

CYFROWY BLIŹNIAK SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Andrzej Kochan

dr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa,
tel.: +48 22 234 7882, email: andrzej.kochan@pw.edu.pl

Streszczenie. Zagadnienia związane z cyfrowym odwzorowaniem struktur i organizacji funkcjonujących w rzeczywistym świecie są tematyką poruszaną przez wielu badaczy zajmujących się połączeniem badań naukowych i ich praktycznych zastosowań. Koncepcją spinającą te prace jest cyfrowy bliźniak. Koncepcja ta obejmuje zarówno aspekty statyczne jak i dynamiczne. Wydaje się być również idealna dla badań systemów transportu kolejowego, gdzie statyczne odwzorowanie obejmuje infrastrukturę kolejową, natomiast dynamiczne dotyczy ruchu kolejowego i jazdy poszczególnych pociągów. Takie ujęcie transportu kolejowego nie jest widoczne jeszcze w literaturze, a więc jest obszarem, który należy zbadać. Cyfrowy bliźniak systemu kolei to bardzo szerokie zagadnienia, dlatego też autor w niniejszym artykule zajmie się jego istotną częścią, jaką stanowi cyfrowe odwzorowanie ERTMS\ETCS.

Słowa kluczowe: cyfrowy bliźniak, ERTMS\ETCS, cyfryzacja srk

1. Wprowadzenie

Zagadnienia związane z cyfrowym odwzorowaniem struktur i organizacji funkcjonujących w rzeczywistym świecie są tematyką poruszaną przez wielu badaczy zajmujących się połączeniem badań naukowych i ich praktycznych zastosowań. Koncepcją spinającą te prace jest cyfrowy bliźniak (ang. Digital Twin DT). Cieszy się ona obecnie dużym zainteresowaniem w badaniach i wśród praktyków [21]. Jednym ze szczególnych powodów są liczne obszary zastosowań DT [18], co jest szczególnie widoczne w ich szerokiej gamie dziedzin zastosowania, takich jak: produkcja [8], logistyka [4] lub inteligentne miasto [9]. Koncepcja ta obejmuje odwzorowanie zarówno aspektów statycznych jak i dynamicznych. Wydaje się być ona idealna również dla systemów transportu kolejowego, gdzie statyczne odwzorowanie obejmuje infrastrukturę kolejową [5,10], natomiast dynamiczne dotyczy ruchu kolejowego i jazd poszczególnych pociągów [6,7]. Takie ujęcie transportu kolejowego nie jest widoczne jeszcze w literaturze, a więc jest obszarem, który należy zbadać. Cyfrowy bliźniak systemu kolei to bardzo szerokie zagadnienia, dlatego też autor w niniejszym artykule zajmie się jego istotną częścią jaką stanowi cyfrowe odwzorowanie ERTMS\ETCS [89].

2. Definicja

Koncepcja Cyfrowego Bliźniaka nie ma jeszcze ukształtowanej definicji. Ciekawe przeglądy propozycji pojawiły się w [20].

„Cyfrowy bliźniak” to zintegrowana wielofizyczna, wielopłaszczyznowa, probabilistyczna symulacja rzeczywistego pojazdu lub systemu, który wykorzystuje najlepsze dostępne modele fizyczne, aktualizacje czujników, historię floty itp. w celu odzwierciedlenia życia odpowiadającego mu bliźniaka z realnego świata. Cyfrowy bliźniak jest ultrarealistyczny [...] integruje dane z czujników [...] historię obsługi technicznej oraz wszystkie dostępne dane historyczne i dane dotyczące systemu” pisze w odniesieniu do floty pojazdów Glaessgen i Starge w [1].

„Cyfrowy bliźniak [...] to zbiór wirtualnych konstrukcji informacyjnych, które w pełni opisują potencjalny lub rzeczywisty fizycznie wytworzony produkt od poziomu mikroatomu do poziomu makrogeometrycznego. [...] Opisuje on [...] stany operacyjne pozyskane z rzeczywistych danych z czujników, bieżących, przeszłych, rzeczywistych i przewidywanych w przyszłości. [...] do różnych celów”. Piszcie Grieves i Vickers w [2].

„Koncepcja Cyfrowego bliźniaka [...] zawiera trzy główne części: a) produkty fizyczne w przestrzeni rzeczywistej, b) produkty wirtualne w przestrzeni wirtualnej, oraz c) [dwukierunkowe] połączenia danych i informacji, które łączą produkty wirtualne i rzeczywiste.” Definiuje Grieves w [3].

„Cyfrowy bliźniak składa się z trzech części: produktu fizycznego, produktu wirtualnego i połączonych danych, które łączą produkt fizyczny i wirtualny. [...] streszczono następujące cechy Cyfrowego bliźniaka: odbicie w czasie rzeczywistym. [...] przestrzeń wirtualna [...] może zachować ultra wysoką synchronizację i wierność przestrzeni fizycznej. [...]” pisze Tao w [14].

3. Właściwości cyfrowego bliźniaka

Koncepcja Cyfrowego Bliźniaka jest na tyle ciekawa i perspektywiczna, że doczekała się badań nad jej taksonomią (usystematyzowaniem cech określających właściwości), których wyniki przedstawiono w [20]. Autorzy zdefiniowali 8 właściwości, które można uznać za parametry klasyfikacji cyfrowych bliźniaków. Identyfikacja tych cech była oparta na analizie artykułów poświęconych temu tematu. W pierwszym podejściu wybrano 579 artykułów, następnie stosując określone zasady filtrowania pozostawiono 233 pozycje jako reprezentatywną grupę. Zidentyfikowane charakterystyczne właściwości to:

- łączy danych,
- przeznaczenie,
- elementy koncepcyjne,
- dokładność modelu,
- interfejs,

- synchronizacja,
- dane wejściowe,
- czas utworzenia.

Jak nietrudno zauważyć nazwy właściwości w niektórych przypadkach są bardzo ogólne. Dlatego też wymagają opisu.

Właściwość **łącza danych** charakteryzuje w jaki sposób komunikacja pomiędzy cyfrowym bliźniakiem a jego rzeczywistym odpowiednikiem jest realizowana. Są dwie możliwości: jest to jednokierunkowe łącze danych lub łącze dwukierunkowe. Pierwsze z nich zakłada, iż przepływ danych odbywa się od obiektu fizycznego do wirtualnego. Natomiast w przypadku dwukierunkowego łącza danych oprócz danych otrzymywanych przez cyfrowego bliźniaka z rzeczywistego obiektu dane są przesyłane również do tego obiektu, czyli cyfrowy bliźniak oddziałuje na obiekt fizyczny, a rezultacie może np. zastępować jego części.

Właściwość **przeznaczenie** opisuje w jaki sposób cyfrowy bliźniak postępuje z danymi otrzymanymi od swojego rzeczywistego odpowiednika. Pierwszą wartością dla tej właściwości jest przetwarzanie danych. Przetwarzanie danych może być realizowane w celu prognozowania lub optymalizacji rzeczywistych procesów. Drugą możliwością jest transfer danych z jednego punktu odwzorowywanego systemu do innego punktu tego systemu przy wykorzystaniu łącza danych. Taki mechanizm pozwala na wzbogacenie możliwości rzeczywistego systemu. Ostatnią wartością tej właściwości jest repozytorium danych. W tym przypadku wirtualny bliźniak stanowi archiwum opisujące istnienie rzeczywistego systemu, jego zrealizowane procesy i zmiany w infrastrukturze.

Kolejną właściwość **elementy koncepcyjne**, który opisuje trwałość powiązania pomiędzy systemem rzeczywistym i jego wirtualnym odwzorowaniem. Mówi się o powiązaniu bezpośrednim jeden do jednego oraz odwzorowaniu niezależnym. W pierwszym przypadku jest to odwzorowanie ściśle dokładne jeden do jednego, jedno jest częścią drugiego, a w drugim przypadku wirtualne odwzorowanie może osobnym bytem względem części systemu rzeczywistego lub wirtualnych odwzorowanie może być kilka różnych.

Następna właściwość to **dokładność** odwzorowania w cyfrowym bliźniaku właściwości rzeczywistego systemu. Wartością tej właściwości może być identyczność, co oznacza, że cyfrowy bliźniak jest dokładnym odwzorowaniem rzeczywistości i opisuje każdy szczegół (na określonym poziomie szczegółowości). Drugą wartością jest częściowa dokładność, która oznacza, że cyfrowy bliźniak skupia się tylko na najważniejszych elementach rzeczywistego obiektu.

Kolejną właściwością jest **interfejs**, która opisuje zdolność do przesyłania danych po tym jak zostaną przetworzone. Rozróżniane są tu wartość interfejs maszyna-człowiek oraz maszyna-maszyna. W pierwszym przypadku cyfrowy bliźniak udostępnia przetworzone dane człowiekowi np. jako obraz wirtualnej rzeczywistości, w drugim przypadku jest to interfejs do kolejnej maszyny, którą może być kolejny cyfrowy bliźniak.

Synchronizacja jest kolejną właściwością określną dla cyfrowego bliźniaka. Możliwe są to dwie wartości: synchronizacja obecna, kiedy dane są cały czas wy-

mieniane pomiędzy systemem rzeczywistym i jego obrazem oraz brak synchronizacji, kiedy taka wymiana danych nie funkcjonuje. W pierwszym przypadku wyróżnia się czasami synchronizację w czasie rzeczywistym, czyli na bieżąco.

Właściwość **dane wejściowe** określa postać danych jakie przesyłane są przez łącza danych. Rozróżnia się tutaj takie wartości jak dane surowe i dane przetworzone. W pierwszym przypadku oznacza to transmisję wszystkich danych czytanych z rzeczywistego systemu bez optymalizacji jakości. Druga wartość oznacza wstępne przetworzenie danych lub ich wybiórczy transfer.

Ostatnią właściwością jest **czas utworzenia**. W tym przypadku również mamy dwie wartości. Pierwsza z nich to „fizyczna część”, co oznacza, że dla układu system fizyczny bliźniak, pierwsza była część fizyczna. Druga wartość, to cyfrowa część, co oznacza, że dla tego układu pierwsze powstało cyfrowe odwzorowanie. Właściwość może przyjmować jeszcze trzecią wartość – „równocześnie”, co oznacza, że obydwie części są tworzone w tym samym czasie.

Podsumowanie tej taksonomii w kompaktowy sposób pokazane jest w tabeli 1. Obok nazwy właściwości i możliwych wartości w trzeciej kolumnie znajduje się informacja, czy poszczególne wartości wykluczają się (wyłączność wzajemna), czy właściwość może być wielowartościowa (brak wyłączności)

Tabela 1. Właściwości bliźniaka cyfrowego {20}

| Właściwość | Wartości | Wyłączność |
|-------------------------|--|------------|
| Łącze danych | Jednokierunkowe, dwukierunkowe | Wzajemna |
| Przeznaczenie | Przetwarzanie, Transmisja, Repozytorium | Brak |
| Element koncepcyjne | Fizycznie niezależne, Fizycznie połączone | Wzajemna |
| Dokładność odwzorowania | Identyczne, częściowe | Wzajemna |
| Interfejs | Maszyna-maszyna, Maszyna-człowiek | Brak |
| Synchronizacja | Obecna, brak | Wzajemna |
| Dane wejściowe | Dane surowe, dane przetworzone | Brak |
| Czas utworzenia | Fizyczna część pierwsza, cyfrowa część pierwsza, Równoległy rozwój | Wzajemna |

4. Struktura cyfrowego bliźniaka systemu srk

Cyfrowy bliźniak jest wirtualnym odwzorowaniem systemu rzeczywistego. Systemy sterowania ruchem kolejowym realizowane są w różnych technologiach: komputerowej, przekaźnikowej, elektromechanicznej oraz mechanicznej. Każda odmiana może być przedmiotem odwzorowania i nie wyklucza się budowania cyfrowych bliźniaków również dla starszych technologii. Wtedy jednak odwzorowania wymaga więcej elementów wraz z ich właściwościami. Ekstremalnym przykładem są na pewno urządzenia mechaniczne. Budowa ich dokładnego cyfrowego bliźniaka wymagałaby wyposażenia rzeczywistego systemu w szereg dodatkowych urządzeń pomiarowych. Jednak pamiętając o właściwości dokładność odwzoro-

wania, można przyjąć, że w przypadku takiej technologii wykonania urządzeń, odwzorowujemy tylko istotne właściwości rzeczywistego systemu.

Technologią, która w naturalny sposób jest najbardziej podatna na cyfrowe odwzorowanie, to oczywiście technologia komputerowa. Systemy srk wykonane w tej technologii bez żadnych dodatkowych rozwiązań zbierają bardzo dużo informacji o swoim funkcjonowaniu. Konfiguracja ich konkretnych instalacji (aplikacji) ma również postać danych komputerowych (np. tekstowych plików konfiguracyjnych, baz danych). Zaprojektowanie łączy cyfrowych pomiędzy systemem rzeczywistym i cyfrowym bliźniakiem nie jest w tym przypadku trudne do realizacji.

Zbudowanie cyfrowego bliźniaka dla podsystemu sterowanie występującego na określonym obszarze sieci kolejowej, zrealizowanego w tej technologii, jest możliwe do realizacji.

Jednak odwzorowanie samego systemu srk może być niewystarczające i potrzebne jest również odwzorowanie jego otoczenia. Otoczeniem będziemy nazywać wszystkie elementy, które wpływają na system srk i na które system srk oddziałuje. Do otoczenia systemu srk należą:

- infrastruktura układu torowego obszaru,
- pojazdy szynowe, pociągi poruszające się w obszarze,
- rozkład jazdy dla pociągów poruszających się w obszarze.

Dla cyfrowego bliźniaka systemu srk niezbędny jest:

- cyfrowy projekt srk [19] składający się z:
 - o struktury urządzeń – plan schematyczny,
 - o zasad realizacji funkcji zabezpieczenia ruchu kolejowego – tablica zależności,
 - o opisu powiązań pomiędzy urządzeniami – schematy połączeń analogowych, struktury sieci transmisyjnych,
- cyfrowa dokumentacja techniczno ruchowa opisująca właściwości urządzeń,
- cyfrowy regulamin techniczny obszaru opisujący zasady prowadzenia ruchu kolejowego.

Analizując postawione dotychczas tezy można stwierdzić, że najlepszym kandydatem na dopracowanie zasad budowy cyfrowego bliźniaka systemu srk jest system ERTMS\ETCS. Przemawia za tym:

- komputerowa/informatyczna technologia realizacji,
- istniejąca specyfikacja w postaci TSI oraz odpowiednich subsetów,
- praktyczna potrzeba cyfrowego odwzorowania związana z prowadzonymi wdrożeniami na polskiej sieci kolejowej w celu spójnego badania instalacji systemu na poszczególnych liniach.
- istotny udział symulacji komputerowej w metodyce projektowania systemu.

5. Zastosowania cyfrowego bliźniaka srk

Zastosowania cyfrowego bliźniaka systemu srk są bardzo zróżnicowane. Znajduje on zastosowanie we wszystkich etapach cyklu życia:

- koncepcji,
- projektowania,
- implementacji,
- weryfikacji,
- odbiorach,
- certyfikacji,
- utrzymaniu,
- wprowadzaniu zmian,
- wycofaniu z eksploatacji.

Bardzo praktycznymi przykładami testów[12], które mogą by przeprowadzone w ramach certyfikacji WE podsystemu Sterowanie są:

- laboratoryjne testy dynamiczne,
- testy IOP,
- test kompatybilności ESC,

Inne przykłady zastosowań to:

- badanie scenariuszy operacyjnych,
- weryfikacja projektów podsystemów,
- weryfikacja pracy urządzeń,
- weryfikacja zasad organizacyjno-ruchowych,
- diagnostyka,
- rozwiązywanie konfliktów ruchowych,
- monitorowanie elementów procesu,
- weryfikacja opisu infrastruktury.

W dalszej części artykułu zostanie opisana koncepcja cyfrowego odwzorowania systemu ERTMS\ETCS w dwóch wariantach:

- cyfrowy bliźniak projektu ERTMS\ETCS dla określonego obszaru nadzoru,
- cyfrowy bliźniak certyfikowanego systemu ERTMS\ETCS.

Te etapy w cyklu życia systemu ERTMS\ETCS są bardzo dynamiczne. Składają się z wielu interakcji. Wymagają wielu operacji na danych. Dane są gromadzone, weryfikowane, budowane są relacje spójności, a w kolejnych krokach badane jest zachowanie rzeczywistego systemu. W czasie doświadczeń badawczych, czy też testów potwierdzających zgodność zbierane są dane opisujące przebieg procesów. Następnie dla tych danych wykonywane są algorytmy testujące określone właściwości.

Wspomniane dwie koncepcje zostaną przedstawione w świetle właściwości cyfrowego bliźniaka opisanych w pkt. 3.

6. Cyfrowy bliźniak projektu ERTMS\ETCS dla określonego obszaru nadzoru

Cyfrowy bliźniak projektu ERTMS\ETCS dla określonego obszaru nadzoru (DT_ETCS_AREA_DESG) jest odwzorowaniem cyfrowym, którego celem jest przygotowanie koncepcji i projektu wykonawczego dla instalacji systemu ERTMS\ETCS na określonym obszarze sieci kolejowej. Takie instalacje realizowane są aktualnie w dużej mierze dla odcinków linii kolejowych np. odcinek linii kolejowej Kozłów-Starzyny (33 km) ETCS L1 Baseline 2 wydanie 2.3.0d [15] czy Poznań-Wągrowiec (51 km) ETCS L1 LS Baseline 3 wydanie 3.3.0.[16].

Projekt systemu ERTMS\ETCS zawiera dwie główne części:

- projekt budowlany zawierający opis granic obszaru ETCS, rozmieszczenia balis, LEU oraz lokalizację RBC [17],
- projekt wykonawczy opisujący funkcje poszczególnych elementów systemu, ich konfigurację informacyjną tzn. telegramy wysyłane w określonych lokalizacjach oraz realizowane zasady organizacyjno-ruchowe.

Projekt ma charakter statyczny. Fizycznie są to arkusze dokumentacji projektowej zapisane w postaci plików narzędzia informatycznego służącego do projektowania systemu ERTMS\ETCS.

DT_ETCS_AREA_DESG posiada więcej elementów. Jest to model infrastruktury torowej, model warstwy podstawowej urządzeń srk, model pociągów poruszających się w tym systemie oraz model rozkładu jazdy, który jest realizowany w zadanym obszarze.

DT_ETCS_AREA_DESG realizuje funkcje weryfikacji kompletności i poprawności projektu.

Właściwości cyfrowego bliźniaka projektu ERTMS\ETCS dla określonego obszaru według opisanej taksometrii mają następujące wartości:

- łączy danych - komunikacja pomiędzy DT_ETCS_AREA_DESG a projektem odbywa się w obydwie strony, a więc łączy danych jest dwukierunkowe. DT czytuje na bieżąco dane wprowadzane do projektu przez projektanta. Po przetworzeniu danych DT przestaje do plików projektu uwagi dotyczące poszczególnych części projektu;
- przeznaczenie - DT_ETCS_AREA_DESG służy do weryfikacji kompletności i poprawności projektu. Sprawdza projekt pod względem zadanych reguł przy pomocy algorytmów badających relacje pomiędzy elementami projektu i symulacji jazd pociągów według określonych scenariuszy operacyjnych. Przeznaczenie DT ma charakter przetwarzania danych;
- elementy koncepcyjne - DT_ETCS_AREA_DESG jest odwzorowaniem odseparowanym;
- dokładność odwzorowania - DT_ETCS_AREA_DESG zawiera wszystkie elementy rzeczywistego projektu, odwzorowanie jest identyczne;
- interfejs – interfejs DT_ETCS_AREA_DESG ma charakter maszyna-maszyna. W wyniku przetworzenia danych przesyłane są informacje do systemu opisujące proces weryfikacji;

- synchronizacja – synchronizacja danych występuje, jednak jest ona wykonywana na żądanie, nie jest inicjowana automatycznie;
- dane wejściowe – dane przesyłane są do DT_ETCS_AREA_DESG w postaci opisów o określonym formacie. Z założeniem jakiej postaci jest wierne odzwierciedlenie zawartości informacyjnej rzeczywistego projektu. Pomimo, że nie są przesyłane do bliźniaka fizyczne pliki stanowiące projekt, można przyjąć, że dane wejściowe mają charakter nie przetworzony.
- czas utworzenia – w proponowanym rozwiązaniu DT_ETCS_AREA_DESG jest tworzony równoległe do rzeczywistego projektu. Jednak widać tu możliwość innego wariantu kiedy DT jest tworzony jako pierwszy i na jego podstawie automatycznie generowany jest projekt. Takie podejście będzie przedmiotem przyszłych badań.

7. Cyfrowy bliźniak certyfikowanego systemu ERTMS\ETCS

Cyfrowy bliźniak systemu ERTMS\ETCS, który jest przedmiotem certyfikacji (DT_ETCS_AREA_CERT) ma postać cyfrowego odwzorowania rzeczywistego systemu, który został zainstalowany i jest oceniany na zgodność z wymaganiami zasadniczymi według procedur zdefiniowanych w Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności dla podsystemu sterowanie [11]. Ocena ta jest przeprowadzana między innymi w oparciu o testy, do których należą:

- testy dynamiczne systemu ERTMS\ETCS,
- testy IOP,
- testy ESC kompatybilności część pokładowej i przytorowej.

Zakres rzeczywisty systemu, którego odwzorowaniem jest DT_ETCS_AREA_CERT obejmuje:

- infrastrukturę torową w zakresie parametrów mających wpływ na działanie ERTMS\ETCS,
- system srk warstwy podstawowej w zakresie oddziaływania na pojazd i komunikacji z ERTMS\ETCS,
- system ERTMS\ETCS będący przedmiotem oceny,
- pojazd ETCS, który porusza się po obszarze testowym, którego urządzenia pokładowe współpracują z urządzeniami przytorowymi będącymi przedmiotem oceny.

Cyfrowy bliźniak posiada dokładnie te same elementy w postaci cyfrowej. Elementy i ich struktura odwzorowana jest w postaci danych, natomiast jazdy testowe w postaci symulacji.

Właściwości DT_ETCS_AREA_CERT według opisanej taksometrii mają następujące wartości:

- łączy danych – komunikacja pomiędzy cyfrowym bliźniakiem i rzeczywistym systemem jest jednokierunkowa. Dane są przesyłane tylko do cyfrowego bliźniaka.

- przeznaczenie – cyfrowy bliźniak występuje jako środowisko do analizy danych otrzymywanych w czasie jazdy testowych rzeczywistym pociągiem, jak również jako środowisko symulacyjne. W tym drugim przypadku korzystając z konfiguracji obszaru testowego, jazdy pociągu ETCS są symulowane i powstaje zapis danych testowych, które następnie są przedmiotem oceny. Przeznaczenie DT ma charakter przetwarzania danych;
- elementy koncepcyjne – DT_ETCS_AREA_CERT jest odwzorowaniem, które jest osobnym bytem, odseparowanym;
- dokładność odwzorowania – DT_ETCS_AREA_CERT jest dokładnym odwzorowaniem ocenianego systemu ERTMS\ETCS, natomiast inne elementy odwzorowywane są w zakresie niezbędnym do wykonania oceny. Jest to odwzorowanie częściowe. Ze względu na kluczową funkcjonalność ERTMS\ETCS, cyfrowy bliźniak powinien mieć zaimplementowane bardzo dokładne modele pojazdu ETCS;
- interfejs – DT_ETCS_AREA_CERT pracuje w trybie interfejsu maszyna człowiek. Odwzorowanie cyfrowe rzeczywistego procesu, jak również symulowane procesy przez bliźniaka, czyli wszystkie przetworzone dane są dostępne dla użytkowników zainteresowanych wynikami testów, po uprzednim uzyskaniu dostępu;
- synchronizacja – DT_ETCS_AREA_CERT jest na bieżąco synchronizowany z rzeczywistym systemem. Wyniki wszystkich procesów przesyłane są na bieżąco i są składowane w bliźniaku. Oczywiście wyniki symulacji przeprowadzanych w samym bliźniaku również są składowane i dostępne dla weryfikacji i przeglądu;
- dane wejściowe – DT_ETCS_AREA_CERT pobiera już wstępnie przetworzone dane. Jest to zakres, który jest niezbędny do przeprowadzenia testów weryfikacyjnych;
- czas utworzenia – DT_ETCS_AREA_CERT jest odwzorowaniem tworzonym po utworzeniu systemu rzeczywistego. Testy, które są celem zastosowania bliźniaka są wykonywane w końcowej fazie obioru systemu i w ostatnim etapie certyfikacji.

8. Podsumowanie

Presja na kolejową infrastrukturę transportową stale rośnie, co jest wzmacniane przez nowe konkurencyjne oferty mobilności, takie jak Uber. Kolejy mogą w przyszłości pozostać atrakcyjną częścią łańcucha transportowego, jednak niezbędne jest zwiększenie jej efektywności i elastyczności. Jedną z dróg widzieliśmy poprzez wykorzystanie nowych rozwiązań cyfrowych. Kolejowe przedsiębiorstwa transportowe korzystają z digitalizacji aby poszerzyć swoją ofertę i uczynić ją elastyczną i dostosowaną do potrzeb. Projekty w Londynie, Norwegii i Niemczech pokazują, że cyfryzacja jest odpowiednią metodą [13].

Cyfrowy bliźniak jako wirtualne odwzorowanie systemu ERMS\ETCS jest bardzo obiecującą koncepcją. Jego zastosowanie dla tego systemu jest ciekawym wyzwaniem naukowym i praktyczną potrzebą wynikającą z trwających procesów wdrażania prowadzonych w całej Europie. W artykule przedstawiono koncepcję cyfrowego bliźniaka w dwóch zastosowaniach. Tematyka ta będzie przedmiotem dalszych badań autora.

Bibliografia

- [1] Glaessgen, E., and Stargel, D. 2012. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles, in Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [2] Grieves, M. 2014. Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication.
- [3] Grieves, M., and Vickers, J. 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt and A. Alves (eds.), Cham, Switzerland: Springer International Publishing, pp. 85-113.
- [4] Haße, H., Bin, L., Weißenberg, N., Cirullies, J., and Otto, B. 2019. Digital Twin for Real-Time Data Processing in Logistics, in Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)/ Artificial Intelligence and Digital Transformation in Supply Chain Management: Innovative Approaches for Supply Chains, W. Kersten, T. Blecker and C. M. Ringle (eds.), Berlin, Germany: epubli.
- [5] Kochan A., Wontorski P., Automatyzacja procesu projektowania urządzeń sterowania ruchem kolejowym [w:] Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, vol. II, nr 3(110) 2016, s. 111-122.
- [6] Koper, E., Kochan, A., Gruba, Ł. (2019). Simulation of the Effect of Selected National Values on the Braking Curves of an ETCS Vehicle. W J. Mikulski, J. Mikulski (Red.), Development of Transport by Telematics (ss. 17-31). http://doi.org/10.1007/978-3-030-27547-1_2.
- [7] Koper, E., Kochan, A. (2019). Symulacje procesów ruchowych na linii wyposażonej w system ERTMS/ETCS w środowisku ERSA. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji W Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, (2(119)), 121-132.
- [8] Negri, E., Fumagalli, L., and Macchi, M. 2017. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-Based Production Systems, Procedia Manufacturing (11), pp. 939-948 (doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198).

- [9] Petrova-Antonova, D., and Ilieva, S. 2019. Methodological Framework for Digital Transition and Performance Assessment of Smart Cities, in 2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split, Croatia: FESB, University of Split, pp. 1-6.
- [10] Pilotaż BIM – PKP PLK S.A., dostęp na: www.bimblog.pl/2019/05/pilotaz-bim-pkp-plk-s-a/, data dostępu: 01.2020.
- [11] ROZPORZĄDZENIE WYKONAWCZE KOMISJI (UE) 2019/776 z dnia 16 maja 2019 r. zmieniające rozporządzenia Komisji (UE) nr 321/2013, (UE) nr 1299/2014, (UE) nr 1301/2014, (UE) nr 1302/2014 i (UE) nr 1303/2014, rozporządzenie Komisji (UE) 2016/919 oraz decyzję wykonawczą Komisji 2011/665/UE w odniesieniu do dostosowania do dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 oraz realizacji celów szczegółowych określonych w decyzji delegowanej Komisji (UE) 2017/1474.
- [12] Scenariusze Operacyjne – wymagania eksploatacyjne dla systemu ETMS/ETCS poziom 2 w wersji 2.3.0d.
- [13] Sieme, How digitalization is evolving intelligent rail infrastructure <http://https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/stories/how-digitalization-is-revolutionizing-rail-traffic.html?sitc=wwcgi10139>, dostęp 2020.11.
- [14] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., and Sui, F. 2018. Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (94:9-12), pp. 3563-3576 (doi: 10.1007/s00170-017-0233-1).
- [15] Register of Infrastructure <https://rinf.era.europa.eu/rinf/>.
- [16] Register of Infrastructure <https://rinf.era.europa.eu/rinf/>.
- [17] Unisig, SUBSET-026. System Requirements Specification. v. 3.6.0.
- [18] Wagner, R., Schleich, B., Haefner, B., Kuhnle, A., Wartzack, S., and Lanza, G. 2019. Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products, *Procedia CIRP* (84), pp. 88-93 (doi: 10.1016/j.procir.2019.04.219).
- [19] Wontorski P. Kochan A. , Elektroniczny system obiegu dokumentacji projektowej urzędzeń srk – wybrane zagadnienia, *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, vol. II, no. 2(116)*, pp. 143–156, 2018.
- [20] Van der Valk, Hendrik & Haße, Hendrik & Möller, Frederik & Arbter, Michael & Henning, Jan-Luca & Otto, Boris. (2020). A Taxonomy of Digital Twins.
- [21] Zhao, G., Cao, X., Xiao, W., Zhu, Y., and Cheng, K. 2019. Digital Twin for NC Machining Using Complete Process Information Expressed by STEP-NC Standard, in *Proceedings of the 2019 4th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering - CACRE2019*, New York, USA: ACM Press, pp. 1-6.

