



**Silesian University
of Technology**

DOCTORAL DISSERTATION

in the discipline: Civil Engineering, Geodesy, and Transport

**Digital twins of bridges: establishing
principles of virtualization with practical
use cases**

author:

Kamil Korus

supervisor:

Professor Marek Salamak PhD, DSc

additional supervisor:

Jan Winkler PhD

March 2023

Gliwice, Poland

Streszczenie (PL)

Cyfrowe bliźniaki mostów: utworzenie podstaw wirtualizacji z praktycznymi sposobami użytkowania

Obserwowana współcześnie cyfryzacja niesie ze sobą zarówno nowe możliwości jak i poważne wyzwania. Zasady zrównoważonego rozwoju, ambitne cele proekologiczne i rosnąca populacja społeczeństw motywują wprowadzanie nowoczesnych i zintegrowanych technologii również w inżynierii lądowej. Potrzeba cyfrowej transformacji jest wyrażana przez dotykające nas problemy starzejącej się infrastruktury, margines produktywności sektora budowlanego oraz oczekiwania inżynierów i zarządców. Mosty jako złożone i wrażliwe na wpływy środowiska konstrukcje o logistycznym i strategicznym znaczeniu, potrzebują dziś nowych metod zarządzania. Cyfrowe bliźniaki, postrzegane jako kluczowy komponent strategii Industry 4.0 (Przemysł 4.0), stają się katalizatorem cyfrowej transformacji w ujęciu holistycznym.

Rozprawa proponuje pryncypia w zakresie tworzenia i wykorzystywania cyfrowych bliźniaków mostów.

względnie generalne zasady tej idei, ale też specyfikę inżynierii lądowej i doświadczenia inżynierów. Proponowany cyfrowy bliźniak jest zatem wirtualnym odzwierciedleniem obiektu mostowego w całym jego cyklu życia. Jest scharakteryzowany przez swoją aktualność, swoistą inteligencję i autonomiczność, interaktywność i interoperacyjność, modułowość i rozszerzalność, skalowalność i dostępność oraz bezpieczeństwo i unikatowość. Z perspektywy technologicznej jest on ewolucją już dziś stosowanych technologii, rozwiązań i metod, które jeszcze nie zostały w wystarczający sposób zintegrowane. Proponowany cyfrowy bliźniak wykorzystuje bowiem elementy takie jak BIM (Building Information Modeling), SHM (Structural Health Monitoring) oraz AI (Artificial Intelligence). Przyjmuje standard IFC (Industry Foundation Classes) jako bazę dla modelu centralnego. Jest też wzbogacony przez dodatkowe techniki (np. programowanie graficzne, chmury punktów). Takie podejście umożliwia realizację procesu wdrażania w sposób ewolucyjny. Cyfrowe bliźniaki nie muszą przecież być perfekcyjne od samego początku. Koncepcja ta powinna dojrzewać w naturalny sposób, zachęcając użytkowników korzyściami, jakie wynikają z ich stosowania.

Aby ten ewolucyjny rozwój był możliwy, paradygmat cyfrowych bliźniaków musi dostarczać praktycznych sposobów użytkowania zapewniających realne korzyści inżynierom oraz właścicielom i zarządcom infrastruktury. Rozprawa omawia więc dwa utworzone przez autora praktyczne sposoby użytkowania wykorzystujące techniki wskazane jako podstawowe komponenty cyfrowych bliźniaków. Sposoby te dotyczą różnych faz cyklu życia.

Optymalizacja z wykorzystaniem programowania graficznego i algorytmu genetycznego automatyzuje głównie początkową fazę projektową. Programowanie graficzne zostało tu wzbogacone funkcjonalnościami MES tworząc jednolite środowisko optymalizacji geometrycznej oraz integracji z modelami BIM. Automatyzujące optymalizację algorytmy pozwalają na analizę zdecydowanie większej liczby wariantów

niż w tradycyjnym, iteracyjnym sposobie projektowania. Taka integracja modeli BIM i MES jest kluczowa do uzyskania pełnej funkcjonalności cyfrowego bliźniaka mostu.

olejne fazy cyklu życia obiektu mostowego dotyczą stosunkowo krótkiego procesu budowy oraz najdłuższej fazy operacyjnej. Tutaj autor zaproponował wykorzystanie chmur punktów, które można pozyskać technikami rekonstrukcji 3D, co w inżynierii lądowej najczęściej realizowane jest przez skanowanie laserowe lub fotogrametrię. Chmury punktów mogą być bazą dla modelowania aktualnej geometrii obiektu i to nie tylko podczas jego użytkowania, ale też w trakcie wznoszenia. W celu automatyzacji procesu pozyskiwania wartościowych informacji z chmur punktów, a nawet prób automatycznego generowania modeli, wykorzystywane są często algorytmy uczenia maszynowego. Niestety, dostępne zbiory chmur punktów nie pozwalają na efektywne trenowanie takich algorytmów. Alternatywą mogą być sztucznie wygenerowane dane w postaci syntetycznych chmur punktów. Uzyskanie danych do treningu algorytmów to pierwszy krok do tworzenia systemów monitorujących zmiany geometrii modeli cyfrowych bliźniaków z użyciem chmur punktów. Powtarzane okresowo skanowanie fizycznego obiektu, a następnie użycie zaproponowanych algorytmów analizy nowej chmury punktów pozwoli na aktualizację modelu geometrii. Zaktualizowane i porównywane ze sobą kolejne wydania modelu będą mogły być wykorzystane do identyfikacji zmian w geometrii, które z kolei mogą wskazywać na ewentualne nieprawidłowości pracy fizycznego obiektu. W przypadku mostów zlokalizowanych na obszarach z deformacją terenu (np. aktywność górnicza, sejsmiczna lub tunelowanie), taka automatyczna aktualizacja modelu może być wykorzystana do monitorowania stanu deformacji konstrukcji i wynikających z tego zagrożeń bezpieczeństwa.

Przedstawiona w rozprawie koncepcja cyfrowego bliźniaka mostu jest jedną z pierwszych prób zdefiniowania tych wirtualnych modeli dla konstrukcji mostowych. Studium literatury pokazało, że w światowej inżynierii mostowej prace nad takim podejściem są dopiero na początkowych etapach. Nabierająca rozpędu cyfrowa transformacja niemal wszystkich dziedzin naszego życia jest bezsprzecznie dużym wyzwaniem – ale i szansą. W kontekście coraz bardziej przenikających się różnych dyscyplin naukowych i sektorów gospodarki, paradygmat cyfrowych bliźniaków zwiększa efektywność w obszarze inżynierii lądowej i umożliwia międzybranżową współpracę na cyfrowych platformach wymiany danych. Dostarcza też nowych, praktycznych narzędzi, które wspomagają realizację codziennych zadań wykonywanych przez inżynierów i zarządców infrastruktury. Przedstawione w tej rozprawie zasady i sposoby użytkowania cyfrowych bliźniaków mostów są jednymi z pierwszych kroków w kierunku infrastruktury przyszłości. Dzięki temu będzie możliwa wirtualizacja już nie tylko samych fizycznych obiektów mostowych, ale również towarzyszących im procesów.