

**A. NAUKA TRANSPORTOWA**

**A.10. TRWAŁOŚĆ I NIEZAWODNOŚĆ ŚRODKÓW TRANSPORTU**

**A.10.2. NOWOCZESNE METODY PROCESU OBSŁUGI, UTRZYMANIA ŚRODKÓW TRANSPORTU, „CYFROWY BLIŹNIAK”**

Autor: dr. hab. inż. Sylwia Werbińska-Wojciechowska, prof. uczelni  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

**1. Wprowadzenie**

Dynamika rynku transportowego i rosnące wymagania klientów stanowią istotne wyzwania dla firm transportowych w kontekście utrzymania trwałości i niezawodności środków transportu. Branża transportowa jest poddana ciągłym zmianom, wynikającym z szeregu czynników, takich jak rozwój technologii, zmieniające się regulacje, czy też trendy konsumenckie.

W ostatnich latach obserwujemy dynamiczny rozwój sektora transportowego, wynikający z postępującej globalizacji, wzrostu handlu międzynarodowego oraz rosnącej mobilności społeczeństwa. Firmy transportowe stają więc w obliczu wzmożonej konkurencji, zarówno ze strony tradycyjnych jak i nowych, innowacyjnych podmiotów. Dynamika rynku wymusza na nich ciągłe dostosowywanie się do zmieniających się warunków, a także poszukiwanie nowych rozwiązań i technologii, które pozwolą im utrzymać konkurencyjną pozycję.

Jednocześnie, rosnące wymagania klientów stawiane przed firmami transportowymi stają się coraz bardziej zróżnicowane. Klienci oczekują nie tylko szybkiego i terminowego dostarczenia towarów, ale także wysokiej jakości obsługi, bezpieczeństwa oraz elastyczności w dostosowaniu usług do indywidualnych potrzeb. Wysokie wymagania klientów sprawiają, że firma transportowa musi zadbać nie tylko o sprawne działanie swojej floty, ale także o jakość usług świadczonych na każdym etapie procesu transportowego. Wymaga to nie tylko realizacji szybkich i sprawnych procedur obsługi klienta, ale także posiadania nowoczesnej floty pojazdów wraz z efektywnym zarządzaniem ich utrzymaniem oraz szybkiej reakcji w sytuacjach awaryjnych. W tym kontekście jednym z kluczowych zagadnień staje się zapewnienie odpowiedniej trwałości i niezawodności floty transportowej.

Problematyka związana z utrzymaniem wysokiej trwałości i niezawodności floty transportowej stanowi istotne wyzwanie dla firm działających w branży transportowej z uwagi na dynamiczny charakter środowiska transportowego oraz różnorodność czynników wpływających na działanie pojazdów. Jednym z głównych problemów, związanych z utrzymaniem trwałości i niezawodności floty transportowej jest starzenie się floty pojazdów. Pojazdy transportowe są eksploatowane w różnych warunkach atmosferycznych i drogowych, co prowadzi do naturalnego zużycia i degradacji części mechanicznych oraz komponentów elektronicznych. Wraz z upływem czasu, wzrasta ryzyko wystąpienia awarii i przestojów, co negatywnie wpływa na efektywność operacyjną firmy transportowej.

Kolejnym istotnym problemem jest złożoność procesów obsługowych floty pojazdów. Wymagane jest regularne przeprowadzanie przeglądów technicznych oraz napraw w celu zapewnienia odpowiedniej gotowości operacyjnych oraz wymaganego poziomu bezpieczeństwa pojazdów. Zarządzanie wymienionymi procesami utrzymania floty zwykle jest zagadnieniem bardzo wymagającym i czasochłonnym, zwłaszcza w przypadku konieczności zapewnienia odpowiedniego poziomu utrzymania dużych flot transportowych, operujących na różnorodnych trasach i w różnych warunkach operacyjnych.

Dodatkowo, problemem jest również konieczność szybkiej reakcji w przypadku awarii i nieprzewidzianych sytuacji. Przerwy pojazdów mogą prowadzić do opóźnień w dostawach, co z kolei może generować koszty i negatywnie wpływać na reputację firmy transportowej. Dlatego też, skuteczne zarządzanie ryzykiem awarii i przestojów jest kluczowym elementem utrzymania wysokiej trwałości i niezawodności floty transportowej.

W związku z powyższym, firma transportowa musi podejmować odpowiednie środki zaradcze mające na celu minimalizację ryzyka awarii i przestojów oraz zapewnienie ciągłości operacyjnej swojej floty. Wdrożenie nowoczesnych metod i technologii, takich jak cyfrowy bliźniak czy systemy monitorowania stanu technicznego, może przyczynić się do poprawy efektywności procesów utrzymania floty transportowej oraz utrzymania zdolności operacyjnej przedsiębiorstwa na wymaganym poziomie. Inwestycje w nowoczesne rozwiązania technologiczne pozwalają na poprawę trwałości i niezawodności floty, minimalizację kosztów operacyjnych oraz zwiększenie konkurencyjności na rynku transportowym.

Jednym z kluczowych obszarów, w którym możliwe jest wykorzystanie nowoczesnych technologii, zwłaszcza z obszaru Przemysłu 4.0, jest zarządzanie danymi. Współczesne technologie umożliwiają zbieranie, przechowywanie i analizowanie ogromnych ilości danych dotyczących stanu technicznego pojazdów, tras przejazdu, zużycia paliwa czy też zachowań kierowców. Wykorzystanie zaawansowanych systemów zarządzania danymi pozwala na lepsze zrozumienie potrzeb floty, optymalizację tras oraz planowanie działań obsługowych.

Kolejnym obszarem jest monitorowanie stanu technicznego pojazdów. Wykorzystanie sensorów, systemów telematycznych oraz Internetu Rzeczy (IoT) umożliwia ciągle monitorowanie parametrów technicznych pojazdów w czasie rzeczywistym. Dzięki temu można szybko reagować na potencjalne problemy techniczne, minimalizując ryzyko awarii i przestojów.

Rozwój technologii mobilnych również ma istotny wpływ na efektywne zarządzanie flotą transportową. Aplikacje mobilne pozwalają na zdalne monitorowanie floty, komunikację z kierowcami oraz śledzenie statusu dostaw. To z kolei przekłada się na zwiększenie przejrzystości i kontrolę nad operacjami transportowymi oraz szybszą reakcję na zmieniające się warunki na drodze.

Wreszcie, nowe technologie, takie jak sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe czy cyfrowy bliźniak, oferują nowe możliwości w zakresie optymalizacji procesów obsługi i utrzymania floty pojazdów. Wykorzystanie tych zaawansowanych technologii pozwala na prognozowanie potencjalnych problemów technicznych, optymalizację tras oraz planowanie działań obsługowych z wyprzedzeniem.

W tym kontekście, w dalszej części pracy autorka skupiła się na przedstawieniu nowoczesnych metod obsługi i utrzymania środków transportu wraz z omówieniem głównych trendów rozwojowych w tym obszarze.

## **2. Nowoczesne metody obsługi i utrzymania środków transportu**

Procesy utrzymania środków transportu, w oparciu o normę EN 13306:2018 [54], obejmują kompleksowe działania techniczne, organizacyjne i zaradcze, mające na celu zapewnienie prawidłowego funkcjonowania lub odnowienie stanu (naprawa), w którym będą one mogły być używane do wypełnienia wymaganej funkcji.

Z kolei zarządzanie obsługiwaniem (*maintenance management*), zgodnie ze standardem EN 13306:2018 [54] jest określane jako wszystkie czynności zarządzania, które determinują cele i strategię obsługiwania, oraz ich wdrożenie poprzez odpowiednie narzędzia, jak: planowanie obsługi, kontrola i nadzór, doskonalenie metod w organizacji, wraz z uwzględnieniem ekonomiki działania.

W oparciu o przedstawione definicje, możemy stwierdzić, iż główne cele utrzymania systemów technicznych, w tym systemów transportowych, są powiązane z [44]:

- zapewnieniem podstawowych parametrów funkcjonalnych obiektu (np. gotowość, sprawność, nieszkodzalność),

- efektywnym zarządzaniem zasobami, pozwalającym na zapewnienie wymaganej trwałości obiektu,
- zapewnieniem efektywnego wykorzystania zasobów, energii oraz surowców/części wymiennych,
- zapewnieniem bezpieczeństwa obiektu technicznego, człowieka oraz otoczenia,
- przy uwzględnieniu wymagań ekonomicznych realizowanego procesu eksploatacji.

W ramach obsługi środków transportu przeprowadza się różnorodne czynności, takie jak m.in. operacje konserwacji, naprawy, diagnostyka pojazdów czy zaopatrzenie w paliwo. Głównym celem tych działań jest utrzymanie pojazdów w dobrym stanie technicznym, zapewnienie bezpieczeństwa podróży oraz minimalizacja ryzyka awarii i przestojów.

Wraz z postępowaniem technologicznym, rozwijają się nowoczesne metody obsługi i utrzymania środków transportu, które pozwalają na bardziej efektywne zarządzanie flotą pojazdów. Do najważniejszych z nich należą [15,37,46]:

1. **Automatyzacja procesów diagnostycznych:** Wykorzystanie zaawansowanych systemów diagnostycznych opartych na sztucznej inteligencji i analizie danych, aby szybko wykrywać i identyfikować problemy techniczne w pojazdach.
2. **Użycie sensorów i Internetu Rzeczy (IoT):** Montaż sensorów w pojazdach oraz wykorzystanie Internetu Rzeczy (IoT) do ciągłego monitorowania stanu technicznego, zużycia paliwa, temperatury itp., co umożliwi szybką reakcję na problemy i optymalizację działania pojazdów.
3. **Wykorzystanie danych prognostycznych i analitycznych:** Analiza danych historycznych oraz prognozowanie potencjalnych usterek lub awarii przy użyciu zaawansowanych narzędzi analitycznych, co pozwala na planowanie działań konserwacyjnych z wyprzedzeniem.
4. **Implementacja cyfrowego bliźniaka:** Stworzenie cyfrowego modelu każdego pojazdu, który jest odzwierciedleniem jego fizycznej postaci i zachowania. Dzięki temu można symulować różne scenariusze oraz przewidywać zachowanie pojazdu w różnych warunkach.
5. **Zastosowanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego:** Wykorzystanie zaawansowanych algorytmów sztucznej inteligencji do analizy danych telemetrycznych oraz uczenia maszynowego w celu identyfikacji wzorców i prognozowania awarii.
6. **Zastosowanie technologii blockchain:** technologia blockchain zapewnia bezpieczne i niezmiennie przechowywanie danych. W kontekście utrzymania środków transportu, może to obejmować m.in. przechowywanie historii serwisowej pojazdów, raportów z przeglądów technicznych, czy nawet danych dotyczących ubezpieczeń.
7. **Rozwój technologii mobilnych:** Wykorzystanie aplikacji mobilnych do monitorowania floty, komunikacji z kierowcami, śledzenia trasy oraz szybkiej reakcji na zmiany w planach trasowych.

Wymieniając nowoczesne technologie, które mają duży wpływ na procesy zarządzania utrzymaniem środków transportu, nie można pominąć koncepcji pojazdów autonomicznych. W kontekście utrzymania technicznego, wykorzystanie pojazdów autonomicznych wiąże się z [1]:

- **Monitorowaniem i diagnostyką:** Pojazdy autonomiczne mogą być wyposażone w zaawansowane sensory i systemy diagnostyczne, które monitorują stan techniczny pojazdu w czasie rzeczywistym. Dzięki temu można szybko wykrywać i identyfikować problemy techniczne oraz planować działania obsługowe z wyprzedzeniem.
- **Procesami samodiagnozy i naprawy:** Niektóre pojazdy autonomiczne, wykorzystując zaawansowane algorytmy sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, mogą identyfikować i rozwiązywać proste problemy techniczne bez konieczności ingerencji człowieka.
- **Zarządzaniem flotą:** Wprowadzenie pojazdów autonomicznych do flot transportowych może znacząco zwiększyć efektywność operacyjną i obniżyć koszty utrzymania floty. Pojazdy

autonomiczne mogą być programowane do optymalizacji tras, minimalizacji zużycia paliwa oraz eliminacji niepotrzebnych przestojów i błędów ludzkich.

- **Automatyzacją aktualizacji oprogramowania:** Pojazdy autonomiczne mogą być zdolne do automatycznych aktualizacji oprogramowania, co pozwala na szybką implementację nowych funkcji, poprawek bezpieczeństwa oraz aktualizacji systemów diagnostycznych. To zapewnia, że pojazdy zawsze są zaktualizowane i gotowe do pracy.
- **Przyjętym utrzymaniem floty:** Wykorzystując dane telemetryczne z pojazdów autonomicznych oraz zaawansowane algorytmy analizy danych, można przewidywać przyszłe potrzeby obsługowe i planować działania utrzymania floty z wyprzedzeniem. To pozwala na minimalizację ryzyka awarii oraz ograniczenie przestojów i kosztów napraw.

Te nowoczesne metody obsługi i utrzymania środków transportu przynoszą liczne korzyści, takie jak poprawa trwałości i niezawodności floty, minimalizacja przestojów, optymalizacja kosztów operacyjnych oraz zwiększenie bezpieczeństwa podróży. Dlatego też, firmy transportowe coraz częściej sięgają po te nowoczesne technologie, aby efektywniej zarządzać swoimi środkami transportu. W kolejnym punkcie została szczegółowo omówiona rola cyfrowego bliźniaka w zarządzaniu eksploatacją środków transportu.

### **3. Rola cyfrowego bliźniaka w zapewnieniu trwałości i niezawodności środków transportu**

Digital Twin (DT) jest jedną z kluczowych technologii Przemysłu 4.0. O historii powstawania technologii i ewolucji jej koncepcji do obecnej formy można przeczytać m.in. w pracach [8,32,43,45,50].

Koncepcja DT jest stosunkowo nowa dlatego nie utworzono jeszcze jednej spójnej definicji. Często stosowane w literaturze definicje wyraźnie ukierunkowane są na branżę czy gałąź transportu dla której są opracowywane. Na podstawie dokładnej analizy definicji przedstawionych przez D. Jones [24] na potrzeby tej pracy przyjęto, że Digital Twin (DT) jest *połączeniem rozwijających się technologii Przemysłu 4.0 takich jak współdzielenie danych, symulacji, monitorowania w czasie, analizy danych i optymalizacji*. Połączenie tych technologii ma na celu w czasie rzeczywistym monitorowanie, kontrolowanie, przewidywanie, optymalizację, a także bardziej świadome i szybsze podejmowanie decyzji operacyjnych [39].

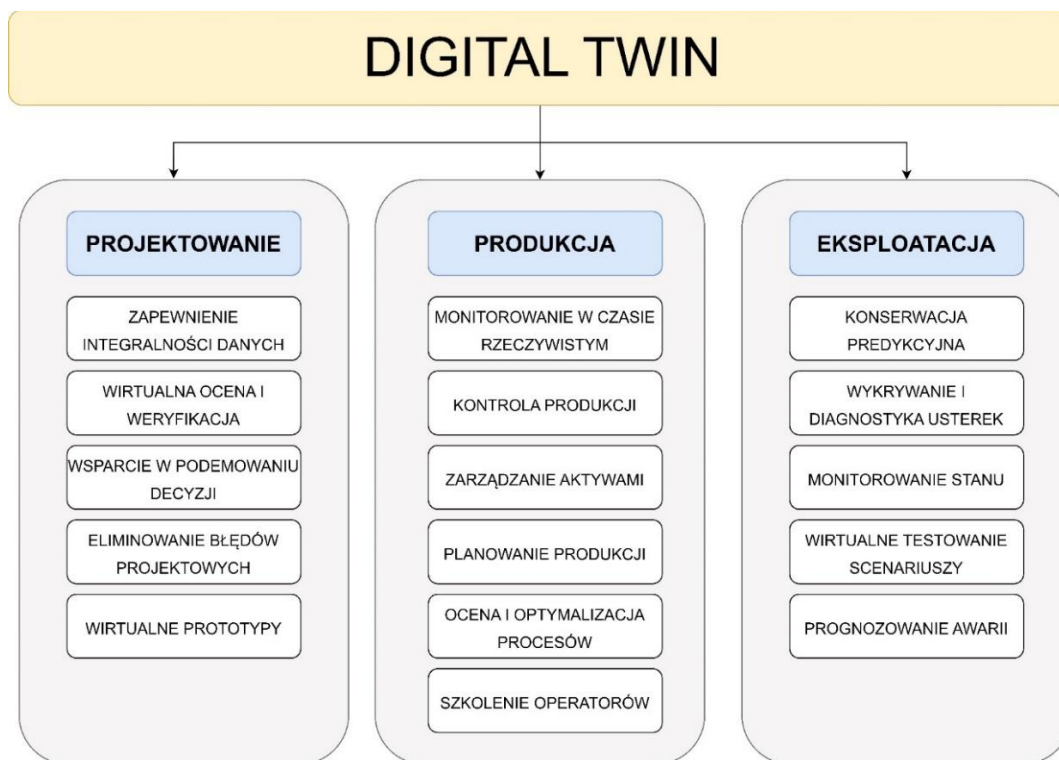
Cyfrowy bliźniak dowolnego obiektu w podstawowej wersji budowany jest z trzech podstawowych elementów: obiektu fizycznego (zasób/asset), wirtualnej reprezentacji obiektu (model) oraz połączenia między nimi [55]. Odzwierciedlanym obiektem może być m.in. produkt, proces lub system. Dodatkowo, cechą wyróżniającą cyfrowy bliźniak jest funkcja automatycznego współdzielenia danych (komunikacja dwukierunkowa) w czasie rzeczywistym między fizycznym obiektem, a cyfrowym odpowiednikiem [43,45]. Jest to czynnik, który odróżnia Digital Twin od modelu cyfrowego - Digital Model (DM) czy tzw. cyfrowego cienia - Digital Shadow (DS) [48].

Koncepcja DT stale ewoluuje ze względu na postępujący rozwój technologii, potrzeb przemysłu i potrzeb użytkowników, przez co możliwości jego wykorzystania zmieniały się na przestrzeni ostatnich kilku lat [43]. Przykłady implementacji koncepcji DT w praktyce można znaleźć m.in. w [4,5,16,24,55]. Najwięcej publikacji dotyczących obszarów implementacji DT jest związanych z obszarem produkcji. Jednak coraz częściej pojęcie to pojawia się także w rolnictwie czy medycynie. Poza branżami technicznymi, DT znajduje zastosowanie m.in. w psychologii.

Również warty podkreślenia jest zakres zastosowania koncepcji DT w kontekście faz cyklu życia obiektów fizycznych. Obecnie, DT znajduje zastosowanie w całym cyklu życia obiektu fizycznego, począwszy od fazy projektowania, przez fazę produkcji i eksploatacji, aż do jego utylizacji [55]. DT może towarzyszyć swojemu rzeczywistemu bliźniakowi od początkowych etapów jego powstawania, dlatego korzystne jest rozróżnienie etapów rozwoju DT w całym cyklu życia obiektu.

Pierwszym etapem cyklu życia DT jest Digital Twin Prototype (DTP). Jest on przeznaczony dla faz tworzenia obiektu. Na tym etapie obiekt rzeczywisty jeszcze nie istnieje, jest on dopiero w fazach koncepcji i projektowania w przestrzeni wirtualnej jako DTP. To na podstawie informacji pochodzących z DTP powstaje obiekt fizyczny, który jest duplikatem wersji cyfrowej. Etapem dojrzałości DT odpowiadającym fazie eksploatacji i użyciu obiektu rzeczywistego jest Digital Twin Instance (DTI). DTI jest odzwierciedleniem konkretnego fizycznego obiektu i ewoluuje przez cały jego okres eksploatacji aż do fazy użycia. Zawiera on przeszłe, bieżące i przewidywane dane operacyjne oraz zapisy przeprowadzonych akcji serwisowych.

Na rysunku 1 przedstawiono zakres implementacji DT w poszczególnych fazach życia obiektu.



Rys. 1. Zastosowanie koncepcji DT w cyklu życia obiektu  
Opracowane na podstawie [11,55]

Od roku 2019 można zaobserwować wyraźny wzrost liczby publikacji w kontekście projektowania i implementacji koncepcji cyfrowych bliźniaków w kontekście zapewnienia ciągłości operacyjnej systemów transportowych. Cyfrowy bliźniak transportu - Transportation Digital Twin (TDT) można zdefiniować jako cyfrową reprezentację fizycznych elementów systemu transportowego reagującą na zmiany w czasie rzeczywistym. Odzworowywane są cyfrowo zarówno zasoby transportowe jak i połączone z nimi usługi, które nie są związane z transportem [23].

Koncepcja TDT ta znajduje zastosowanie we wszystkich gałęziach transportu. W transporcie morskim stosowany jest obecnie do przewidywania potencjalnych awarii, optymalizacji zadań floty, portów i terminali oraz kompleksowej optymalizacji łańcucha dostaw [35,56]. W transporcie lotniczym TDT może być wykorzystany m.in. do sterowania systemem transportowym lotniska [41]. Szeroko opisywana jest także gałąź transportu lądowego. TDT znajduje zastosowanie zarówno w transporcie dalekim (kolejowym czy drogowym) jak i bliskim. W transporcie kolejowym autorzy proponują wykorzystanie DT do monitorowania rozjazdów kolejowych, zwiększenia przepustowości w sieciach kolejowych a także możliwość ogólnego zarządzania sektorem kolejowym [14,26,38]. Szeroko omawianym obszarem zastosowań TDT jest transport drogowy, gdzie TDT jest wykorzystywany m.in. do planowania transportu miejskiego, obliczania zalecanej prędkości pojazdu, sterowania sygnalizacją świetlną, wizualizacji możliwych scenariuszy czy

zwiększenia bezpieczeństwa na drogach [13,20,28,30,40]. W transporcie wewnętrznym najczęściej TDT jest wykorzystywany w zakresie planowania, optymalizacji procesów transportowych i planowania trasy pojazdu [17,19,31].

Mimo iż infrastruktura transportowa stopniowo przystosowuje się do nowych technologii to zastosowania DT w inżynierii transportowej są aktualnie na początkowym etapie [10,13]. Główne cele wykorzystania DT w transporcie obejmują zwiększenie bezpieczeństwa oraz mobilności systemów transportowych [23]. Pierwsze artykuły przeglądowe w tym obszarze pojawiły się w roku 2020 i skupiały się na wybranych obszarach aplikacyjnych. Pierwszy artykuł przeglądowy dotyczący wykorzystania DT w transporcie opisuje zastosowanie technologii DT w lotnictwie, robotyce i produkcji [36]. Z kolei artykuł [27] skupił się na pięciu głównych nurtach współczesnych badań, dotyczących zastosowania DT w systemach transportu wewnętrznego. Szerszej analizie poddano 34 publikacje. Podczas tej analizy skupiono się na wykorzystaniu DT w optymalizacji. Zauważono, że DT są głównie budowane w celu zwiększenia wydajności obiektu rzeczywistego oraz aby lepiej reagować, kiedy pojawią się zakłócenia spowodowane zdarzeniami losowymi. Autorzy [49] zaproponowali systematyczny przegląd literatury dotyczący obecnych zastosowań DT w sieciach transportu kolejowego i drogowego. Wyniki analizy wskazały, że większość zastosowań DT w tym sektorze dotyczy eksploatacji i utrzymania. Kolejny artykuł przeglądowy poświęcony jest sektorowi transportu morskiego [3]. DT statku najczęściej używany jest do planowania konserwacji, przewidywania występowania awarii czy optymalizacji procesów operacyjnych realizowanych na statku. Jednak autorzy podkreślają, że największym wyzwaniem w wykorzystaniu DT statku jest komunikacja w czasie rzeczywistym z obiektem fizycznym. W [23] analizowano publikacje koncentrujące się na bezpieczeństwie i mobilności transportu. Autorzy zaproponowali także koncepcję DT dla systemów transportowych. Autorzy [25] przedstawili w swojej publikacji aktualne kierunki rozwoju DT w logistyce produkcji. Z kolei w [2] autorzy skupili się na analizie możliwości aplikacji DT w elektrycznych pojazdach autonomicznych. Analizowane artykuły dotyczyły problematyki ładowania baterii, kwestii doświadczenia kierowcy, a także monitorowania i kontrolowania pojazdu.

W kontekście implementacji DT w zakresie wsparcia procesów zarządzania utrzymaniem technicznym środków transportu możemy wyróżnić kilka kluczowych obszarów, w których podejście cyfrowego bliźniaka znajduje szerokie zastosowanie:

- **monitorowanie stanu technicznego:** cyfrowy bliźniak umożliwia ciągłe monitorowanie stanu technicznego pojazdów oraz infrastruktury transportowej. Dzięki zaawansowanym sensorom i technologiom IoT, DT może zbierać dane dotyczące zużycia części, parametrów pracy silników, czy nawet warunków drogowych. To pozwala na szybką identyfikację potencjalnych problemów technicznych i awarii [12,18].
- **prognozowanie awarii:** na podstawie zebranych danych, DT może przeprowadzać analizy predykcyjne, prognozując przyszłe awarie i problemy techniczne. Dzięki temu można planować działania obsługowe z wyprzedzeniem, unikając przestojów i kosztownych napraw [6,7].
- **optymalizacja planów i harmonogramów obsługi technicznej:** wykorzystując dane z cyfrowego bliźniaka, można opracować bardziej efektywne plany utrzymania technicznego (harmonogramowanie obsługi). DT pozwala na indywidualne dostosowanie harmonogramów przeglądów i napraw do faktycznego stanu technicznego pojazdów, co przyczynia się do redukcji kosztów utrzymania floty transportowej [21].
- **symulacja i testowanie nowych rozwiązań:** cyfrowy bliźniak umożliwia symulowanie różnych scenariuszy eksploatacji oraz testowanie nowych rozwiązań technologicznych przed ich wdrożeniem w rzeczywistych warunkach. To pozwala na ocenę potencjalnych korzyści i ryzyka związanych z wprowadzeniem innowacji technologicznych w zakresie działalności operacyjnej floty transportowej [9,42].
- **optymalizacja zużycia paliwa i wydajności operacyjnej:** DT może być wykorzystywany do analizy i optymalizacji zużycia paliwa oraz poprawy efektywności operacyjnej pojazdów. Poprzez monitorowanie parametrów pracy silników, stylu jazdy kierowców oraz warunków

drogowych, DT pozwala na identyfikację obszarów wymagających doskonalenia i wprowadzanie efektywnych strategii oszczędzania paliwa [52,53].

- **predycyjne planowanie zapasów:** DT umożliwia przeprowadzanie analiz prognostycznych dotyczących zużycia części i materiałów eksploatacyjnych w pojazdach. Dzięki temu można optymalizować poziom zapasów, minimalizując ryzyko braków materiałów podczas przeglądów i napraw [22,29].
- **zdalne wsparcie techniczne:** Wykorzystując zdalne połączenia i interfejsy cyfrowe, DT pozwala na udzielanie wsparcia technicznego przez ekspertów z dowolnego miejsca na świecie. To umożliwia szybką diagnozę problemów oraz udzielanie wskazówek i instrukcji naprawczych w czasie rzeczywistym [34].
- **analiza danych operacyjnych monitorowanej floty:** DT umożliwia analizę danych zbieranych z całej floty pojazdów, co pozwala na identyfikację trendów i wzorców dotyczących awaryjności, zużycia paliwa czy stylu jazdy kierowców. Te informacje mogą być wykorzystane do wprowadzania usprawnień i optymalizacji procesów zarządzania flotą [51].
- **integracja z systemami zarządzania:** cyfrowy bliźniak może być zintegrowany z istniejącymi systemami zarządzania flotą i utrzymaniem technicznym, co umożliwia automatyczne przesyłanie danych oraz współpracę między różnymi platformami i aplikacjami. To przyczynia się do usprawnienia pracy oraz poprawy spójności i dostępności danych [47].
- **bezpieczeństwo i zgodność z regulacjami:** wdrażanie DT w obszarze zarządzania utrzymaniem technicznym wymaga uwzględnienia kwestii związanych z bezpieczeństwem danych oraz zgodnością z przepisami regulacyjnymi, takimi jak ochrona danych osobowych czy wymogi dotyczące bezpieczeństwa pracy. Zapewnienie odpowiednich środków ochrony danych oraz przestrzeganie obowiązujących regulacji jest kluczowe dla skutecznej implementacji DT [33].

Warto zauważyć, że implementacja cyfrowego bliźniaka w obszarze wsparcia procesów zarządzania utrzymaniem technicznym środków transportu przyczynia się do zwiększenia niezawodności, trwałości oraz efektywności floty transportowej. Dzięki ciągłemu monitorowaniu i analizie danych, DT umożliwia szybką reakcję na zmiany warunków eksploatacji oraz skuteczne planowanie działań obsługowych, co przekłada się na zadowolenie klientów, obniżenie kosztów operacyjnych oraz zwiększenie konkurencyjności firmy na rynku transportowym.

#### 4. Trendy rozwojowe w obszarze utrzymania środków transportu

Pomimo wyraźnego rozwoju nowoczesnych technologii i ich zastosowania w branży transportowej, obserwowanego na przestrzeni ostatnich pięciu lat, nadal możemy wskazać potencjał do dalszego rozwoju w obszarze utrzymania środków transportu. Istnieje wiele aspektów, które mogą być poddane innowacjom, obejmując zarówno technologiczne, jak i organizacyjne rozwiązania. Obecnie, podstawowe kierunki rozwoju obejmują takie obszary, jak:

- **diagnostyka predycyjna:** Rozwój zaawansowanych systemów diagnostycznych opartych na sztucznej inteligencji i analizie danych pozwala na prognozowanie awarii z wyprzedzeniem. Dzięki temu możliwe jest planowanie działań konserwacyjnych zanim problem wystąpi, co minimalizuje przestoje i koszty napraw.

W analizowanym obszarze główne trendy rozwojowe obejmują m.in. zastosowanie zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego. Wykorzystanie zaawansowanych technik uczenia maszynowego, takich jak algorytmy regresji, sieci neuronowe czy drzewa decyzyjne, pozwala na dokładniejszą analizę danych oraz identyfikację wzorców i anomalii, które mogą wskazywać na potencjalne awarie. Dzięki temu możliwe jest bardziej precyzyjne prognozowanie przyszłych problemów technicznych.

Kolejny szeroko dziś analizowany obszar to integracja z systemami monitorowania pojazdów. Diagnostyka predycyjna może być efektywnie wykorzystywana w połączeniu z systemami monitorowania stanu technicznego pojazdów. Dzięki integracji danych z różnych źródeł, takich

jak czujniki, systemy telemetryczne czy bazy danych serwisowych, możliwe jest uzyskanie kompleksowego obrazu stanu technicznego floty transportowej. Z drugiej strony, nowoczesne rozwiązania idą w kierunku zapewnienia komunikacji dwukierunkowej na linii pojazd-serwer. Istotnym elementem diagnostyki predykcyjnej jest również optymalizacja procesu zbierania, przechowywania i przetwarzania danych. Konieczne jest skoncentrowanie się na kluczowych parametrach technicznych i czynnikach wpływających na awaryjność pojazdów, aby uzyskać najbardziej istotne informacje dla procesu prognozowania awarii. W tym obszarze również coraz większe znaczenie mają rozwiązania oparte na technologii blockchain oraz rozwiązania oparte na chmurze.

- **automatyzacja procesów obsługowych:** Wdrażanie robotyzacji i automatyzacji w procesach obsługiwanym może przynieść wiele korzyści, takich jak poprawa efektywności, dokładności wykonania zadania i eliminacja błędów ludzkich. Roboty mogą być wykorzystywane do wykonywania rutynowych zadań obsługowych, co pozwala pracownikom skupić się na bardziej zaawansowanych zadaniach.

W tym obszarze głównym kierunkiem rozwoju jest wykorzystanie robotów, dronów i automatycznych urządzeń do wykonywania rutynowych zadań obsługowych, takich jak inspekcja mechaniczna, czyszczenie, lub nawet drobne naprawy.

Kolejnym trendem jest implementacja zaawansowanych systemów wsparcia decyzji opartych na sztucznej inteligencji i analizie danych, która pozwala na optymalizację planowania i wykonywania działań obsługowych. Systemy te mogą proponować optymalne harmonogramy przeglądów i napraw, uwzględniając priorytety, koszty i dostępność zasobów. Automatyzacja procesów przeglądów technicznych może przyspieszyć ich wykonywanie oraz zwiększyć ich dokładność. Wykorzystanie zaawansowanych technologii, takich jak systemy wizyjne, czy urządzenia pomiarowe, pozwala na szybką i precyzyjną ocenę stanu technicznego pojazdów, co ułatwia identyfikację problemów i planowanie działań naprawczych. W tym kontekście poszukiwane są nowe rozwiązania z zakresu tzw. inteligentnej obsługi (*smart maintenance*) czy proaktywnego podejścia do utrzymania ruchu (*proactive maintenance*).

- **zintegrowane zarządzanie zapasami:** Wykorzystanie technologii IoT i systemów zarządzania magazynem pozwala na lepsze monitorowanie i optymalizację poziomu zapasów części zamiennych i materiałów eksploatacyjnych. To umożliwia uniknięcie braków materiałów w czasie napraw oraz zmniejszenie kosztów związanych z nadmiernym magazynowaniem.

Kolejnym krokiem w budowaniu zintegrowanych systemów zarządzania zapasami, po implementacji technologii RFID (*Radio-Frequency Identification*), jest wprowadzenie systemów monitorowania zużycia części. Technologie typu RFID pozwalają na precyzyjne śledzenie lokalizacji i stanu części zamiennych w magazynach. Dzięki temu możliwe jest szybkie zlokalizowanie potrzebnych części oraz minimalizacja ryzyka braków materiałów podczas przeglądów i napraw. Natomiast, systemy monitorowania zużycia części umożliwiają ciągłe śledzenie ich stanu technicznego oraz prognozowanie potrzeb wymiany. Dzięki temu możliwe jest planowanie działań obsługowych z wyprzedzeniem oraz optymalizacja poziomu zapasów, co przyczynia się do redukcji kosztów utrzymania floty.

Również w tym obszarze można wyróżnić trend związany z integracją systemów zarządzania zapasami z systemami diagnostycznymi oraz implementacją technologii IoT, co umożliwi automatyczne generowanie zamówień na części zamienne w oparciu o diagnozę stanu technicznego pojazdów. Dzięki temu możliwe jest szybkie reagowanie na sygnały alarmowe i minimalizacja przestoju związanych z brakami materiałów.

- **technologie mobilne i zdalne wsparcie:** Rozwój aplikacji mobilnych oraz zdalnych systemów wsparcia technicznego umożliwia szybką diagnozę problemów i udzielanie wskazówek naprawczych z dowolnego miejsca. To zwiększa efektywność działań konserwacyjnych i redukuje czas przestoju pojazdów.



Podstawą dzisiejszych proaktywnych systemów utrzymania ruchu jest wykorzystanie aplikacji mobilnych w pracy personelu serwisowego. Dzięki temu personel serwisowy posiada szybki dostęp do niezbędnych danych, instrukcji obsługi oraz planów napraw. Aplikacje te mogą również umożliwiać zgłaszanie awarii, rejestrację czasu pracy oraz komunikację z innymi członkami zespołu, co zwiększa efektywność działań obsługowych.

Kolejnym krokiem jest projektowanie i implementacja systemów zdalnego wsparcia technicznego, pozwalających na szybką zdalną diagnozę problemów oraz udzielenie wskazówek naprawczych przez specjalistów z dowolnego miejsca. Wykorzystanie narzędzi takich jak wideokonferencje, zdalny dostęp do systemów diagnostycznych pozwalają na skuteczne rozwiązywanie problemów nawet w przypadku oddalonych lokalizacji pojazdów. Również w tym obszarze mówi się o coraz szerszym wykorzystaniu technologii rozszerzonej czy wirtualnej rzeczywistości w zakresie wsparcia technicznego pracownika podczas realizacji przez niego podstawowych zadań operacyjnych oraz w ramach szkoleń. Dzięki temu możliwe jest ciągłe podnoszenie kwalifikacji pracowników oraz dostosowywanie szkoleń do indywidualnych potrzeb i umiejętności.

- **projektowanie i wdrażanie podejścia opartego na cyfrowym bliźniaku:** Implementacja Cyfrowego Bliźniaka pozwala na symulację i monitorowanie zachowania pojazdów w czasie rzeczywistym, co umożliwia lepsze zrozumienie procesów eksploatacji i identyfikację obszarów do poprawy.

W obszarze projektowania i implementacji systemów zarządzania eksploatacją floty pojazdów główne kierunki rozwoju będą wiązały się z rozwijaniem modeli optymalizacyjnych oraz prognostycznych pod kątem minimalizacji kosztów oraz podnoszenia efektywności operacyjnej systemów transportowych. Ponadto, opracowania literaturowe jak i praktyczne wdrożenia wskazują na konieczność wypracowania rozwiązań pozwalających na współpracę międzywydziałową oraz integrację danych. Wdrożenie Cyfrowego Bliźniaka wymaga współpracy między różnymi działami firmy oraz integracji danych z różnych systemów informatycznych. Dzięki odpowiednim rozwiązaniom technologicznym możliwe jest uzyskanie kompleksowego obrazu stanu technicznego floty oraz efektywna koordynacja działań obsługowych na wszystkich poziomach organizacji.

Jednocześnie, podstawowe innowacje w zakresie projektowania i implementacji nowoczesnych technologii w obszarze zapewnienia niezawodności i trwałości środków transportu będą obejmować:

- **innowacje technologiczne:** gdzie firmy transportowe będą wprowadzać nowe technologie, jak sztuczna inteligencja, robotyka czy Internet Rzeczy, w celu poprawy efektywności i niezawodności procesów obsługowych.
- **innowacje organizacyjne:** ukierunkowane na wprowadzenie nowych metod zarządzania, procedur pracy czy modeli biznesowych (np. Software as a Service), które umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie zasobów i zwiększenie efektywności działań obsługowych.
- **innowacje procesowe:** skupiające się na optymalizacji istniejących procesów utrzymania technicznego oraz na wprowadzeniu nowych strategii i narzędzi, które umożliwiają szybsze reagowanie na zmiany warunków eksploatacji i minimalizację ryzyka awarii.

Podsumowując, kilka podstawowych ograniczeń i problemów, jakie należy uwzględnić przy opracowywaniu i wdrażaniu nowoczesnych technologii w zakresie utrzymania systemów technicznych, obejmuje:

- **problemy w zakresie diagnostyki technicznej:** konieczność monitorowania i gromadzenia znacznej ilości informacji oraz przetwarzania tych informacji dla celów zapewnienia odpowiedniego raportowania.
- **koszty inwestycyjne:** wdrażanie nowoczesnych technologii wymaga dużych nakładów finansowych, które będą widoczne poprzez minimalizację kosztów napraw i przestojów

pojazdów dzięki lepszemu planowaniu i wykorzystaniu dostępnych zasobów. Problem rentowności inwestycji może ograniczać przedsiębiorstwa.

- **bezpieczeństwo w procesie gromadzenia i przesyłu danych:** kwestie zapewnienia bezpieczeństwa przesyłanych danych oraz minimalizacja ryzyka cyberataku są dziś jednym z kluczowych aspektów, które należy rozpatrzyć w kontekście wdrożenia technologii Przemysłu 4.0.

## 5. Podsumowanie

Podkreślenie znaczenia nowoczesnych metod obsługi, utrzymania oraz roli cyfrowego bliźniaka w kontekście trwałości i niezawodności floty transportowej jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i efektywności w transporcie. Wykorzystanie zaawansowanych technologii, takich jak IoT, sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe, umożliwia szybkie diagnozowanie problemów, przewidywanie awarii i optymalizację procesów konserwacyjnych. Cyfrowy bliźniak staje się niezbędnym narzędziem w monitorowaniu i symulowaniu zachowań pojazdów, co pozwala na skuteczną prewencję i zarządzanie ryzykiem.

Zwrócenie uwagi na potrzebę adaptacji do zmieniającego się krajobrazu technologicznego jest kluczowym elementem w efektywnym zarządzaniu środkami transportu. Firmy transportowe muszą być gotowe na szybkie wdrażanie nowych rozwiązań technologicznych, aby sprostać rosnącym wymaganiom klientów i utrzymać konkurencyjność na rynku. Adaptacja do zmian technologicznych pozwoli na ciągłe doskonalenie procesów obsługi i utrzymania, co przyczyni się do zwiększenia trwałości i niezawodności floty transportowej.

Zachęta do dalszej dyskusji i współpracy w zakresie poprawy trwałości i niezawodności środków transportu jest istotna dla rozwoju branży transportowej. Wymiana doświadczeń, wspólna identyfikacja wyzwań oraz poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań pozwolą na kontynuację procesu doskonalenia obsługi i utrzymania floty. Współpraca między różnymi podmiotami w branży, w tym producentami pojazdów, serwisami technicznymi i instytucjami badawczymi, może przyczynić się do wprowadzania nowych technologii oraz tworzenia standardów, które podniosą jakość i bezpieczeństwo transportu.

Podsumowując, nowoczesne metody obsługi, utrzymania oraz rola cyfrowego bliźniaka są kluczowymi czynnikami w zapewnieniu trwałości i niezawodności floty transportowej. Adaptacja do zmieniającego się krajobrazu technologicznego oraz współpraca między różnymi podmiotami w branży są niezbędne do dalszego doskonalenia procesów obsługi i utrzymania floty. Dalsza dyskusja i współpraca mogą przyczynić się do wprowadzania innowacyjnych rozwiązań, które zapewnią bezpieczną i efektywną infrastrukturę transportową dla przyszłych generacji.

## Bibliografia

- [1] W.A. Ali, M. Roccotelli, M.P. Fanti, Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review, 2022 8th Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2022. (2022) 576–581.
- [2] W.A. Ali, M. Roccotelli, M.P. Fanti, Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review, in: 2022 8th Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2022, 2022: pp. 576–581.
- [3] N. Assani, P. Matić, M. Katalinić, Ship's Digital Twin—A Review of Modelling Challenges and Applications, Appl. Sci. 12 (2022).
- [4] B.R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli, A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications, IEEE Access. 7 (2019) 167653–167671.
- [5] A. van Beek, V. Nevile Karkaria, W. Chen, Digital twins for the designs of systems: a perspective, Struct. Multidiscip. Optim. 66 (2023) 1–17.
- [6] E. Bernal, M. Spiryagin, E. Vollebregt, K. Oldknow, S. Stichel, S. Shrestha, S. Ahmad, Q. Wu, Y. Sun, C. Cole, Prediction of rail surface damage in locomotive traction operations using laboratory-field measured and calibrated data, Eng. Fail. Anal. 135 (2022) 106165.
- [7] R. Bhagavathi, Predictive Digital Twin of an Unmanned Surface Vehicle with Actuator Fault

Diagnosis on Otter USV as a demonstrative feature, Norwegian University of Science and Technology, 2022.

- [8] H. Boyes, T. Watson, Digital twins: An analysis framework and open issues, *Comput. Ind.* 143 (2022) 103763.
- [9] A. Busse, B. Gerlach, J.C. Lengeling, P. Poschmann, J. Werner, S. Zarnitz, Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains, *Logistics*. 5 (2021).
- [10] H. Cruz, Digital Twin Technology Applications For Transportation Infrastructure - A Survey-Based Study, *Open Access Theses Diss.* 3234 (2021).
- [11] A. Dąbrowska, R. Giel, K. Winiarska, Sequencing and Planning of Packaging Lines With Reliability and Digital Twin Concept Considerations – a Case Study of a Sugar Production Plant, *Logforum*. 18 (2022) 321–334.
- [12] A. Danielsen-Haces, Digital Twin Development - Condition Monitoring and Simulation Comparison for the ReVolt Autonomous Model Ship, (2018) 77.
- [13] S. Dasgupta, M. Rahman, A.D. Lidbe, W. Lu, S. Jones, A transportation digital-twin approach for adaptive traffic control systems, *ArXiv Prepr. ArXiv2109.10863.* (2021).
- [14] I. Errandonea, J. Goya, U. Alvarado, S. Beltron, S. Arrizabalaga, IoT Approach for Intelligent Data Acquisition for Enabling Digital Twins in the Railway Sector, *Proc. - 2021 Int. Symp. Comput. Sci. Intell. Control. ISCSIC 2021.* (2021) 164–168.
- [15] O.Ö. Ersöz, A.F. İnal, A. Aktepe, A.K. Türker, S. Ersöz, A Systematic Literature Review of the Predictive Maintenance from Transportation Systems Aspect, *Sustain.* 14 (2022).
- [16] X. Fang, H. Wang, G. Liu, X. Tian, G. Ding, H. Zhang, Industry application of digital twin: from concept to implementation, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 121 (2022) 4289–4312.
- [17] J.S. Felix-Cigalat, R. Domingo, Towards a Digital Twin Warehouse through the Optimization of Internal Transport, *Appl. Acoust.* 13 (2023).
- [18] A. Gálvez, J. Rubio, D. Seneviratne, A. Gonzalez, A. Jimenez, U. Martinez-de-estarrona, D. Galar, E. Juuso, Hybrid Models and Digital Twins for Condition Monitoring: HVAC System for Railway, *SNE Tech. Note.* 31 (2021) 121–126.
- [19] M. Ganesh, A.M. Rizvi, A. Anbu, Digital Twin framework for material handling and logistics in manufacturing: Part 1, in: *2022 Int. Conf. Connect. Syst. Intell., IEEE, 2022.*
- [20] Y. Guo, K. Zou, S. Chen, F. Yuan, F. Yu, 3D Digital Twin of Intelligent Transportation System based on Road-Side Sensing, *J. Phys. Conf. Ser.* 2083 (2021).
- [21] Q. Hao, Y. Lv, A Digital Twin-Based Production-Maintenance Joint Scheduling Framework with Reinforcement Learning, *2023 8th Int. Conf. Control Robot. Eng.* (2023) 51–56.
- [22] G.T.S. Ho, Y.M. Tang, K. yat Tsang, V. Tang, K.Y. Chau, A blockchain-based system to enhance aircraft parts traceability and trackability for inventory management, *Expert Syst. Appl.* 179 (2021) 115101.
- [23] M.S. Irfan, S. Dasgupta, M. Rahman, Towards Transportation Digital Twin Systems for Traffic Safety and Mobility Applications: A Review, *ArXiv.* (2022).
- [24] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks, Characterising the Digital Twin: A systematic literature review, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 29 (2020) 36–52.
- [25] A. Kaiblinger, M. Woschank, State of the Art and Future Directions of Digital Twins for Production Logistics: A Systematic Literature Review, *Appl. Sci.* 12 (2022).
- [26] A. Kampczyk, K. Dybeł, The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions, *Sensors*. 21 (2021).
- [27] M. Kosacka-Olejniak, M. Kostrzewski, M. Marczewska, B. Mrówczyńska, P. Pawlewski, How digital twin concept supports internal transport systems?—Literature review, *Energies*. 14 (2021).
- [28] K. Kušić, R. Schumann, E. Ivanjko, A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics, *Adv. Eng. Informatics*. 55 (2023).
- [29] J. Li, G. Zhou, C. Zhang, A twin data and knowledge-driven intelligent process planning framework of aviation parts, *Int. J. Prod. Res.* 60 (2022) 5217–5234.

- [30] E. Marcucci, V. Gatta, M. Le Pira, L. Hansson, S. Bråthen, Digital twins: A critical discussion on their potential for supporting policy-making and planning in urban logistics, *Sustain.* 12 (2020) 1–15.
- [31] A. Martínez-Gutiérrez, J. Díez-González, R. Ferrero-Guillén, P. Verde, R. Álvarez, H. Perez, Digital twin for automatic transportation in industry 4.0, *Sensors.* 21 (2021).
- [32] H. Matyi, P. Tamás, Application of Digital Twin Technology in the Development of Logistics Process, *Adv. Logist. Syst. - Theory Pract.* 15 (2021) 12–19.
- [33] H. Millwater, J. Ocampo, N. Crosby, Probabilistic methods for risk assessment of airframe digital twin structures, *Eng. Fract. Mech.* 221 (2019) 106674.
- [34] M.A. Moloudi, A. Foshati, H. Kalantari, A. Ejlali, A Combination of FMEA and Digital Twinning for Rapid, Accurate, and Online Diagnosis in Vehicles Using COTS Embedded Computing Devices, in: *Proc. - 2022 CPSSI 4th Int. Symp. Real-Time Embed. Syst. Technol. RTEST 2022*, IEEE, 2022.
- [35] S.K. Munkeby, On application of digital twin in ship operation and performance, Norwegian University of Science and Technology, 2022.
- [36] R.K. Phanden, P. Sharma, A. Dubey, A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics, *Mater. Today Proc.* 38 (2020) 174–178.
- [37] L. Pinciroli, P. Baraldi, E. Zio, Maintenance optimization in industry 4.0, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 234 (2023) 109204.
- [38] A. Pool, Digital Twins in Rail Freight-The foundations of a future innovation, University of Twente, 2021.
- [39] A. Rasheed, O. San, T. Kvamsdal, Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective, *IEEE Access.* 8 (2020) 21980–22012.
- [40] A. Rudskoy, I. Ilin, A. Prokhorov, Digital Twins in the Intelligent Transport Systems, *Transp. Res. Procedia.* 54 (2021) 927–935.
- [41] F. Saifutdinov, J. Tolujevs, Time and space discretization in the digital twin of the airport transport network, *Transp. Telecommun.* 22 (2021) 257–265.
- [42] E.R. Schislyaeva, E.A. Kovalenko, Innovations in logistics networks on the basis of the digital twin, *Acad. Strateg. Manag. J.* 20 (2021) 1–17.
- [43] A. Sharma, E. Kosasih, J. Zhang, A. Brintrup, A. Calinescu, Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions, *J. Ind. Inf. Integr.* 30 (2022) 1–18.
- [44] D. Shenoy, B. Bhadury, *Maintenance Resources Management: adapting MRP*, Taylor & Francis, 2005.
- [45] M. Singh, E. Fuenmayor, E.P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, D. Devine, Digital Twin: Origin to Future, *Appl. Syst. Innov.* 4 (2021) 1–19.
- [46] K.M. Sirvio, Intelligent systems in maintenance planning and management, in: C. Kahraman, S. Cevik Onar (Eds.), *Intell. Tech. Eng. Manag. Intell. Syst. Ref. Libr.*, Springer International Publishing Switzerland, 2015: pp. 221–245.
- [47] J. Szpytko, Y.S. Duarte, Integrated maintenance platform for critical cranes under operation: Database for maintenance purposes, *IFAC-PapersOnLine.* 53 (2020) 167–172.
- [48] H. van der Valk, H. Haße, F. Möller, B. Otto, Archetypes of Digital Twins, *Bus. Inf. Syst. Eng.* 64 (2022) 375–391.
- [49] J. Vieira, J.P. Martins, N.M. de Almeida, H. Patricio, Towards Resilient and Sustainable Rail and Road Networks: A Systematic Literature Review on Digital Twins, *Sustain.* 14 (2022).
- [50] M. Vohra, Overview of Digital Twin, in: M. Vohra (Ed.), *Digit. Twin Technol. Fundam. Appl.*, Scrivener Publishing LLC, 2023: pp. 1–18.
- [51] V. Zaccaria, M. Stenfelt, I. Aslanidou, K.G. Kyprianidis, Fleet monitoring and diagnostics framework based on digital twin of aero-engines, in: *Proc. ASME Turbo Expo Am. Soc. Mech. Eng.*, 2018: pp. 1–10.
- [52] T. Zhang, X. Liu, Z. Luo, F. Dong, Y. Jiang, Time series behavior modeling with digital twin for Internet of Vehicles, *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.* 2019 (2019) 1–12.

- [53] Z. Zhang, Y. Zou, T. Zhou, X. Zhang, Z. Xu, Energy consumption prediction of electric vehicles based on digital twin technology, *World Electr. Veh. J.* 12 (2021) 1–13.
- [54] BS EN 13306:2017: Maintenance. Maintenance terminology, 2018.
- [55] Digital Twin: Definition & Value, 2020.
- [56] Digitization in Ports: Application of Digital Twins to Complex Logistics, *FAL Bull.* 393 (2022).