



INNOWACYJNE TECHNOLOGIE MONITOROWANIA TABORU KOLEJOWEGO: ZNACZENIE RFID W OBLICZU WSPÓŁCZESNYCH WYZWAŃ GOSPODARCZYCH I BEZPIECZEŃSTWA

Dariusz Weiland

Streszczenie

Cel. Artykuł podejmuje próbę oceny znaczenia technologii RFID w monitorowaniu taboru kolejowego w kontekście współczesnych wyzwań gospodarczych i bezpieczeństwa, ze szczególnym uwzględnieniem uwarunkowań Polski, a także porównuje technologię RFID z innymi systemami monitorowania taboru (DAC, GPS) w celu wskazania ich komplementarności.

Metoda. W badaniu zastosowano przegląd literatury, analizę praktycznych doświadczeń autora oraz metodę porównawczą.

Wyniki. Wykazano, że technologia RFID znacząco zwiększa efektywność operacyjną i poziom bezpieczeństwa poprzez szybszą oraz bardziej niezawodną identyfikację taboru, ponadto pozwala na rozbudowę systemu o wykrywanie usterek, a także wspiera procesy związane z zarządzaniem aktywami. Zidentyfikowano główne bariery wdrożeniowe, w tym wysokie koszty inwestycyjne po stronie zarządcy infrastruktury oraz potrzebę standaryzacji. Artykuł podkreśla znaczenie RFID w transporcie kolejowym oraz potrzebę dalszych badań nad interoperacyjnością, szczególnie w Polsce.

Słowa kluczowe: RFID, DAC, GPS, transport kolejowy, monitorowanie taboru

Klasyfikacja JEL: L92, O33, R41, L86, Q55

Wstęp

Dynamiczny rozwój transportu kolejowego oraz obsługujących ten transport systemów informatycznych spowodował rosnące zapotrzebowanie na technologie umożliwiające skuteczne, a przede wszystkim pewne monitorowanie taboru kolejowego. W odniesieniu do transportu kolejowego zapewnienie dostępu do realnych, rzetelnych i pewnych informacji ma kluczowe znaczenie zarówno z perspektywy efektywności operacyjnej, jak i bezpieczeństwa przewozów. W dobie Przemysłu 4.0 i Internetu Rzeczy (IoT) szczególną rolę w tej transformacji odgrywa dostęp do informacji. Procesy podstawowe muszą być zaopatrywane w informację przez systemy informacyjne oraz informatyczne przedsiębiorstw. Pozyskiwanie rzetelnych danych staje się zatem kluczowe do zapewnienia funkcjonowania procesów, ponadto zachodzące zmiany społeczne

warunkują coraz częściej konieczność dostępu do informacji w czasie rzeczywistym (Weiland, Wierzbowski, 2020). Technologia Radio Frequency Identification (RFID) umożliwia automatyczną identyfikację oraz może znacząco usprawnić zarządzanie zasobami kolejowymi w czasie rzeczywistym (Sudhakaran, Maheswari, Devi, 2024). RFID może być jednym z kluczowych narzędzi zarządzania danymi w czasie rzeczywistym, które jednocześnie pozwala na uzyskanie precyzyjnych informacji identyfikacyjnych, a także informacji o lokalizacji taboru. Ponadto rozbudowanie systemu RFID o inne urządzenia pomiarowe może dostarczać kluczowych informacji o stanie technicznym oraz historii eksploatacyjnej pojazdów szynowych, co przekłada się na optymalizację procesów logistycznych i serwisowych.

Współczesne wyzwania gospodarcze związane z rosnącymi kosztami operacyjnymi oraz wymaganiami regulacyjnymi (np. monitorowania ładunków niebezpiecznych czy produktów akcyzowych np. system SENT¹) w sektorze transportu kolejowego skłaniają przewoźników do wdrażania nowoczesnych technologii cyfrowych, pozwalających na monitorowanie przepływu ładunków. Niestety w związku z napiętą sytuacją geopolityczną regionu Europy środkowo-wschodniej bazowanie tylko na jednym źródle informacji lokalizacyjnych (najczęściej GPS - Global Positioning System) może okazać się niewystarczające. RFID pozwala na precyzyjne śledzenie wagonów, optymalizację procesów logistycznych oraz redukcję kosztów utrzymania taboru (Olaby, Hamadache, Soper, Winship, Dixon, 2022). Dzięki zastosowaniu RFID, możliwa jest identyfikacja oraz monitorowanie elementów taboru kolejowego bez konieczności bezpośredniego kontaktu fizycznego. Ponadto zastosowanie pasywnych znaczników RFID umożliwia ich stosowanie również w taborze niezelektryfikowanym. Warto zauważyć, że, zastosowanie RFID w połączeniu z innymi systemami, takimi jak GPS czy DAC (Digital Automatic Coupling), umożliwia integrację i wzajemne uzupełnianie różnych technologii monitorowania (Olaby i in., 2022). W kontekście interoperacyjności systemów telematycznych, a także dążąc do zbudowania jednolitego systemu monitorowania taboru bazującego na wielu źródłach rzetelnych i uzupełniających się danych, wdrożenie RFID może przyczynić się do stworzenia jednolitej infrastruktury umożliwiającej wymianę danych między różnymi przewoźnikami oraz zarządcami infrastruktury kolejowej zarówno w ujęciu krajowym jak i międzynarodowym.

Celem niniejszego artykułu jest ocena znaczenia technologii RFID w monitorowaniu taboru kolejowego w kontekście wyzwań gospodarczych i bezpieczeństwa, ze szczególnym uwzględnieniem Polski. Analiza obejmuje porównanie RFID z innymi technologiami monitorowania oraz określenie potencjalnych kierunków rozwoju i integracji systemów cyfrowych w sektorze kolejowym. Analiza została przeprowadzona przy użyciu podejścia jakościowo-ilościowego, łączącego systematyczny przegląd literatury naukowej z analizą praktycznych doświadczeń oraz obserwacją rynku. Źródła obejmują recenzowane artykuły naukowe z baz danych EBSCO, Emerald, Scopus oraz ScienceDirect, przy czym ograniczono wyniki do artykułów open access. Mała liczba dostępnych publikacji związanych z tym tematem może świadczyć o istnieniu luki badawczej. Dodatkowo zastosowano metodę porównawczą w celu zestawienia RFID z innymi systemami monitorowania oraz syntezę wyników dla sformułowania rekomendacji dla sektora kolejowego w Polsce.

Artykuł podzielony jest na sześć głównych sekcji. Po wprowadzeniu omówiono technologię RFID i jej rozwój w transporcie kolejowym. Kolejne części koncentrują się na analizie korzyści gospodarczych wynikających z wdrożenia tej technologii oraz jej wpływie na bezpieczeństwo transportu kolejowego. Następnie omówiono bariery i wyzwania związane z implementacją RFID, w tym kwestie standaryzacji, kosztów wdrożenia oraz możliwości integracji z istniejącymi systemami zarządzania kolejowego. Całość podsumowano, przedstawiając kluczowe wnioski dla rozwoju tej technologii w transporcie kolejowym. Niniejszy artykuł stanowi uzupełnienie luki

¹ SENT (System Elektronicznego Nadzoru Transportu) - monitorowanie przez Krajową Administrację Skarbową drogowego i kolejowego przewozu tzw. towarów wrażliwych, takich jak paliwa silnikowe, biodiesel, oleje smarowe, rozcieńczalniki, alkohole skażone, oleje roślinne, rozpuszczalniki czy susz tytoniowy.

badawczej dotyczącej zastosowania technologii RFID w transporcie kolejowym oraz porusza temat znaczenia i przyszłości RFID w kontekście współczesnych wyzwań gospodarczych, wskazując zarówno na aktualne trendy w zastosowaniu tej technologii, jak i potencjalne obszary badań w przyszłości.

1. Technologia RFID w transporcie kolejowym

Technologia RFID (Radio Frequency Identification) jest metodą bezprzewodowej identyfikacji obiektów, wykorzystującą fale radiowe do przekazywania informacji między znacznikami nazywanymi tagami a czytnikami (Olaby i in., 2022), (Ramesh, Divya, Thomas, Varghese, Mahendran, 2022). RFID znajduje zastosowanie w wielu sektorach, w tym w transporcie kolejowym, gdzie umożliwia automatyczne monitorowanie i zarządzanie taborami oraz jego skuteczną identyfikację (Sudhakaran i in., 2024). Najprostszy system RFID składa się z 4 podstawowych komponentów (Yang, Xu, Liu, Tan, Luo, 2022):

- znaczników RFID – zawierających chip elektroniczny stanowiący pamięć urządzenia, w którym mogą być zapisane różne dane logistyczne, dzięki którym oznakowany obiekt jest w pełni identyfikowalny,
- anteny RFID – odpowiedzialnej za wytworzenie pola elektromagnetycznego (w przypadku tagów pasywnych) oraz do obioru (odczytu) impulsów nadawanych przez znacznik,
- głowicy – która odpowiada za „przetłumaczenie” impulsu na odpowiedni język programowania, który będzie zrozumiały dla systemu nadrzędnego – często w przypadku urządzeń dwu lub więcej kierunkowych (posiadających więcej niż jedną antenę) oprogramowanie zawarte w głowicy pełni również rolę logiki lokalnej odpowiadającej za prawidłową interpretację odczytanych danych – np. kierunku przemieszczania się oznakowanego obiektu,
- oprogramowania – w formie systemów centralnych, zarządzającego przepływem danych, ich interpretacją i analizą oraz systemów użytkownika odpowiadających za przekazywanie i prezentację obrobionych oraz zinterpretowanych informacji odbiorcy (Li, Xu, Niu, 2022).

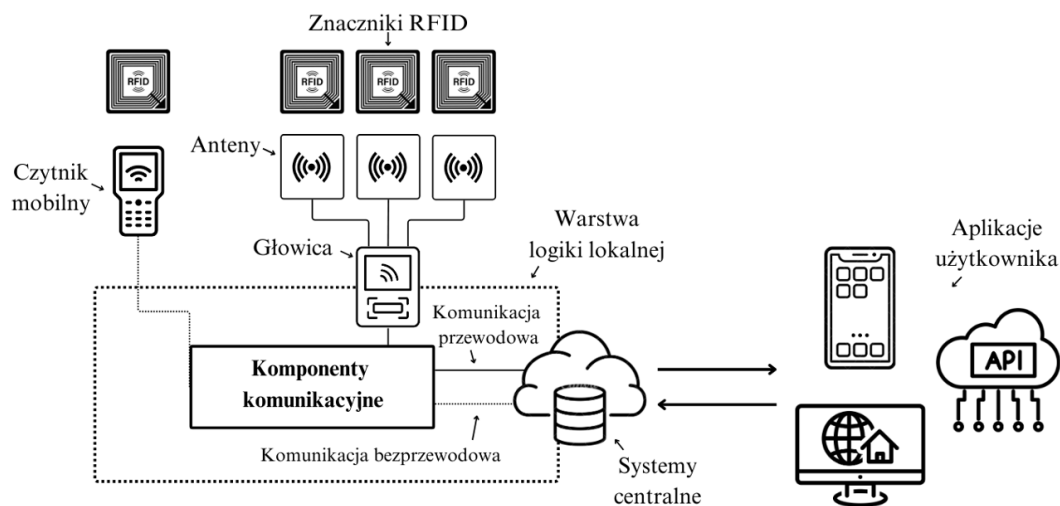
Najczęściej anteny i głowice stanowią całość i są nazywane czytnikami. Można wyróżnić dwa rodzaje czynników: mobilne (przenośne) do obsługi ręcznej oraz czytniki stacjonarne zamontowane na stałe w danym obszarze. Dodatkowo można wskazać występowanie komponentów komunikacyjnych odpowiadających za przekazywanie danych czy to drogą kablową/światłowodową czy też bezprzewodowo (GSM, GPRS, Wi-fi).

RFID funkcjonuje na zasadzie transmisji fal radiowych, pozwalając na bezkontaktową wymianę danych (Hell, Varga, 2018). Wyróżnia się trzy rodzaje znaczników:

- pasywne, które nie posiadają własnego źródła zasilania, lecz otrzymują energię z anteny czytnika gdy znajdują się w polu elektromagnetycznym emitowanym przez antenę. Wytworzona w ten sposób energia jest gromadzona w kondensatorze i zasila z niego obwody elektroniczne znacznika. Tagi pasywne, wbrew panującej powszechnie opinii nie wysyłają żadnego rzeczywistego sygnału do czytnika, tylko zakłócają jego nośną, co jest odczytywane jako zwrotny strumień danych. Rozwiązanie pasywne ma zasięg do kilku metrów (pasmo UHF - Ultra-High Frequency) (Zhang, Tentzeris, 2011). Głównym czynnikiem determinującym dynamiczny rozwój aplikacji RFID w ostatnich latach było opracowanie bardzo tanich i technologicznie zaawansowanych tagów pasywnych, oraz zwiększanie ich pamięci.
- aktywne, wyposażone są we własny nadajnik radiowy oraz baterię, co pozwala na transmisję danych z zasięgiem do 100m. Jego zastosowania są ograniczone przez wysoki koszt jednostkowy znacznika, a także dodatkowe koszty eksploatacyjne związane z koniecznością serwisowania baterii oraz ich wymianą. Znacznik aktywny może sam inicjować transmisję danych, bez konieczności znajdowania się w polu zasięgu anteny.

- półpasywne/półaktywne, które wyposażone są w baterię, jednak sygnał nadawany przez znacznik jest dopiero w momencie, gdy ten znajdzie się w zasięgu fal emitowanych przez antenę (Chen, Hung, Chen, Jan, Su, 2019).

Przykładową strukturę systemu RFID przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1. Struktura systemu RFID

Źródło: Opracowanie własne.

Transpondery umieszczone w znacznikach mogą być wykonane jako RO (ang. Read Only) z pamięcią tylko do odczytu lub jako RW (ang. Read-Write) z możliwością zapisywania informacji w nieulotnej pamięci E²PROM² lub FRAM³ (Dębowski, 2006).

2. Rozwój technologii RFID w transporcie kolejowym

Technologia identyfikacji radiowej zaczęła rozwijać się w połowie XX wieku, początkowo na potrzeby wojskowe oraz kontroli dostępu (Popova, Evsyukov, Danilov, Marusin, 2021). W transporcie kolejowym pierwsze próby nad zastosowaniem technologii RFID miały miejsce w latach 70. XX wieku, kiedy w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie testowano systemy automatycznej identyfikacji i lokalizacji materiałów jądrowych. W 1984 roku Association of American Railroads (AAR) zapoczątkowało próby standaryzacji rozwiązania w transporcie kolejowym. Wdrożono wtedy pierwszy standardowy system identyfikacji wagonów oparty na RFID, co zapoczątkowało szerokie zastosowanie tej technologii (Hranický, Šperka, Čamaj, 2021).

W latach 90. XX wieku technologię RFID zaczęto wdrażać na większą skalę w Europie, zwłaszcza we Francji, Niemczech i Wielkiej Brytanii. Pierwotnie RFID było stosowane głównie do identyfikacji wagonów towarowych dzięki możliwości zastosowania znaczników pasywnych oraz do monitorowania ruchu pociągów, co pozwoliło na zwiększenie efektywności zarządzania flotą oraz ograniczenie błędów w rejestracji przewożonych ładunków (Freimane, Mežītis, Mihaīlavs, 2017). Wraz z postępem w miniaturyzacji układów elektronicznych oraz rozwojem technologii bezprzewodowej transmisji danych, RFID zaczęło zyskiwać na znaczeniu w kontekście

² Pamięć E²PROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) jest to rodzaj nieulotnej pamięci półprzewodnikowej, którą można kasować i programować elektrycznie, w przeciwieństwie do starszych pamięci EPROM, które wymagały naświetlania promieniowaniem UV do usunięcia danych (Skorobogatov, 2010).

³ Pamięć FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) to rodzaj nieulotnej pamięci RAM, która wykorzystuje materiał ferroelektryczny do przechowywania danych. Jest to technologia łącząca zalety pamięci SRAM/DRAM (szybki dostęp) i EEPROM/Flash (nieulotność) (Scott, 2019).

zarządzania taborem kolejowym (Own, Lee, Wang, Wang, Ting, 2013). Zastosowania RFID rozszerzyły się na automatyczne monitorowanie przewożonych ładunków, integrację z systemami zarządzania aktywami oraz optymalizację procesów konserwacyjnych (Popova i in., 2021).

Znaczący postęp w rozwoju RFID w transporcie kolejowym nastąpił dzięki standaryzacji systemów identyfikacyjnych, co umożliwiło interoperacyjność systemów między różnymi operatorami oraz krajami. Organizacja GS1, we współpracy z operatorami kolejowymi opracowała europejskie wytyczne dotyczące identyfikacji taboru kolejowego. Standardy te, oparte na systemie EPC Gen 2 UHF (ISO 18000-63), określają sposób jednolitego znakowania pojazdów i komponentów kolejowych (GS1, 2023). Dzięki ustandaryzowanym identyfikatorom RFID operatorzy kolejowi mogą śledzić ruch taboru w czasie rzeczywistym, monitorować zużycie komponentów oraz optymalizować harmonogramy serwisowe bez względu na pochodzenie taboru (Hranický i in., 2021).

Obecnie RFID jest stosowane na szeroką skalę w transporcie kolejowym zwłaszcza w krajach takich jak Chiny, Indie, Stany Zjednoczone, Niemcy i Francja, gdzie stanowi podstawowy system identyfikacji i monitorowania taboru kolejowego (Popova i in., 2021). Rozwój tej technologii wciąż postępuje, a jej przyszłość wiąże się z integracją z nowoczesnymi rozwiązaniami cyfrowymi, takimi jak Internet Rzeczy (IoT), analiza Big Data oraz sztuczna inteligencja (AI) (Weiland, Wierzbowski, 2020). Integracja ta umożliwi jeszcze bardziej efektywne zarządzanie infrastrukturą kolejową oraz automatyzację procesów logistycznych (Freimane i in., 2017).

3. Zastosowanie RFID w monitorowaniu taboru kolejowego

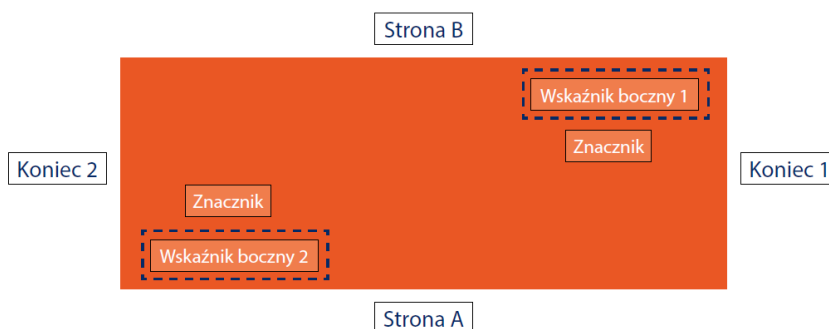
Współczesny transport kolejowy, a także znaczące zmiany w świadomości współczesnego społeczeństwa (Weiland, 2019) wymagają zaawansowanych technologii monitorowania taboru pozwalających na zaspakajanie potrzeb informacyjnych. Dodatkowo technologie te powinny pozwalać na efektywne zarządzanie flotą, zwiększać bezpieczeństwo oraz dążyć do optymalizacji kosztów operacyjnych. Technologia RFID umożliwia automatyczną identyfikację wagonów i lokomotyw w czasie rzeczywistym, co przekłada się na poprawę efektywności operacyjnej i redukcję błędów ludzkich (Popova i in., 2021). Zastosowanie tej technologii może usprawnić oraz zautomatyzować procesy związane ze spisem taboru na bocznicach, a także zautomatyzować procesy zestawiania taboru oraz przekazywać pewne informacje o zestawieniu do systemów informacji pasażerskiej, unikając tym samym błędów związanych z błędnym zestawieniem wagonów (kie-
runek, kolejność), czy błędów związanych z przełączeniem składów do innych lokomotyw.

Jednym z kluczowych aspektów zastosowania RFID w transporcie kolejowym jest integracja z innymi systemami monitorowania, takimi jak GPS, DAC oraz Internet Rzeczy (IoT), które wspólnie powinny tworzyć kompleksowe rozwiązania do śledzenia i zarządzania transportem kolejowym (Sarvade, Shirwala, Kugaonkar, Mudgonda, 2025). Natomiast zawarte w koncepcji IoT uczenie maszynowe może dostarczać informacje o potencjalnych awariach czy zagrożeniach jeszcze przed ich realnym wystąpieniem (Asad, Ahmad, Hussain, Zoha, Abbasi, Imran, 2020).

3.1. Automatyczna identyfikacja i śledzenie pojazdów szynowych

Automatyczna identyfikacja pojazdów szynowych przy użyciu technologii RFID opiera się na wykorzystaniu znaczników RFID umieszczonych na taborze kolejowym oraz czytników zlokalizowanych w punktach kontrolnych infrastruktury. Każdy znacznik RFID zawiera unikalny kod identyfikacyjny, który jest odczytywany przez czytniki w momencie przejazdu pociągu, umożliwiając automatyczne śledzenie jego ruchu i monitorowanie kluczowych parametrów eksploatacyjnych (Gulyi, Ilin, Kirina, 2019). Odpowiednie rozplanowanie sieci punktów kontrolnych może pomóc stworzyć jeden spójny system monitorowania taboru na terenie Polski. Wymaga to jednak współpracy sektora publicznego oraz prywatnego. W przypadku tworzenia sieci punktów kontrolnych znaczący koszt ich instalacji spoczywa na zarządcy infrastruktury w przypadku

Polski jest to PKP PLK S.A., tym samym PKP PLK stałoby się właścicielem punktów kontrolnych oraz mogłoby dystrybuować pozyskiwane dane do zainteresowanych podmiotów takich jak przewoźnicy, nadawcy czy instytucje rządowe. Na terenach prywatnych, w tym bocznicach oraz centrach przeładunkowych koszt instalacji elementów systemu spoczywałby na właścicielu terenu. Zakładając współpracę pomiędzy zarządcą infrastruktury krajowej PKP PLK oraz zarządcami infrastruktury prywatnej można znacząco ograniczyć koszty konieczne do poniesienia przez PKP PLK, gwarantując jednocześnie wysokie pokrycie terenu Polski urządzeniami nadawczo-odbiorczymi. Przewoźnicy zaś musieliby przeprowadzić znakowanie znacznikami RFID taboru zgodnie z normami i wytycznymi GS1, wytyczne te zakładają zamontowanie dwóch znaczników na jednostce transportowej zgodnie z rys.2.



Rysunek 2. Schemat montażu znaczników RFID na wagonie według wytycznych GS1

Źródło: GS1, 2023

Niestety do wdrożenia takiego przedsięwzięcia jakim jest kompleksowy system monitorowania taboru przy wykorzystaniu technologii RFID konieczne jest również stworzenie odpowiednich norm prawnych, które mogłyby wyrzucić potrzebę współpracy międzysektorowej np. poprzez odpowiednie normy, wytyczne czy przepisy prawne określone i wydane przez UTK (Urząd Transportu Kolejowego).

Korzyści wynikające z zastosowania RFID w automatycznej identyfikacji i śledzeniu pojazdów szynowych obejmują:

- poprawę dokładności danych o położeniu taboru – w przeciwieństwie do systemów opartych na ręcznym wpisywaniu informacji o numerach wagonów oraz ich lokalizacji np. na bocznicach, RFID eliminuje błędy ludzkie i zapewnia precyzyjne dane w czasie rzeczywistym, dodatkowo zapewnia wysokiej jakości dane wszędzie tam, gdzie zastosowanie systemów GPS czy DAC jest niemożliwe lub nie daje 100% dokładności odczytywanych danych.
- zwiększenie efektywności operacyjnej – RFID umożliwia automatyczną inwentaryzację wagonów i lokomotyw, co ułatwia planowanie transportu oraz optymalizację rozkładów jazdy (Hranický i in., 2021).
- wspomaganie utrzymania taboru – dane z systemów RFID mogą być wykorzystywane do monitorowania stanu technicznego pojazdów⁴ oraz przewidywania konieczności przeprowadzenia przeglądów i napraw⁵ (Watanabe, Haya, Shinoda, Oomura 2009), co pozwala na proaktywne podejście do zarządzania flotą (Popova i in., 2021).

⁴ Aby system mógł monitorować stan techniczny taboru konieczne jest łączenie technologii RFID z innymi urządzeniami pomiarowymi takimi jak systemy laserów LIDAR, kamer, wag dynamicznych. Zastosowanie kamer oraz laserów może pomóc w wykrywaniu wad układów jezdných (zapieczone klocki, wypłaszczenie koła, zaburzenie owalu kół, ubytki w klockach hamulcowych lub całkowity ich brak), natomiast zastosowanie wag dynamicznych może wspomóc zarządcę infrastruktury w wychwytywaniu z sieci składów przeciążonych prowadzących do uszkodzenia infrastruktury szynowej.

⁵ Wdrożenie technologii RFID na elementach serwisowych taboru może ułatwić prowadzenie elektronicznych książek serwisowych, tym samym poprawić efektywność prowadzonych serwisów (całych składów) lub poszczególnych elementów. Takie

Dodatkowo, wdrożenie standardów RFID opracowanych przez organizację GS1, takich jak EPC Gen 2 UHF (ISO 18000-63), umożliwia interoperacyjność systemów RFID między różnymi operatorami kolejowymi oraz krajami. To z kolei przyczynia się do większej spójności i skuteczności zarządzania ruchem kolejowym na poziomie międzynarodowym (GS1, 2023).

3.2. Integracja RFID z innymi systemami monitorowania (GPS, DAC, IoT)

Efektywne monitorowanie taboru kolejowego, które ma dostarczać pewnych i rzetelnych informacji wymaga integracji różnych technologii akwizycji oraz przetwarzania danych, takich jak RFID, GPS, DAC oraz IoT. Każda z tych technologii pełni określoną rolę, a ich synergia pozwala na stworzenie kompleksowego systemu zarządzania taborem, obejmującego zarówno śledzenie pozycji pojazdów, jak i monitorowanie ich stanu technicznego z analizą pozyskanych danych oraz ich wykorzystaniu w predykcji stanów przyszłych. W wielu opracowaniach branżowych oraz raportach można zaobserwować twierdzenie, że technologie te powinny być rozpatrywane jako substytuty, lub technologie zastępujące. Zdaniem autora jest to błędne postrzeganie. Aby systemy dysponowały danymi w każdych warunkach oraz w każdej sytuacji konieczne jest wspólne rozpatrywanie tych rozwiązań na zasadzie komplementarności.

Technologia RFID zapewnia precyzyjną identyfikację wagonów i lokomotyw, umożliwiając ich śledzenie w punktach kontrolnych, takich jak kluczowe punkty na sieci kolejowej, stacje, bocznice czy hale serwisowe, a niewątpliwym i najważniejszym atutem jest to, że znaczniki pasywne nie wymagają źródła zasilania w związku i mogą być montowane również na taborze niezelektryfikowanym czy niesprzęgniętym z lokomotywą. System GPS pozwala na śledzenie pojazdów w czasie rzeczywistym na trasie danego składu. Najczęściej w praktyce technologia GPS ma zastosowanie w taborze pasażerskim, który jest zelektryfikowany oraz w lokomotywach dla określania położenia i prędkości taboru na długich trasach – wszędzie tam, gdzie dokładność danych lokalizacyjnych nie jest kluczowa dla zapewnienia bezpieczeństwa. Natomiast DAC umożliwia automatyczne sprzęganie wagonów oraz także wymianę danych w składzie oraz przekazywanie danych przez dedykowaną magistralę CAN⁶ do lokomotywy skąd mogą być dalej przekazywane do systemów nadrzędnych. Internet Rzeczy pełni zaś rolę integracyjną, pozwalając na analizę danych o stanie technicznym taboru w czasie rzeczywistym i predykcję usterek w przyszłości tym samym dając podstawy do optymalizacji wielu procesów (Hranický i in., 2021).

Technologia GPS jest szeroko stosowana w monitorowaniu ruchu kolejowego, jednak jej skuteczność jest ograniczona w obszarach o dużym zagęszczeniu infrastruktury, takich jak bocznice o dużym zagęszczeniu torów, tunele czy hale serwisowe. Zakłócenia sygnału z którymi, według doniesień medialnych, coraz częściej mamy do czynienia w północnych oraz wschodnich regionach Polski mogą prowadzić do błędów lokalizacyjnych, a w skrajnych wypadkach do całkowitego braku możliwości lokalizacji, co negatywnie wpływa na zarządzanie taborem oraz na zapewnienie bezpieczeństwa. Współpraca systemów GPS oraz RFID eliminuje te ograniczenia, umożliwiając precyzyjną identyfikację pojazdów w punktach kontrolnych na sieci kolejowej, oraz dokładną lokalizację na którym odcinku i przede wszystkim na którym torze znajduje się jaki skład czy nawet pojedynczy wagon. Szczególnie istotne jest to w przypadku górskich rozrządowych oraz postoju wagonów na bocznicach bez sprzęgnięcia ich z lokomotywą wyposażoną w GPS. Integracja obu technologii pozwala na skuteczniejsze monitorowanie i optymalizację operacji kolejowych, łącząc dane lokalizacyjne GPS z punktową i dokładną identyfikacją RFID.

System DAC, opracowany w celu zwiększenia efektywności operacyjnej i automatyzacji procesów sprzęgania, zapewnia elektroniczną wymianę danych w składzie poprzez wykorzystanie magistrali CAN. Jego głównym ograniczeniem jest konieczność zapewnienia fizycznego

oznaczanie może pozwolić na dokładne określenie, kiedy był przeprowadzany ostatni serwis, jakie elementy zostały naprawione/wymienione, kto dokonał przeglądu i kiedy powinien odbyć się kolejny przegląd techniczny.

⁶ Magistrala CAN (Controller Area Network) to standard komunikacyjny wykorzystywany do wymiany danych pomiędzy urządzeniami w systemach automatyki rozproszonej.

połączenia wagonów z lokomotywą, co sprawia, że technologia ta nie pozwala na identyfikację taboru w stanie rozłączonym. RFID w tym kontekście stanowi uzupełnienie DAC, umożliwiając identyfikację wagonów zarówno w składzie, jak i na bocznicach oraz w magazynach serwisowych. W połączeniu z DAC technologia RFID może również usprawniać procesy logistyczne, automatycznie rejestrując operacje sprzęgania i zmiany konfiguracji składu, a także zapewnić widoczność i identyfikowalność składu w sytuacji uszkodzenia magistrali CAN.

Integracja RFID z systemami IoT otwiera nowe możliwości w zakresie monitorowania i zarządzania taboru kolejowym. Czujniki IoT, umieszczone na wagonach i infrastrukturze kolejowej, mogą zbierać dane o temperaturze, zużyciu mechanicznych komponentów oraz nacisku na osie. W połączeniu z RFID umożliwia to automatyczną diagnostykę oraz przewidywanie awarii na podstawie analizy historycznych danych operacyjnych. Wdrożenie takiego rozwiązania pozwala na poprawę efektywności konserwacji oraz optymalizację procesów serwisowych, co bezpośrednio wpływa na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych i zwiększenie bezpieczeństwa transportu.

Zestawienie technologii RFID, GPS i DAC przedstawia tabela 1, ukazująca kluczowe cechy każdej z tych technologii oraz ich ograniczenia.

Tabela 1. Zestawienie technologii RFID, GPS oraz DAC – porównanie funkcjonalności

Technologia	Zakres działania	Dokładność identyfikacji	Kluczowe korzyści	Ograniczenia
RFID	Identyfikacja i śledzenie taboru na bocznicach, stacjach, halach serwisowych, peronach (w tym również identyfikacja kierunku wagonu względem peronu)	Bardzo wysoka (punktowa identyfikacja poszczególnych wagonów). Zastosowanie pasywnych znaczników nie wymaga zapewnienia źródła zasilania.	- Możliwość identyfikacji wagonów niezależnie od ich położenia w składzie. - Praca w obszarach o ograniczonym dostępie do sygnału GPS lub o ograniczonej dokładności GPS (tunelach, halach, bocznicach) - Brak konieczności zasilania tagów RFID w przypadku pasywnych tagów - Integracja z systemami zarządzania taborem i IoT oraz zewnętrznymi urządzeniami pomiarowymi. - Niskie koszty dla przewoźników związane z oznakowaniem taboru.	- Wymaga dużych inwestycji w infrastrukturę czytników RFID - Identyfikacja tylko w miejscach zainstalowania bramek RFID - Ograniczona efektywność w przypadku dynamicznego śledzenia pojazdów.
GPS	Globalne śledzenie lokomotyw i składów.	Średnia – zależna od warunków terenowych i jakości sygnału – wymaga zapewnienia źródła zasilania.	- Ciągłe monitorowanie pozycji pociągów w czasie rzeczywistym. - Możliwość integracji z systemami predykcji ruchu. - Stosunkowo łatwa implementacja w lokomotywach, jednakże wymaga zasilania.	- Zakłócenia sygnału w tunelach, niska dokładność w przypadku dużego zagęszczenia torów szczególnie na bocznicach, całkowita niewidoczność taboru w halach i tunelach. - Brak identyfikacji pojedynczych wagonów – monitoruje tylko cały skład – głównie ze względów zapewnienia zasilania. - Wysoka podatność na

				zagłuszanie sygnału GPS, np. przez obce kraje.
DAC	Automatyczne sprzęganie wagonów i wymiana danych w ramach składu.	Wysoka – precyzyjna identyfikacja wagonów tylko w aktywnym składzie – do identyfikacji położenia taboru na sieci wymaga i wykorzystuje sygnał GPS.	- Automatyczna wymiana danych między wagonami. - Zwiększenie efektywności logistycznej poprzez szybsze zestawianie składów. - Możliwość integracji z systemami zarządzania ruchem. - Niskie koszty dla zarządcy infrastruktury.	- Brak identyfikacji wagonów poza aktywnym składem - Wysokie koszty wdrożenia i dostosowania taboru szczególnie dla właścicieli taboru. Orientacyjny koszt inwestycji w DAC dla lokomotywy to około 25 000 Euro, natomiast dla wagonu to około 15000 Euro (Railmarket, 2023). - Konieczność zastosowania dodatkowych systemów dla pełnej interoperacyjności. - Dostosowanie starszych składów w szyny komunikacyjne oraz dodatkowe czujniki pomiarowe wymaga dużych nakładów inwestycyjnych.

Źródło: opracowanie własne.

W kontekście interoperacyjności i cyfryzacji transportu kolejowego kluczowe jest traktowanie tych technologii jako wzajemnie uzupełniających się, a nie konkurencyjnych. RFID umożliwia identyfikację taboru nawet wtedy, gdy nie jest on sprzężony z lokomotywą, co stanowi istotną przewagę nad systemem DAC. Ponadto, RFID zapewnia identyfikację pojazdów w miejscach, gdzie GPS nie jest w pełni skuteczny, takich jak bocznice, hale serwisowe czy obszary, w których sygnał satelitarny może być zakłócany. Integracja RFID, GPS, DAC i IoT może pozwolić stworzyć inteligentny ekosystem zarządzania taborem, pozwalający na pełną automatyzację i optymalizację transportu kolejowego, zwiększenie jego efektywności operacyjnej oraz poprawę bezpieczeństwa i przewidywalności eksploatacji.

4. Korzyści gospodarcze wynikające z zastosowania RFID

Jak wskazano we wcześniejszych rozdziałach zastosowanie technologii RFID umożliwia precyzyjne śledzenie pozycji wagonów co może przekładać się na optymalizację przewozów oraz ograniczanie strat operacyjnych, lepsze planowanie tras a także ograniczenie próżnych przebiegów (Hranický i in., 2021). Wdrażanie tej technologii pozwala również na integrację z innymi systemami zarządzania transportem (np. IoT, GPS, DAC), co prowadzi do dalszej automatyzacji procesów operacyjnych i wzrostu efektywności (Stopka, Daniš, Zitrický, 2021). RFID jest także jednym z kluczowych elementów koncepcji smart railways, wspierając automatyzację procesów i zwiększając bezpieczeństwo transportu (Talib, Hasnan, Nawawi, Abdullah, 2020).

4.1. Optymalizacja procesów logistycznych

Automatyzacja procesów logistycznych i operacyjnych odgrywa kluczową rolę w zwiększaniu efektywności przewozów kolejowych. Zastosowanie RFID w terminalach przeładunkowych oraz na bocznicach pozwala na automatyczną rejestrację taboru, wystawianie wymaganych dokumentów oraz ich dalszą dystrybucję, bez konieczności ręcznego spisywania numerów wagonów, tym samym przyspiesza proces oraz wyklucza prawdopodobieństwo wystąpienia błędów ludzkich

(Szilágyi, Duplákóvá, 2016). W efekcie czas operacji logistycznych związanych z obsługą taboru ulega skróceniu o 30–40%, co prowadzi do lepszego wykorzystania zasobów kolejowych oraz redukcji kosztów związanych z obsługą ruchu (Marusin, Danilov, Popova, 2021).

Nowoczesne systemy RFID są coraz częściej integrowane z cyfrowymi platformami zarządzania transportem (TMS, ERP, IoT), umożliwiając bieżącą analizę stanu technicznego taboru, automatyczne generowanie harmonogramów konserwacji oraz optymalizację tras przewozowych (Zitrický, Daniš, Stopka, 2021). Lepsze planowanie napraw, a przede wszystkim ich predykcja na podstawie danych historycznych oraz danych pozyskiwanych na bieżąco z systemów pomiarowych skorelowanych z technologią RFID przyczynia się do znaczących oszczędności w zakresie kosztów operacyjnych. Integracja RFID z systemami IoT pozwala na predykcyjną analizę stanu technicznego pojazdów, co prowadzi do zmniejszenia liczby awarii (Daniš, Zitrický, Stopka, 2022), a także eliminację zbędnych postojów oraz bardziej efektywne planowanie tras, co przekłada się na ograniczenie kosztów energii oraz optymalizację wykorzystania zasobów (Evsyukov, Popova, Danilov, 2022). Dodatkowo RFID poprawia transparentność łańcucha dostaw, umożliwiając lepszą kontrolę nad ładunkami oraz redukcję strat wynikających z nieefektywnego zarządzania taborem (Stopka i in., 2021).

4.2. Redukcja kosztów utrzymania i eksploatacji taboru

Redukcja kosztów operacyjnych i utrzymaniowych taboru kolejowego stanowi kluczowe wyzwanie dla operatorów kolejowych na całym świecie. Dzięki RFID możliwe jest wdrożenie strategii predykcyjnego utrzymania, w której działania konserwacyjne są podejmowane na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych, a nie wyłącznie ustalonych interwałów serwisowych (Evsyukov i in., 2022). Tradycyjne metody utrzymania taboru kolejowego opierają się na okresowych przeglądach technicznych, które często są wykonywane według sztywnego harmonogramu, niezależnie od rzeczywistego stanu pojazdu. Przeglądy wykonywane w sytuacji, gdy np. wagon z zapieczonymi układami hamulcowymi będzie się poruszać po torach pomiędzy przeglądami doprowadzi do wypłaszczeni powierzchni koła oraz do stopniowej dewastacji infrastruktury szynowej. Wdrożenie RFID pozwala na ciągłe monitorowanie kluczowych komponentów, takich jak łożyska, układy hamulcowe czy systemy zawieszenia, co umożliwia bardziej precyzyjne planowanie konserwacji (Marusin i in., 2021). Przykładem może być wdrożony we Francji przez SNCF i Rail Logistics Europe system DACE. System ten kontroluje obciążenie pociągów przejeżdżających przez czujniki oraz wykrywa i identyfikuje uszkodzenia kół (Railmarket, 2022).

Dzięki integracji RFID z systemami IoT i Wayside Train Monitoring Systems⁷ (WTMS) operatorzy mogą śledzić zużycie podzespołów w czasie rzeczywistym i przewidywać potencjalne awarie jeszcze przed ich wystąpieniem (Daniš i in., 2022) (Railtech, 2022). Redukcja nieplanowanych napraw i awarii pozwala zmniejszyć koszty konserwacji nawet o 30% oraz skrócić czas przestoju taboru o 40% (Stopka i in., 2021). Przykładem takich wdrożeń może być projekt TechLOK gdzie Deutsche Bahn gromadzi, wizualizuje i przetwarza dane diagnostyczne z czujników zamontowanych na flocie lokomotyw tworząc tym samym system wczesnego ostrzegania o awariach (Siemens, 2017).

RFID umożliwia lepsze zarządzanie zasobami i harmonogramami serwisowymi, co prowadzi do minimalizacji kosztów wynikających z nieefektywnego planowania konserwacji (Zitrický i in., 2021). Automatyczna identyfikacja części zamiennych i ich cyklu życia pozwala na dokładniejsze prognozowanie zapotrzebowania, redukcję kosztów magazynowania oraz optymalizację łańcucha dostaw części (Weidong, Jinyu, Wa, 2021).

⁷ Wayside Train Monitoring Systems (WTMS) to systemy monitorowania stanu technicznego pociągów, które są instalowane wzdłuż torów kolejowych. Ich głównym zadaniem jest zbieranie danych o stanie pojazdów kolejowych bez potrzeby ich zatrzymywania.

5. Znaczenie RFID w zapewnieniu bezpieczeństwa transportu kolejowego

Bezpieczeństwo transportu kolejowego odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu stabilności łańcuchów logistycznych i infrastruktury krytycznej. W dobie rosnących zagrożeń geopolitycznych oraz incydentów związanych z bezpieczeństwem, takich jak sabotaż infrastruktury krytycznej czy nieautoryzowany dostęp do ładunków wojskowych, technologia RFID staje się nieodzownym elementem zabezpieczeń operacyjnych w sektorze kolejowym (Olaby i in., 2022).

RFID wspomaga przeciwdziałania kradzieżom oraz monitorowania ładunków specjalnych (Soares, Luís, Sargento, 2023). Dodatkowo, technologia ta może współpracować z systemami IoT, GPS oraz DAC, oferując kompleksowe rozwiązania w zakresie bezpieczeństwa przewozów (Kamakshi, Pritika, 2023). Warto zaznaczyć, że poza oznaczaniem taboru poprzez znaczniki RFID, znakować można również inne elementy wyposażenia wagonów istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa podróży np. gaśnice, apteczki i inne – następnie dzięki użyciu skanerów mobilnych możliwe jest przeprowadzenia szybkiej inwentaryzacji (Cai, Zhai, Wang, 2022).

W systemach zapobiegania kolizjom RFID jest stosowane jako technologia wspierająca systemy automatycznego hamowania i kontroli ruchu pociągów. W Indiach system Kavach integruje RFID z zaawansowanymi systemami detekcji zagrożeń, redukując liczbę wypadków i awarii (Kuan, Pang, Tam, Chio, Ting, Leong, 2023).

RFID w transporcie kolejowym wykorzystywane jest również w zakresie zabezpieczenia ładunków o wysokiej wartości, w tym transportu wojskowego. Systemy te pozwalają na monitorowanie w czasie rzeczywistym pozycji wagonów i kontenerów, a w przypadku wykrycia nieautoryzowanego dostępu mogą natychmiastowo aktywować alarmy i procedury zabezpieczające (Soares i in., 2023). RFID zapewnia również monitorowanie warunków przewozu materiałów niebezpiecznych, takich jak chemikalia, broń i amunicja.

W ostatnich latach RFID zostało wdrożone przez Departament Obrony USA do zarządzania logistyką wojskową, umożliwiając śledzenie transportu sprzętu strategicznego oraz minimalizację ryzyka przejęcia ładunków przez podmioty niepożądane (Kamieński, 2014). Warto zauważyć, że technologia w związku ze swoim ciągłym rozwojem może być angażowana nie tylko do identyfikacji wagonów, ale również do monitorowania istotnych elementów stałej infrastruktury kolejowej (Kapsalis, Belikaidis, Sørensen, 2021).

6. Wyzwania i bariery wdrażania RFID w transporcie kolejowym

Jak zauważono w niniejszym opracowaniu zastosowanie technologii RFID w transporcie kolejowym oferuje znaczne korzyści w zarządzaniu taborem, jednak jej wdrożenie napotyka szereg barier technologicznych, organizacyjnych, finansowych i regulacyjnych. Wdrożenie tej technologii wymaga znacznych nakładów finansowych (szczególnie w zakresie zapewnienia odpowiedniej infrastruktury akwizycji danych ze znaczników), dostosowania infrastruktury oraz ujednolicenia standardów, co w kontekście międzynarodowego transportu kolejowego stanowi istotne wyzwanie. Problemy interoperacyjności oraz konieczność dostosowania systemów informatycznych do nowych technologii również stanowią istotne bariery. Dodatkowo kwestie prawne i regulacyjne związane z ochroną danych oraz wymogami certyfikacyjnymi dodatkowo komplikują proces wdrażania RFID w transporcie kolejowym.

Jednym z najistotniejszych wyzwań związanych z wdrożeniem RFID w transporcie kolejowym są wysokie koszty inwestycyjne. Obejmują one zakup i instalację czytników RFID, znaczników na taborze oraz dostosowanie systemów informatycznych do przetwarzania danych generowanych przez RFID. Koszty te mogą znacząco różnić się w zależności od skali wdrożenia oraz rodzaju stosowanych technologii. Koszt pojedynczego znacznika wykonanego w technologii metal na metal wynosi około 50 zł. Przyjmując, że duży przewoźnik narodowy w Polsce posiada flotę 48 619 wagonów oraz 1 746 lokomotyw oszacowano całkowity koszt na poziomie około 5

milionów złotych. Dodatkowe koszty obejmują zakup ręcznych skanerów RFID dla lokomotyw, które mogą wynieść nawet 1,5 mln zł. W przypadku inwestycji po stronie zarządcy infrastruktury koszty wiążą się z rozmieszczeniem urządzeń pomiarowych na sieci kolejowej oraz opracowaniem systemów informatycznych do akwizycji, zarządzania i dystrybucji danych. Poza kosztami zakupu sprzętu dochodzą również wydatki związane z infrastrukturą. Instalacja czytników na torach, w terminalach i na stacjach wymaga uzyskania odpowiednich pozwoleń oraz przeprowadzenia inwestycji budowlanych, co dodatkowo podnosi koszty wdrożenia. Koszt montażu infrastruktury w terenie, obejmujący czytniki, fundamenty oraz podłączenie do zasilania, jest trudny do jednoznacznego oszacowania bez przeprowadzenia szczegółowej analizy technicznej.

Interoperacyjność systemów RFID w międzynarodowym transporcie kolejowym stanowi jedno z kluczowych wyzwań. Brak jednolitych standardów prowadzi do sytuacji, w której operatorzy kolejowi muszą dostosowywać swoje systemy do różnych wymagań technicznych obowiązujących w poszczególnych krajach. W efekcie, konieczne jest stosowanie różnych typów znaczników i czytników RFID, co zwiększa koszty oraz komplikuje proces zarządzania taborom.

Oczywiście przeciwdziałać tego typu problemom mogą takie organizacje jak GS1, która opracowała wytyczne dotyczące standaryzacji RFID w transporcie kolejowym, które uwzględniają specyfikę różnych krajowych systemów kolejowych. Wytyczne GS1 zapewniają jednolite identyfikowanie wagonów towarowych, lokomotyw oraz innych elementów taboru, co ułatwia ich śledzenie na poziomie międzynarodowym. Jednak wprowadzenie tych standardów wymaga współpracy między przewoźnikami, zarządcami infrastruktury oraz producentami sprzętu RFID. Kolejnym istotnym wyzwaniem wdrożenia RFID w transporcie kolejowym są kwestie prawne i regulacyjne. Obejmują one m.in. ochronę danych, wymagania dotyczące zgodności z przepisami dotyczącymi prywatności, a także konieczność certyfikacji sprzętu RFID do stosowania w środowisku kolejowym. W Europie obowiązują różne regulacje dotyczące zarządzania danymi oraz dostępu do informacji o ruchu kolejowym. Ponadto, wdrożenie RFID wymaga uzyskania odpowiednich certyfikatów oraz zgodności z normami bezpieczeństwa. W przypadku instalacji czytników RFID na sieci PKP PLK konieczne jest uzyskanie stosownych zezwoleń, co wydłuża proces wdrażania oraz zwiększa koszty inwestycji. Regulacje dotyczące ochrony danych, szczególnie w kontekście śledzenia taboru i ładunków, również wymagają spełnienia określonych norm, co komplikuje wdrożenie technologii na szeroką skalę.

Zakończenie

Technologia RFID odgrywa kluczową rolę w monitorowaniu taboru kolejowego, umożliwiając precyzyjną identyfikację i śledzenie pojazdów szynowych w czasie rzeczywistym. Integracja RFID z systemami GPS i DAC pozwala na stworzenie kompleksowego systemu monitorowania, eliminującego ograniczenia poszczególnych technologii i zwiększającego efektywność operacyjną kolei. Wdrożenie RFID przyczynia się do optymalizacji zarządzania taborom, redukcji strat operacyjnych oraz poprawy bezpieczeństwa transportu poprzez szybszą detekcję usterek i zapobieganie nieautoryzowanemu dostępowi.

Pomimo licznych korzyści, wdrożenie RFID wiąże się z istotnymi wyzwaniami, takimi jak wysokie koszty inwestycyjne, potrzeba standaryzacji oraz kwestie interoperacyjności w międzynarodowym transporcie kolejowym. Konieczne jest również dostosowanie regulacji prawnych, zwłaszcza w zakresie ochrony danych oraz certyfikacji sprzętu RFID.

Dalsze badania nad RFID powinny koncentrować się na jego integracji z analizą Big Data i sztuczną inteligencją w celu predykcji awarii i optymalizacji procesów operacyjnych. Istotne jest również analizowanie modeli finansowania wdrożenia tej technologii. Opracowanie spójnych standardów RFID na poziomie międzynarodowym umożliwi pełną interoperacyjność systemów i skuteczniejszą wymianę danych pomiędzy operatorami kolejowymi.

Technologia RFID, odpowiednio zaadaptowana i zintegrowana z innymi systemami, ma potencjał stać się jednym z fundamentów cyfrowej transformacji kolei w Polsce i Europie Środkowo-Wschodniej. Jednak pełne wykorzystanie potencjału RFID wymaga dalszych badań, szczególnie nad zagadnieniami interoperacyjności, finansowania inwestycji oraz dostosowania regulacji prawnych do dynamicznie zmieniających się warunków gospodarczych i technologicznych.

Bibliografia

- Asad, S. M., Ahmad, J., Hussain, S., Zoha, A., Abbasi, Q. H., Imran, M. A. (2020). Mobility prediction-based optimisation and encryption of passenger traffic-flows using machine learning. *Sensors*, 20(9), 2629.
- Cai, H., Zhai, Y., Wang, Y. (2022). RFID technology for railway safety monitoring system. In *2022 International Conference on Intelligent Transportation and Internet of Things (IT-IOT)* (94-99).
- Chen, Y. H., Hung, R. Z., Chen, L. K., Jan, P. T., Su, Y. R. (2019). Channel-quality aware RFID tag identification algorithm to accommodate the varying channel quality of IoT environment. *Applied Sciences*, 9(2), 321.
- Daniš, J., Zitrický, V., Stopka, O. (2022). Optimization of freight train dispatching using RFID-based tracking. *Railway Logistics Journal*, 18(3), 275–289.
- Dębowski, L. (2006). Technika RFID i jej aplikacje. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, (22), 31-36.
- Evsyukov, V., Popova, I., Danilov, I. (2022). Application of predictive maintenance in railway transport using RFID. *Transportation Research Procedia*, 59, 453–468.
- Freimane, J., Meztisa, M., Mihailovsa, F. (2017). Maneuver movements' safety increase using maneuver locomotive identification and distance control. *Procedia Computer Science*, 104, 375-379.
- Gulyi, V., Ilina, T., Kirina, E. (2019). Application of RFID in railway logistics. *Transportation Research Procedia*, 57, 463–469.
- GS1 (2023). RFID na kolei – Europejskie wytyczne identyfikacji taboru kolejowego z wykorzystaniem standardów GS1. Pozyskano z: https://gs1pl.org/app/uploads/2022/01/RFID_na_kolei_PL_19.10.pdf (21.02.2025).
- Hell, P. M., Varga, P. J. (2018). Accurate radiofrequency identification tracking in smart city railways by using drones. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 16, 333-341.
- Hranický, M. P., Šperka, A., Čamaj, J. (2021). RFID technology and its effects on improving technological processes at the Čierna nad Tisou station. *Transportation Research Procedia*, 55, 466–474.
- Kamakshi, T., Pritika, K. (2023). Smart railway infrastructure: Fusion of IoT, RFID and VANET for enhanced safety and operational efficiency. *IEEE International Conference on Advances in Computational Intelligence and Communication (ICACIC)*, 1-6.
- Kamiński, Ł. (2014). Technologia RFID w amerykańskich siłach zbrojnych: od logistyki do zarządzania personelem.
- Kapsalis, K., Belikaidis, I., Sørensen, O. (2021). RFID-based solutions for condition monitoring of railway infrastructure. *Transportation Research Procedia*, 56, 27-34.
- Kuan, W.-S., Pang, Z.-Y., Tam, K.-W., Chio, C.-H., Ting, S.-W., Leong, I.-P. (2023). Design of UHF RFID tag antenna applied in railway axle counting. *IEEE 13th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 21-24.

- Li, W., Xu, J., Niu, W. (2022). A railway warehouse information acquisition system based on passive RFID tag. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, 17(28).
- Marusin, A., Danilov, I., Popova, I. (2021). The impact of RFID technology on optimizing railway logistics. *International Journal of Rail Transport Planning & Management*, 19(2), 145–161.
- Olaby, O., Hamadache, M., Soper, D., Winship, P., Dixon, R. (2022). Development of a novel railway positioning system using RFID technology. *Sensors*, 22(6), 2401.
- Own, C. M., Lee, D. S., Wang, T. H., Wang, D. J., Ting, Y. L. (2013). Performance evaluation of UHF RFID technologies for real-time bus recognition in the Taipei bus station. *Sensors*, 13(6), 7797–7812.
- Popova, I., Evsyukov, V., Danilov, I., Marusin, A. (2021). Application of digital technologies in railway transport. *Transportation Research Procedia*, 57, 463–469.
- Railmarket (2022). La SNCF développe un système de détection intelligente des anomalies sur les trains Pozyskano z: <https://fr.railmarket.com/news/technology-innovation/3930-sncf-is-developing-a-system-for-intelligent-detection-of-anomalies-on-trains> (22.02.2025).
- Railmarket (2023). Branża transportowa wyraża obawy dotyczące niedostatecznie przetestowanej technologii DAC <https://pl.railmarket.com/news/technology-innovation/4863-the-freight-industry-voices-concerns-over-under-tested-dac-technology> (22.02.2025).
- Railtech (2022). RFID is the answer to defective wheels on Britain's railways Pozyskano z: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2022/05/18/rfid-is-the-answer-to-defective-wheels-on-britains-railways/?gdpr=accept> (22.02.2025).
- Ramesh, R., Divya, G., Thomas, N., Varghese, A., Mahendran, L. (2022). Real-time information display system for Indian railways using RFID. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(3), 45–52.
- Sarvade, S., Shirwala, V., Kugaonkar, P., Mudgonda, K. (2025). Optimizing Railway Signaling and Platform Management with LoRaWAN, RFID and Automation Technologies. *Procedia Computer Science*, 252, 557–566.
- Scott, J. F. (2019). *Ferroelectric Random Access Memories: Past, Present and Future. Integrated Ferroelectrics*, 199(1), 1–17. Pozyskano z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10584587.2019.1614225> (21.02.2025).
- Siemens (2017). Siemens networks locomotives of Deutsche Bahn Pozyskano z: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-networks-locomotives-deutsche-bahn> (22.02.2025).
- Skorobogatov, S. (2010). *Reverse engineering Flash EEPROM memories using Scanning Electron Microscopy*. University of Cambridge Repository. Pozyskano z: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/317394> (21.02.2025).
- Soares, J., Luís, M., Sargento, S. (2023). Mobile LoRa gateway for communication and sensing on the railway. *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 499–502.
- Stopka, O., Daniš, J., Zitrický, V. (2021). Optimization of working procedures in railway transport using RFID. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 19(2), 245–261.
- Sudhakaran, S., Maheswari, R., Devi, V. K. (2024). An improvised analysis of smart data for IoT-based railway system using RFID. *Automatika*, 65(1), 361–372.
- Szilágyi, E., Dupláková, D. (2016). Application of RFID technology for increasing efficiency and safety in railway transport. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, XIV(3), 139–144.

- Talib, N. H., Hasnan, K. B., Nawawi, A. B., Abdullah, H. B. (2020). Monitoring large-scale rail transit systems based on an analytic hierarchy process/gradient-based cuckoo search algorithm (GBCS) scheme. *Urban Rail Transit*, 6, 132-144.
- Watanabe, Y., Haya, H., Shinoda, M., Oomura, H. (2009). Sensor data collection system for health monitoring of railway structures. *QR of RTRI*, 50(1), 14-25.
- Weidong, L., Jinyu, X., Wa, N. (2021). A Railway Warehouse Information Acquisition System Based on Passive RFID Tag. *International Journal of Engineering Business Management*, 17(28), 25–31.
- Weiland, D. (2019). Logistics of intangible resources in building a competitive advantage in theoretical terms. *Transport Economics and Logistics*, Article 82.
- Weiland, D., Wierzbowski, P. (2020). Logistyka informacji w gospodarce 4.0. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- Yang, Y., Xu, X., Liu, Z. Z., Tan, Y. H., Luo, Z. (2022). Automatic deceleration and braking research for driverless vehicles in rail transit based on internet of vehicles. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 14(5), 640-644.
- Zitrický, V., Daniš, J., Stopka, O. (2021). Smart railway operations: Implementation of RFID in European rail corridors. *Journal of Transport and Supply Chain Innovation*, 32(4), 345–368.
- Zhang, X., & Tentzeris, M. (2011). Applications of fast-moving RFID tags in high-speed railway systems. *International Journal of Engineering Business Management*, 3(1), 27-31.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR RAILWAY FLEET MONITORING: THE SIGNIFICANCE OF RFID IN ADDRESSING CONTEMPORARY ECONOMIC AND SECURITY CHALLENGES

Abstract

Purpose – The article attempts to assess the significance of RFID technology in railway fleet monitoring in the context of contemporary economic and security challenges, with particular emphasis on the conditions specific to Poland. It also compares RFID technology with other fleet monitoring systems (DAC, GPS) to highlight their complementarity.

Methodology – The study employs a literature review, analysis of the author's practical experiences, and a comparative method.

Findings – The results demonstrate that RFID technology significantly enhances operational efficiency and safety by enabling faster and more reliable fleet identification. Additionally, it allows for system expansion to include fault detection and supports asset management processes. The main implementation barriers identified include high investment costs, particularly on the part of infrastructure managers, and the need for standardization. The article emphasizes the importance of RFID in railway transport and highlights the need for further research on interoperability, especially in the context of Poland.

Keywords: RFID, Digital Automatic Coupling (DAC), GPS, railway transport

JEL classification: L92, O33, R41, L86, Q55

Dariusz Weiland
Katedra Logistyki
Wydział Ekonomiczny
Uniwersytet Gdański

ul. Armii Krajowej 119
81-824 Sopot
dariusz.weiland@ug.edu.pl