zgodne z międzynarodowymi normatywnymi w zakresie BIM oraz IAM. Tylko wtedy będzie możliwe odejście od tradycyjnych ksiąg obiektów mostowych i papierowych protokołów z przeglądów, które zapychają pękające w szwach archiwa. Zamiast tego będziemy mogli zacząć budować modele informacyjne, które zawierać będą dane już tylko w formie cyfrowej. Takie dane będą mogły być łatwiej gromadzone, przechowywane, przetwarzane i udostępniane.

Artykuł wykorzystuje wyniki badań przeprowadzonych w spółce CADmost w ramach projektu pn. „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] Sacks R. i in., *SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition, Automation in Construction*, 2018, nr 90, s. 134–145.
- [3] Del Grosso A., Basso P., Ruffini L., Figini F. (2017). *Infrastructure management integrating SHM and BIM procedures*. SMAR2017 - Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation on Civil Structures.
- [4] Xia Y., Zhang C. (2019). *Bridge Management Integrating Big Data of Structural Health Monitoring: Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery*. 10.1007/978-3-319-95711-1_73.
- [5] PN-ISO 55000:2017-09 *Zarządzanie aktywami – Informacje ogólne, zasady, terminologia*.
- [6] *Seria norm PN-EN ISO 19650. Organizacja, digitalizacja informacji o budynkach, budowlach, w tym modelowanie informacji o budynku (BIM)*.
- [7] *Instrukcje przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich*. Wydanie 3, GDDKiA, Warszawa, 2020.
- [8] Bień J., Rawa P., Bień B., *Komputerowe wspomaganie zarządzania autostradowymi obiektami mostowymi*, „Inżynieria i Budownictwo”, 11/2001, s. 669–672.
- [9] Bień J., *Uszkodzenia, diagnostyka obiektów mostowych*, WKŁ, Warszawa 2010.
- [10] *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. z 2005 r. Nr 67, poz. 582.
- [11] Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F., *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 2351, 1994.
- [12] *WR-M-81. Wytyczne oceny stanu technicznego drogowych obiektów inżynierskich*, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa, 2022.
- [13] *PKP Polskie Linie Kolejowe SA, Id-16. Instrukcja utrzymania kolejowych obiektów inżynierskich na liniach kolejowych do prędkości 200/250 km/h*, Warszawa, 2014.
- [14] *Seria norm PN-EN ISO 16739. Klasy Industry Foundation (IFC) do udostępniania danych w branży budowlanej i zarządzaniu obiektami*.
- [15] *Seria norm PN-EN ISO 29481. Modele informacji o budynku – Podręcznik dostarczania danych*.
- [16] *Seria norm PN-EN ISO 12006. Budownictwo – Organizacja informacji o obiekcie budowlanym*.
- [17] Salamak M., Januszka M., Płaszczyk T., *Cyfrowe technologie w zarządzaniu mostami*, „Builder” 1/2019, s. 94–98.
- [18] Płaszczyk T., Salamak M., *Proces inspekcji mostu z użyciem metodyki BIM*, „Mosty” 1/2020, s. 46–49.
- [19] Korus K., Jasiński M., Płaszczyk T., Salamak M., *Innowacyjne techniki inspekcji mostów – poligony doświadczalne*, „Materiały Budowlane”, 12/2021, s. 58–60.



Fundusze Europejskie
Program Regionalny



Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

