

# Ocena ryzyka zastosowania bezdotykowej metody kontroli nawierzchni kolejowej jako metody alternatywnej dla kontroli infrastruktury przeprowadzanej przez pracowników

Michał BATKO<sup>1</sup>, Jarosław KONIECZNY<sup>2</sup>, Anna BUTOR<sup>3</sup>

## Streszczenie

Zarządcy infrastruktury kolejowej są zobowiązani do sprawdzania stanu technicznego infrastruktury w celu utrzymania bezpiecznego ruchu. Zwykle odbywa się to konwencjonalnymi metodami oraz narzędziami lub przez bezpośrednie kontrole przeprowadzane przez personel techniczny. Obserwowany obecnie rozwój technologiczny wskazuje na dostępność nowych metod pomiarowych, które mogą być wykorzystywane do monitorowania stanu infrastruktury kolejowej. Wprowadzenie nowych metod monitorowania infrastruktury jest jednak zmianą wpływającą na bezpieczeństwo, co wymaga oceny istotności tej zmiany do utrzymania wymaganego poziomu bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Autorzy dokonali oceny istotności zmiany sposobu monitorowania infrastruktury i związanej z tym oceny ryzyka w wyniku zastosowania bezdotykowej metody kontroli nawierzchni kolejowej, jako metody alternatywnej dla kontroli przeprowadzanej przez pracowników. Wskazano również dodatkowe środki kontrolne lub zapobiegawcze w odniesieniu do potencjalnych zagrożeń.

**Słowa kluczowe:** kontrola przeprowadzana przez pracowników, monitorowanie infrastruktury, bezzałogowe statki powietrzne

## 1. Zobowiązanie zarządców infrastruktury do stosowania metody oceny bezpieczeństwa oraz oceny i wyceny ryzyka

Zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi, uczestnicy systemu kolejowego, w szczególności przewoźnicy kolejowi, zarządcy infrastruktury kolejowej, podmioty odpowiedzialne za utrzymanie taboru kolejowego oraz producenci i podwykonawcy usług, ponoszą pełną odpowiedzialność za bezpieczeństwo systemu kolejowego [1, 2, 3, 4]. Jest to zgodne z zasadami określonymi w dyrektywie w sprawie bezpieczeństwa kolei [5]. Zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa wymaga od tych podmiotów rzetelnej identyfikacji zagrożeń i zarządzania ryzykiem z nimi związanym. Dodatkowo, stale zmieniający się rynek i postęp technologiczny umożliwiający wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań w transporcie kolejowym, motywuje przewoźników kolejowych do wprowadzania nowych metod i urządzeń w obszarach swojej działalności. To jednocześnie wymaga od uczestników rynku kolejowego

zapewnienia prawidłowego zarządzania wprowadzanymi zmianami oraz skutecznej identyfikacji i kontroli potencjalnego ryzyka z nimi związanego [6]. Wprowadzenie nowej metody kontroli infrastruktury kolejowej wymaga zatem upewnienia się, czy jest ona co najmniej tak samo bezpieczna i niezawodna, jak proces dotychczas stosowany. Aby zastąpić kontrole przeprowadzone przez pracowników, kontrolami wykonanymi przez bezzałogowe statki powietrzne (drony), należy ocenić wpływ zmiany w wyniku zastosowania nowej metody i sprawdzić, czy ryzyko z nią związane jest na akceptowalnym poziomie, co przedstawiono w dalszej części artykułu.

## 2. Przeprowadzanie kontroli infrastruktury kolejowej przez pracowników

Jedną z istotnych przyczyn ograniczających rozwój zarządców kolejowych są wysokie, a także stale rosnące koszty utrzymania infrastruktury kolejowej. Składają się na nie m.in. wysokie koszty napraw

<sup>1</sup> Mgr; DB Cargo Polska S.A., Członek Zarządu ds. Produkcji, e-mail: mbatko@poczta.fm.

<sup>2</sup> Dr hab. inż., prof. PŚ; Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, Katedra Transportu Kolejowego, e-mail: jaroslaw.konieczny@polsl.pl.

<sup>3</sup> Mgr inż.; Dyrektor Utrzymania Taboru Kolejowego DB Cargo Polska S.A, DB Cargo Polska; e-mail: butorania@poczta.fm.

infrastruktury, konieczność dokonywania kapitałochłonnych inwestycji, przebudów i modernizacji oraz koszty ciągłego utrzymania i systematycznej diagnostyki infrastruktury. W szczególności, powtarzające się kontrole i badania diagnostyczne skłaniają zarządców do poszukiwania rozwiązań zmierzających do automatyzacji tych procesów.

Na rynku znane są już kolejowe pojazdy pomiarowe [7] z funkcją rejestracji pracy, lokalizacji pomiaru lub z GPS. Pojazdy te mogą być również wyposażone w optyczne lub laserowe urządzenia pomiarowe [8], na przykład do pomiarów układu geometrycznego torów [9]. Niemniej jednak w takich przypadkach pojazdy wymagają obsługi przez wykwalifikowany personel techniczny, a także powodują zajętość linii kolejowej podczas pomiarów, co skutkuje spadkiem przepustowości linii. Ponadto, uzyskane w ten sposób dane wymagają czasochłonnej analizy [10].

W niniejszym artykule autorzy skupili się na kontroli nawierzchni kolejowej (wzrokowej) oraz na wybranych badaniach technicznych torów, które najczęściej są wykonywane przez uprawniony personel zarządzający infrastrukturą kolejową.

## 2.1. Konwencjonalne kontrole przeprowadzane przez pracowników

Obowiązek regularnych kontroli wynika z przepisów wewnętrznych każdego uprawnionego zarządcy [11] i są one częścią systemu zarządzania bezpieczeństwem zapewniającym bezpieczne prowadzenie ruchu kolejowego. Są to procesy czasochłonne, wymagające zaangażowania personelu technicznego zarządcy. Nieprzeprowadzenie kontroli w wyznaczonym terminie jest poważnym uchybieniem w utrzymaniu infrastruktury generującym ryzyko wystąpienia incydentu lub wypadku kolejowego [12].

Podstawowym zadaniem wykonywanym podczas kontroli jest wzrokowe sprawdzenie stanu torów, a także elementów technicznych sieci trakcyjnej i innych urządzeń pod względem bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Kontrole torów są wykonywane z częstotliwością określoną na podstawie kategorii linii, intensywności jej użytkowania i stanu technicznego; maksymalna, wymagana liczba kontroli, to dwie kontrole tygodniowo. Ponadto, istnieje konieczność przeprowadzania diagnostyki elementów infrastruktury kolejowej, np. w celu pomiaru i oceny stanu technicznego torów i rozjazdów. Taka diagnostyka odbywa się raz do dwóch razy w roku. Część zarządców wprowadziła także dodatkowe wymagania dotyczące przeprowadzania kontroli po dwóch lub więcej dniach bez pracy w celu zapewnienia, że dana linia kolejowa obsługuje bezpieczny ruch kolejowy (sprawdzenie, czy szlak jest przejezdny oraz czy nie doszło do kradzieży lub uszkodzenia infrastruktury w stopniu

zagrożającym bezpiecznemu ruchowi kolejowemu). Z doświadczenia przedsiębiorstwa InfraSilesia S.A., będącego zarządcą infrastruktury kolejowej wynika, że pracownicy prowadzący kontrole torów, średnio mogą zdiagnozować 0,5 km torów na godzinę. Taka czasochłonność wykonywanych kontroli wymaga znacznego zaangażowania pracowników w rutynowe i czasochłonne zadania [13, 14].

## 2.2. Kontrole bezdotykowe

Postęp technologiczny oraz dostępne technologie monitoringu powietrznego [15] uzasadniają stwierdzenie, że możliwe jest skonfigurowanie urządzenia w taki sposób, aby wykonywało ono kontrolę torów i wybranych elementów infrastruktury kolejowej, co w większości przypadków eliminowałoby konieczność kontroli wykonywanych przez pracowników na rzecz bezkontaktowego monitoringu powietrznego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (zwanymi inaczej BSP) [16].

Założeniem dalszej analizy jest wyposażenie bezzałogowego statku powietrznego w odpowiednią aparaturę pomiarową, która umożliwi pomiar wymaganego, szerokiego zakresu wartości niezbędnych do właściwego monitorowania i diagnostyki stanu infrastruktury kolejowej; obejmuje to sprawdzenie takich elementów jak:

- 1) szyny: pęknięcia poprzeczne, wyrwy w główkach szyn, przepalenia szyn, zbyt duże luzy między szynami, stykanie się końców szyn, krótkie wstawki (poniżej 6 m);
- 2) podkłady kolejowe: przemieszczenie wzdłużne, przemieszczenie skośne, zużycie biologiczne;
- 3) tory: odkształcenia poziome i profilowe, podmożliwość podłoża, zachwaszczenie i uszkodzenie skarpy bocznej na nasypie kolejowym lub w przekopie, drzewa rosnące bliżej niż 15 m od toru, przeszkody na torze, brak prześwietu, stan i czytelność znaków (sygnał Z1, znak D1) [17, 18];
- 4) przejazdy kolejowe: czystość przejazdu, prawidłowość ułożenia płyt przejazdowych, stan i czytelność znaków lub wskaźników (W6a, G3, STOP) [19].

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę istotności zmiany polegającej na zastąpieniu konwencjonalnej metody kontroli infrastruktury kolejowej (przeprowadzanej przez personel techniczny zarządcy), bezdotykową metodą kontroli infrastruktury kolejowej z użyciem bezzałogowego statku powietrznego wyposażonego w specjalistyczną aparaturę pomiarową. Następnie przeprowadzono analizę istotności planowanej zmiany i stwierdzono, czy planowana zmiana ma wpływ na bezpieczeństwo systemu kolejowego. Stwierdzono również, czy ta zmiana istotnie wpływa na bezpieczeństwo ruchu kolejowego.

Przedmiotem artykułu nie jest analiza kontroli infrastruktury przeprowadzonej za pomocą bezzałogowego statku powietrznego ani weryfikacja poprawności uzyskanych w ten sposób pomiarów. Należy nadmienić, że prowadzone są pierwsze testy takiego rozwiązania.

### **3. Ocena wpływu zmiany organizacyjnej na bezpieczeństwo systemu kolejowego i analiza istotności zmiany**

Każda zmiana organizacyjna lub techniczna w organizacji zarządcy kolejowego wymaga przeprowadzenia oceny wpływu zmiany na bezpieczeństwo systemu kolejowego oraz oceny istotności wprowadzonej zmiany. Główne zasady postępowania w takich przypadkach określa ustawa o transporcie kolejowym [20] oraz rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) nr 402/2013 z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka, uchylające rozporządzenie (WE) nr 352/2009, a także art. 6 dyrektywy 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych.

#### **3.1. Ocena wpływu zmian na bezpieczeństwo systemu kolejowego**

Pierwszym etapem analizy jest ustalenie, czy proponowana zmiana wpłynie na bezpieczeństwo systemu kolejowego zarządcy. Podmiot ten jest końcowym użytkownikiem systemów dopuszczonych do eksploatacji i utrzymywanych przez kompetentny personel techniczny danej organizacji, a także przez podmioty zewnętrzne. Zgodnie z wyżej wymienionymi przepisami, pełną odpowiedzialność za ruch kolejowy i świadczone usługi ponosi zarządca. Na tym etapie konieczne jest jak najdokładniejsze zdefiniowanie systemu, który ma zostać poddany zmianie. Konieczne jest zatem zebranie takiej ilości i zakresu danych, które pozwolą na wiarygodną klasyfikację zmiany wpływającej (lub nie) na bezpieczeństwo. Analizując pojęcie zmiany, należy zauważyć, że wymagania prawne odnoszą się wyłącznie do zmian zaklasyfikowanych przez zarządcę jako związane z bezpieczeństwem. Zmiany niezwiązane z bezpieczeństwem nie wymagają stosowania procedur dotyczących zarządzania ryzykiem. Ze względu na fakt, że przedmiotowa zmiana polega na istotnej zmianie sposobu utrzymania części infrastruktury oraz sposobu przeprowadzania kontroli, na podstawie których stwierdza się czy ruch kolejowy jest możliwy, zmiana ta z pewnością wpłynie na system bezpieczeństwa zarządcy. Automatyzacja procedur kontroli i oceny stanu

infrastruktury na podstawie komputerowej analizy danych, zebranych podczas lotu bezzałogowego statku powietrznego, znacznie zmniejsza udział personelu technicznego w procesie oceny; do tej pory personel podejmował decyzje na podstawie wiedzy i doświadczenia w zakresie utrzymania infrastruktury. Ponieważ regulacje dotyczące przeprowadzania kontroli są najczęściej częścią systemu zarządzania bezpieczeństwem (dalej SZB) lub zintegrowanego systemu zarządzania (dalej ZSZ), wprowadzenie zmian w sposobie przeprowadzania kontroli będzie wymagało również zmiany podstawowego dokumentu zarządcy jakim jest SZB lub ZSZ oraz instrukcji diagnostyki nawierzchni kolejowej [21, 22].

#### **3.2. Analiza istotności zmiany**

Po stwierdzeniu, że zmiana sposobu kontroli nawierzchni kolejowej wpływa na system bezpieczeństwa zarządcy, należy ocenić znaczenie tej zmiany i określić czy jest ona istotna, czy nieistotna dla systemu bezpieczeństwa. Dalszy proces wdrażania zmiany będzie zależał od tej decyzji. W związku z tym niezwykle ważne jest, aby ocena wpływu na bezpieczeństwo była przeprowadzana rzetelnie przez wykwalifikowany personel. Zaleca się, aby strona wnioskująca o zmianę sama dokonała takiej oceny, ponieważ ma ona najlepszą wiedzę na temat warunków i okoliczności, w których zmiana ma nastąpić. Niemniej jednak podwykonawstwo tej usługi stronom trzecim jest dopuszczalne.

Na podstawie profesjonalnej oceny, zarządca decyduje o znaczeniu zmiany na podstawie kryteriów wymienionych przez ustawodawcę. Każde kryterium powinno być ocenione z punktu widzenia znaczenia zmiany dla systemu bezpieczeństwa, a następnie ta ocena powinna być uzasadniona.

Ocenę znaczenia zmiany, jeśli kontrola stanu infrastruktury będzie wykonywana bezzałogowymi statkami powietrznymi (zamiast pracowników zarządcy), przedstawiono w tablicy 1.

W wyniku analizy istotności takiej zmiany oceniono, że dla dwóch z sześciu analizowanych kryteriów (tabl. 1) zmiana jest znacząca, dlatego uznaje się, że zmiana jest ogólnie znacząca. W przypadku istotnej zmiany konieczna jest identyfikacja i wycena ryzyka, a także uzyskanie niezależnej oceny od podmiotu oceniającego proces zarządzania ryzykiem. Rolą podmiotu jest weryfikacja i potwierdzenie, że proces zarządzania ryzykiem u strony wnioskującej o zmianę został przeprowadzony prawidłowo i kompleksowo. Jednostka oceniająca powinna potencjalnie wskazać, czy istnieją jakiegokolwiek dodatkowe działania lub analizy, które zarządca musi wdrożyć w celu zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa systemu kolejowego po wdrożeniu zmiany.

Tablica 1

**Analiza znaczenia zmiany w sposobie kontroli nawierzchni kolejowej przez wykorzystanie automatycznych pomiarów za pomocą bezzałogowych statków powietrznych [6, 23]**

Wymagania wynikające z rozporządzenia Komisji (UE) nr 402/2013	Czy zmiana jest znacząca?	Uzasadnienie odpowiedzi
<b>Skutki awarii systemu:</b> wiarygodny najgorszy scenariusz w przypadku awarii ocenianego systemu, uwzględniający istnienie barier zabezpieczających poza ocenianym systemem	Nie	Konsekwencje awarii w przypadku incydentu będą identyczne jak w przypadku kontroli wykonywanych przez personel kolejowy.
<b>Innowacja wykorzystana przy wprowadzaniu zmiany:</b> kryterium to obejmuje innowacje dotyczące zarówno całego sektora kolejowego, jak i organizacji wprowadzającej zmianę	Tak	Zdalny pomiar parametrów układu torowego za pomocą zaprogramowanych, bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w specjalistyczne czujniki i kamery, to innowacja w branży kolejowej na skalę krajową.
<b>Złożoność zmiany</b>	Tak	Zmiana jest złożona, ponieważ wpływa na inne elementy systemu kolejowego, tj. pojazdy kolejowe poruszające się po infrastrukturze, ludzi, samochody.
<b>Monitoring:</b> niezdolność monitorowania wprowadzonej zmiany podczas całego cyklu życia systemu i dokonywania odpowiednich interwencji	Nie	Wykonywane pomiary będą regularnie monitorowane za pomocą pomiarów kontrolnych wykonywanych przez personel techniczny. Automatycznie wykonywane pomiary będą oceniane przez system. Ponadto, personel techniczny zarządcy będzie mógł monitorować jakość infrastruktury, gdy zajdzie taka potrzeba.
<b>Odwracalność zmiany:</b> niezdolność powrotu do systemu sprzed zmiany	Nie	Zmiana jest z natury odwracalna, ponieważ łatwo jest powrócić do przeprowadzania kontroli przy pomocy personelu technicznego.
<b>Dodatkowość:</b> ocena znaczenia zmiany z uwzględnieniem wszystkich przeprowadzonych niedawno zmian ocenianego systemu, które były związane z bezpieczeństwem i nie zostały ocenione jako znaczące	Nie	Zmiana nie ma cech dodatkowości, ponieważ do tej pory w przedmiotowym systemie nie wprowadzono żadnych zmian uznanych za istotne.

Tablica 2

**Identyfikacja i ocena ryzyka FMEA [24, 25, 26]**

Ryzyko/aspekty środowiskowe (potencjalne ryzyko/aspekty środowiskowe zidentyfikowane podczas wdrażania zmiany)	Potencjalne konsekwencje	Istniejące środki kontroli	Prawdopodobieństwo	Wykrywalność	Uciążliwość	Wartość poziomu ryzyka
1	2	3	4	5	6	7
<b>Korzystanie z urządzenia bez homologacji</b>	Błędny pomiar, niekorzystny wpływ na radiokomunikację pociągową i urządzenia kontroli ruchu	Systematyczna (codzienna) kontrola urządzenia	1	1	9	9
<b>Nieskalibrowanie urządzenia przed rozpoczęciem pomiarów</b>	Błędny pomiar	Automatyczne sprawdzanie urządzenia z funkcją ostrzegania w przypadku nieprzeprowadzenia kalibracji przed rozpoczęciem pracy	2	1	10	30
<b>Lokalne warunki pogodowe uniemożliwiające wykonanie pomiarów</b>	Błędny pomiar, brak pomiaru	Weryfikacja przez dyspozytora i personel techniczny; przeprowadzanie kontroli w sposób konwencjonalny	3	3	10	90
<b>Zakłócenia z sieci trakcyjnej wpływające na działanie urządzenia</b>	Błędny pomiar, brak pomiaru	Testowanie urządzenia przy aktywnej sieci trakcyjnej; wyłączenie sieci trakcyjnej na czas pomiarów	2	9	9	162



1	2	3	4	5	6	7
<b>Kolizja z urządzeniami znajdującymi się poza skrajnią (słupy i sieć trakcyjna, mosty)</b>	Błędny pomiar, urazy u osób lub uszkodzenie mienia	Programowanie trasy lotu z uwzględnieniem istniejących przeszkód; automatyczne systemy unikania kolizji używane przez bezzałogowe statki powietrzne	3	2	9	<b>54</b>
<b>Emisja zakłóceń oddziałujących na urządzenia sterowania ruchem kolejowym</b>	Nieprawidłowe działanie urządzeń sterowania ruchem kolejowym lub urządzeń pomiarowych	Testowanie urządzenia przy włączonych urządzeniach sterowania ruchem kolejowym	1	2	10	<b>30</b>
<b>Emisja zakłóceń oddziałujących na urządzenia radiokomunikacyjne pociągu</b>	Niewłaściwe funkcjonowanie urządzeń radiokomunikacyjnych pociągu, incydenty kolejowe	Systematyczne kontrole urządzeń radiokomunikacyjnych przy włączonych urządzeniach	3	3	10	<b>90</b>
<b>Kolizje z ptakami i innymi obiektami latającymi</b>	Uszkodzenie sprzętu pomiarowego, kolizja z osobami lub innymi pojazdami	Automatyczne systemy unikania kolizji w celu uniknięcia kolizji z innymi obiektami latającymi; kontrola urządzenia przed pomiarami	4	2	9	<b>72</b>
<b>Kolizja z pojazdem szynowym poruszającym się w przeciwnym kierunku</b>	Uszkodzenie pojazdu, incydent kolejowy lub wypadek	Programowanie trasy lotu, automatyczny system unikania kolizji	5	2	10	<b>100</b>
<b>Opady deszczu lub śniegu podczas dokonywania pomiarów</b>	Błędny lub niekompletny pomiar, brak pomiaru	Monitorowanie pogody przez dyspozytora	4	3	9	<b>108</b>
<b>Silny wiatr lub jego poddmuchy</b>	Brak pomiaru	Monitorowanie pogody przez dyspozytora	3	6	9	<b>162</b>
<b>Nieoczyszczony tor lub pobocze toru</b>	Błędny pomiar, brak pomiaru	Weryfikacja nieoczyszczonego odcinka przez personel techniczny	4	5	6	<b>120</b>
<b>Awaria zasilania urządzenia</b>	Brak pomiaru	Weryfikacja przez dyspozytora i personel techniczny	2	1	8	<b>24</b>
<b>Brak połączenia z Internetem</b>	Brak możliwości przesyłania danych pomiarowych	Weryfikacja integralności danych przesłanych przez dyspozytora	2	2	10	<b>40</b>
<b>Brak sygnału GPS (urządzenie uległo dezorientacji)</b>	Uszkodzenie urządzenia, kolizja z osobami lub innymi pojazdami	Programowanie trasy lotu i weryfikacja zasięgu GPS podczas lotu kontrolowanego	1	3	9	<b>27</b>
<b>Niska temperatura, zamrażanie urządzenia</b>	Skrócenie czasu pracy urządzenia, niekompletny pomiar	Monitorowanie pogody przez dyspozytora	3	4	8	<b>96</b>
<b>Nieprawidłowy odczyt i interpretacja pomiarów przez urządzenie</b>	Błędne dane i raporty	Kalibracja urządzeń pomiarowych przed i po przeprowadzeniu pomiarów	4	6	10	<b>240</b>
<b>Brak przeszkolenia personelu w zakresie obsługi urządzenia</b>	Uszkodzenie urządzenia, błędne pomiary	Szkolenie personelu technicznego w zakresie obsługi urządzenia zgodnie z harmonogramem	2	3	7	<b>42</b>
<b>Brak przeszkolenia personelu w zakresie konserwacji i utrzymania urządzenia</b>	Nieprawidłowe działanie urządzenia i błędne pomiary	Szkolenia personelu technicznego, który przeprowadza konserwację urządzenia zgodnie z harmonogramem	2	3	8	<b>48</b>
<b>Brak konserwacji lub nieprawidłowa konserwacja urządzenia</b>	Uszkodzenie urządzenia, błędne pomiary	Zaplanowanie i przeprowadzenie czynności konserwacyjnych urządzenia zgodnie z harmonogramem	2	3	8	<b>48</b>

### 3.3. Identyfikacja, klasyfikacja i wycena ryzyka

Ocena, a także wycena ryzyka powinny być przeprowadzane przez kompetentnych specjalistów zarządzających. Może to być ten sam zespół, który przeprowadził ocenę znaczenia zmiany, niemniej jednak możliwe jest stworzenie częściowo lub całkowicie nowego zespołu; naczelną zasadą powinno być to, że to zadanie należy powierzyć specjalistom, którzy doskonale znają system, w którym zmiana jest wdrażana.

W wyniku analizy istotności zmiany, zidentyfikowano najważniejsze czynniki ryzyka dotyczące wdrażanej zmiany w systemie. Do oceny zidentyfikowanych zagrożeń można wykorzystać różne metody oceny. Należy jednak wziąć pod uwagę, że zastosowana metoda powinna być odpowiednia do analizowanej zmiany i środowiska, w którym jest wdrażana. W przypadku kontroli nawierzchni kolejowej zdecydowano się na zastosowanie metody analizy rodzajów i skutków możliwych błędów FMEA (ang. *Failure Mode Effect Analysis*). Jest ona wykorzystywana przez firmy do zapobiegania lub minimalizowania skutków wad występujących w produktach lub procesach produkcyjnych. Wykorzystanie tej metody polega na zbadaniu wszelkich wad możliwych do przewidzenia przed zatwierdzeniem danego rozwiązania. W przypadku już istniejących procesów ta metoda polega na zbadaniu już występujących lub potencjalnych wad. Jej ostatecznym celem jest ocena ryzyka związanego z planowanym lub zatwierdzonym rozwiązaniem. W ten sposób metoda FMEA umożliwia realizację zasady minimalizacji wad systemu [27].

Metoda FMEA jest powszechnie stosowana, ponieważ jest skuteczna podczas analizy złożonych procesów i wdrażania nowych technologii w sytuacjach zagrożenia dla ludzi i środowiska oraz gdy urządzenie jest używane w niekorzystnych warunkach. FMEA powinna również pomóc w wykrywaniu potencjalnych czynników, które mogłyby utrudnić lub nawet uniemożliwić realizację procesu lub wytworzenie produktu. Prawidłowe wdrożenie metody FMEA wymaga podjęcia następujących kroków [28]:

- zdefiniowania analizowanego systemu,
- sporządzenia listy możliwych wad lub usterek w odniesieniu do zdefiniowanego systemu,
- sporządzenia listy prawdopodobnych konsekwencji wskazanych wad,
- sporządzenia listy przyczyn wskazanych wad,
- przeprowadzenia analizy potencjalnych wad,
- określenia ryzyka związanego z wadami,
- planowania i wdrażania środków zaradczych oraz ocena ich skuteczności.

Dla każdej wady/usterki zdefiniowano następujące parametry w skali od 1 do 10:

- prawdopodobieństwo wystąpienia wady (P),
- wykrywalność wady (D),
- uciążliwość wady dla infrastruktury (S).

Zespół ekspertów odpowiedzialny za wdrożenie metody FMEA określa wartości dla parametrów P, D, S na podstawie wag uzgodnionych wcześniej dla każdego zespołu i dla każdego parametru; w przypadku małego prawdopodobieństwa lub bardzo rzadkiego występowania wady, parametr P powinien być wyznaczony na poziomie 1–2, podczas gdy dla wysokiej lub bardzo wysokiej częstotliwości występowania wady ten parametr powinien wynosić 9–10. Podobne podejście stosuje się przy definiowaniu parametru uciążliwości S i parametru wykrywalności D.

Do celów analitycznych stosowany jest wskaźnik poziomu ryzyka RPN, będący iloczynem parametrów P, D i S. Im wyższy iloczyn, tym bardziej znacząca wada wdrażanej zmiany [29] według zależności:

$$RPN = P \cdot D \cdot S.$$

Przyjmuje się, że wada jest istotna, gdy jej wskaźnik poziomu ryzyka przekracza wartość 121. Należy zaznaczyć, że im wyższy RPN, tym ryzyko jest bardziej znaczące i dotkliwe dla podmiotu wnioskującego o zmianę. Wartość RPN przekraczająca 150 oznacza ryzyko krytyczne dla produktu. Znaczenie poszczególnych skrótów:

- P – stopień prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka,
- D – wykrywalność ryzyka,
- S – uciążliwość ryzyka, istotność,
- RPN – wskaźnik poziomu ryzyka.

Na podstawie macierzy ryzyka zidentyfikowano następujące poziomy ryzyka [30]:

- 1) ryzyko niedopuszczalne, znacząco zagrażające bezpieczeństwu, wymagające natychmiastowego podjęcia działań korygujących – poziom ryzyka 1,  $RPN > 150$ ;
- 2) ryzyko dopuszczalne, niemniej jednak powinno się podjąć odpowiednie środki zaradcze – poziom ryzyka 2,  $120 < RPN \leq 150$ ;
- 3) ryzyko dopuszczalne i nie wymagające żadnych działań – poziom ryzyka 3,  $RPN \leq 120$ .

Zgodnie z przeprowadzoną identyfikacją i wyceną ryzyka, niedopuszczalne wskaźniki poziomu ryzyka występują w trzech przypadkach (poz. 6, 14, 17). W celu zatwierdzenia nowego rozwiązania do użytku, zespół ekspertów musi opracować dodatkowe środki kontroli lub środki zaradcze dotyczące rodzajów ryzyka o wartościach  $RPN > 120$ . Następnie należy sprawdzić, czy po wdrożeniu środków zaradczych wartość wskaźnika poziomu ryzyka spadnie poniżej 120. Jeśli tak, nowa technologia kontroli będzie mogła zostać wykorzystana.

Niezależnie jednak od zastosowanej metody oceny ryzyka, konieczne jest stałe monitorowanie wdrażanej

zmiany, która ze względu na swój innowacyjny charakter może wskazywać na inne okoliczności sprzyjające powstawaniu nowych czynników ryzyka.

#### 4. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój nowych technologii, ich rosnąca dostępność i malejące koszty powodują, że przy wzrastających kosztach zatrudnienia i braku dostępności pracowników, przedsiębiorstwa kolejowe coraz częściej poszukują innowacyjnych rozwiązań. Stosunkowo hermetyczna i wolno zmieniająca się branża kolejowa stoi przed wyzwaniem bezpiecznego wdrożenia nowych technologii, które umożliwią rozwój transportu kolejowego i obniżenie kosztów funkcjonowania w tym sektorze. Regulacje wprowadzone przez prawodawstwo Unii Europejskiej i prawo krajowe wskazują wytyczne, których należy przestrzegać i obowiązki, które należy spełnić przy wdrażaniu zmian w działalności przedsiębiorstw kolejowych.

Należy pamiętać, że odpowiedzialnością za prawidłowe wdrożenie zmian, ustawodawca obciążył podmioty wnioskujące o ich wprowadzenie, dając im jednocześnie swobodę w zakresie wyboru metody oceny i wyceny ryzyka, wprowadzenia środków dodatkowej kontroli czy środków zaradczych.

W przypadku zmiany polegającej na zastąpieniu (pracowniczej) kontroli nawierzchni kolejowej, kontrolą nawierzchni kolejowej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w odpowiedni sprzęt pomiarowy, zmiana jest możliwa do wdrożenia. Analiza oceny wpływu na bezpieczeństwo systemu kolejowego wykazała, że zmiana ta wpływa na bezpieczeństwo i wpływ ten jest znaczący. Oznacza to, że proces zarządzania bezpieczeństwem u zarządcy infrastruktury powinien być weryfikowany przez niezależną jednostkę oceniającą. Ponadto, ze względu na przekroczenie dopuszczalnych wartości poziomu ryzyka, we wskazanych przypadkach należy wdrożyć środki zapobiegawcze minimalizujące ryzyko. Zaleca się określenie dodatkowych środków monitorowania w pierwszej fazie wdrażania nowej metody w celu utrzymania wymaganego poziomu bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego.

Można założyć, że po wykonaniu wymienionych działań wdrożenie nowoczesnej metody kontroli będzie możliwe, bezpieczne i korzystne dla zarządców infrastruktury.

#### Literatura

- Hessami A.G.: *A Systems View of Railway Safety and Security*, in K. Zboinski (ed.), Railway Research – Selected Topics on Development, Safety and Technology, IntechOpen, 2015, London, 10.5772/62080.
- Pieniak-Lendzion K., Stefaniak R.: *Selected issues in rail transport safety in Poland. Scientific Papers of The Silesian University of Technology*, Organisation and Management Series. 2019, 134, s. 203–213.
- Wigger P.: *Independent Safety Assessment – Benefits and Methodology*, Transport Research Arena – Europe 2012, Procedia – Social and Behavioral Science 48 (2012) 3361–3370.
- Zhang Z., Liu X., Hu H.: *Passenger rail station safety improvement and analysis of end-of-track collisions based on systems-theoretic accident modeling and processes*, Smart and Resilient Transport, 3(2)/2021, s. 94–117.
- Directive 2004/49/WE of the European Parliament and the Council of 29 April 2004 on safety on the Community's railways and amending Council Directive 95/18/EC on the licensing of railway undertakings and Directive 2001/14/EC on the allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification (Railway Safety Directive). *Official Journal of the European Union*, L 164, tom 47, 2004, s. 44.
- Commission Implementing Regulation (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009 as well as art. 6 of Directive 2004/49/WE of the European Parliament and the Council on safety on the Community's railways. *Official Journal of the European Union*, L 121, tom 56, 2013, s. 8.
- Błaszkiwicz D., Urbanek M.: *Kolejowe pojazdy pomiarowe*. Logistyka, 2015 nr 6, s. 987.
- Soni A., Robson S., Gleeson B.: *Optical Non-Contact Railway Track Measurement with Static Terrestrial Laser Scanning to Better Than 1.5mm RMS (7493)*, FIG Working Week 2015, Sofia, Bulgaria, 17–21 May 2015.
- Richards P.: *Network Rail's Train-borne Infrastructure Condition Monitoring Fleet*, Presentation to the IMechE, Worcestershire Branch, 15 listopada 2016, <https://nearyou.imeche.org/docs/default-source/Worcester-Area/2016-11-15-network-rail-infrastructure-condition-monitoring-presentation.pdf?sfvrsn=0> [dostęp 08.05.2022].
- Cafiso S. et.al.: *Application of NDT to Railway Track Inspection*. International Conference on Traffic and Transport Engineering – Belgrade, 24–25 listopada, 2016.
- PKP Polskie Linie Kolejowe SA. (2005). *Instrukcja diagnostyki nawierzchni kolejowej Id-8 (Instruction on railway surface diagnostics Id-8)*, Appendix to Regulation No 5/2005 of the Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe SA. Warszawa: PKP

- Polskie Linie Kolejowe SA Centrala Biuro Dróg Kolejowych.
12. Rail Transit Track Inspection and Maintenance, APTA Standards Development Program. American Public Transportation Association. 2017. [https://www.apta.com/wp-content/uploads/Standards\\_Documents/APTA-RT-FS-S-002-02-Rev-1.pdf](https://www.apta.com/wp-content/uploads/Standards_Documents/APTA-RT-FS-S-002-02-Rev-1.pdf) [dostęp 09.05.2022].
  13. Liu X. et.al.: *CPL Optimization of Ultrasonic Rail-Defect Inspection for Improving Railway Transportation Safety and Efficiency*. Journal of Transportation Engineering. 2014. 140;10.
  14. Osman, M.H., Kaewunruen S., Jack A.: *Optimisation of schedules for the inspection of railway tracks*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F, Journal of Rail and Rapid Transit 232(6):095440971772163; 2017.
  15. Witayangkurn A. et.al.: *Real-time monitoring system using unmanned aerial vehicle integrated with sensor observation service*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
  16. Mukhamediev R.I. et.al.: *Review of Some Applications of Unmanned Aerial Vehicles Technology in the Resource-Rich Country*, Applied Science. 2021, 11, 10171, <https://doi.org/10.3390/app112110171>.
  17. Gabara G., Sawicki P.: *A New Approach for Inspection of Selected Geometric Parameters of a Railway Track Using Image-Based Point Clouds*. Sensors 2018, 18, 791; doi:10.3390/s18030791.
  18. Muinde M.S.: *Railway track geometry inspection optimization*. Maintenance Engineering, master's level, 2018, Luleå University of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1257286/FULLTEXT01.pdf> [dostęp 09.05.2022].
  19. Milosevic M.D.G. et.al.: *Condition Monitoring of Railway Crossing Geometry via Measured and Simulated Track Responses*, Sensors 2022, 22, 1012. <https://doi.org/10.3390/s22031012>.
  20. Ustawa o transporcie kolejowym z dnia 28 marca 2003. (2003), *Journal of Laws No. 87*. pos. 789 with subsequent amendments.
  21. Commission Regulation (EU) No 1158/2010 of 9 December 2010 on a common safety method for assessing conformity with the requirements for obtaining railway safety certificates.
  22. Commission Regulation (EU) No 1169/2010 of 10 December 2010 on a common safety method for assessing conformity with the requirements for obtaining a railway safety authorisation.
  23. Feroz, S., Abu Dabous Saleh: *UAV Based Remote Sensing Applications for Bridge Condition Assessment*. Remote Sens. 2021, 13, 1809. <https://doi.org/10.3390/rs13091809>.
  24. Catelani M.et.al.: *FMECA Assessment for Railway Safety-Critical Systems Investigating a New Risk Threshold Method* [dostęp IEEE, 2021. 9], pp. 86243–86252.
  25. Szkoda M., Kaczor G.: *Application of fmea analysis to assess the safety of rail vehicles*, EURO – ZEL 2015, 23<sup>rd</sup> International Symposium June 2–3, 2015, Žilina.
  26. Szkoda M., Satora M.: *The application of failure mode and effects analysis (FMEA) for the risk assessment of changes in the maintenance system of railway vehicles*, Technical Transactions 8/2019. s. 159–171.
  27. Dinmohammadi F. et.al.: *Risk Evaluation of Railway Rolling Stock Failures Using FMECA Technique: A Case Study of Passenger Door System*. Urban Rail Transit (2016) 2(3–4):128–145.
  28. Folejewska A.: *Analiza FMEA – zasady, komentarze, arkusze*. Warszawa, Wydawnictwo Verlag Dashofer, Sp. z o.o., 2010.
  29. Sitarz M., Chruzik K., Wachnik R.: *Application of rams and FMEA methods in safety management system of railway transport*, Journal of KONBiN. 2012. 4(24). s. 149–160.
  30. Siudecki J.: *Stosowanie rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 402/2013*, Warszawa, 2018, Warsztaty SIRTS.