

Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów

Piotr LESIAK¹

Streszczenie

W artykule opisano obszary zastosowań dronów oraz obowiązujące przepisy ich stosowania. Szczególną uwagę poświęcono inspekcji i utrzymaniu infrastruktury kolejowej. Dokonano przeglądu wykorzystania dronów w wielu sieciach kolejowych na świecie, ze szczególnym uwzględnieniem implementacji rozwiązań autonomicznych. Przeanalizowano bezpieczeństwo dronów na kolei oraz wskazano propozycje kierunków wdrażania ich na sieci kolejowej PKP PLK S.A.

Słowa kluczowe: drony, inspekcja, infrastruktura, kolej, bezpieczeństwo

1. Wstęp

Komercyjne zastosowania dronów (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV), czyli bezałogowych statków powietrznych (BSP), zyskują w ostatnich latach coraz większą popularność, ze względu na niewątpliwe zalety. Zarówno skuteczność, jak i potencjalne możliwości zastosowania dronów w zadaniach profesjonalnych, w równej mierze zależą od umiejętności sterowania BSP, jak i wielu innych czynników technicznych, organizacyjnych, prawnych oraz normalizacyjnych [31].

Rozważając przydatność dronów jako narzędzi użytecznych, należy wziąć pod uwagę praktyczne możliwości techniczne w poszczególnych grupach zastosowań od najprostszych, jak monitorowanie wtargnięć, odstraszanie intruzów (złodziei), wandalizm [8], po bardziej wyrafinowane, które na przykład obejmują:

- monitorowanie i inspekcję infrastruktury, takiej jak:
 - mosty i wiadukty (wykrywanie ubytków, pęknięć, deformacji, korozji konstrukcji oraz inteligentna konserwacja) [13, 16, 20, 22, 28],
 - tunele (skrajnia) [29, 39],
 - zapory oraz zbiorniki wodne (nieszczelności, podmycia),
- osuwiska (skarpy i klify w pobliżu zabudowań i ciągów komunikacyjnych),
- drogi (uszkodzenia nawierzchni, ekranów, ograniczników, barier),
- linie tramwajowe i kolejowe (deformacje i wady powierzchniowe szyn, pęknięcia podkładów, kontrola ogrzewania i konserwacji rozjazdów, ubytki

w konstrukcji toru, roślinność) [1, 11, 17, 23, 24, 26, 34, 35, 38],

- linie energetyczne i trakcja kolejowa (słupy i konstrukcje kratowe, izolatory, przewody, stacje transformatorowe),
- budynki (stan techniczny, efektywność energetyczna, katastrofy budowlane),
- mapowanie (obrazy geodezyjne wysokiej rozdzielczości terenów i obiektów),
- ochrona środowiska (pomiar zanieczyszczenia powietrza i spalania niedopuszczalnych materiałów, monitorowanie wysypisk),
- rolnictwo (skala zniszczenia upraw i wynikające stąd ubezpieczenie) [36],
- zarządzanie kryzysowe (klęski żywiołowe, powódzie, trzęsienia ziemi, pożary na dużą skalę),
- służby porządkowe i medyczne (wypadki komunikacyjne – transport krwi i respiratorów [33], wykrywanie zagrożeń podczas zgromadzeń i manifestacji),
- przesyłki kurierskie.

Niektóre ze wskazanych obszarów zastosowań są identyczne pod względem technicznym, ale mogą wymagać innego wyposażenia, są inaczej zorganizowane, przypisane do specjalizowanych jednostek organizacyjnych lub regulowane w specyficznych przepisach. Tak jak monitorowanie służy wspomaganie codziennych, rutynowych czynności w skutecznym wykonywaniu zadań, to inspekcja służy technicznemu wsparciu czynności nadzorczych, wymaganych przepisami technicznymi, budowlanymi, o dozorze technicznym.

¹ Dr hab. inż.; Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, Wydział Transportu i Informatyki; e-mail: piotr.lesiak@wsei.lublin.pl.

Na rynku są dostępne drony umożliwiające mocowanie sprzętu o najwyższej jakości do obrazowania oraz różnych sensorów służących do rejestrowania danych. Drony z takim wyposażeniem są narzędziem pracy wielu grup zawodowych i umożliwiają prowadzenie prac o jakości badań naukowych.

Operatorzy dronów stopniowo uczą się wykonywać precyzyjne loty w warunkach gwarantujących pozyskiwanie obrazów o jakości fotogrametrycznej, wymaganej dla określonego typu pomiarów. W zależności od specyficznych zastosowań, można brać pod uwagę różnie wyposażone drony, planować przetwarzanie informacji narzędziami informatycznymi dostosowanymi do konkretnych potrzeb lub wymagań.

Należy podkreślić, że w skali światowej [11], rynek dronów w ostatniej dekadzie rośnie wykładniczo, przy czym w zastosowaniach kolejowych w 2019 roku jego wartość wyniosła około 4 miliardów dolarów, z roczną tendencją wzrostu na poziomie 40% [15].

W artykule skoncentrowano się na wykorzystaniu dronów do inspekcji infrastruktury kolejowej, dokonując analizy ich zastosowania na sieciach kolejowych, ze szczególnym uwzględnieniem systemów autonomicznych. Rozwój techniki badawczej z wykorzystaniem tych statków powietrznych wspomaga również coraz bardziej klarowne przepisy legislacyjne, które obejmują wszystkie kraje UE, jak również wprowadzane są na innych kontynentach [15].

W Polsce, przygoda z dronami na kolei rozpoczęła się w 2014 roku, gdy PKP Cargo zakupiło dron o nazwie Bielik (w kolejnych latach zakupiono inne modele), w celu przepłaszania na Śląsku złodziei transportów węgla, metali oraz paliw, a także do nadzoru przewozów kontenerowych. Stopniowo rozszerzano zakres działania na inne regiony kraju. Za pomocą bezzałogowych statków powietrznych można obserwować miejsca trudno dostępne na szlakach i stacjach kolejowych. Po wyposażeniu w kamerę termowizyjną, obserwację trudno dostępnych miejsc można prowadzić również nocą. Informacja o ewentualnych kradzieżach jest przekazywana na bieżąco (on-line) do centrum zarządzania, dzięki czemu reakcja może być natychmiastowa. Inwestycja szybko się zwróciła, gdyż po roku kradzieże zmniejszyły się o około 40% [8].

Podobne działania, tylko na większą skalę, podjęły w 2018 roku koleje brytyjskie Network Rail (NR) na południowo-zachodniej trasie kolejowej. Wykorzystano tam dron do zarejestrowania wtargnięcia i nielegalnej działalności, a zdjęcia przesłano do brytyjskiej policji transportowej. W tym samym roku belgijska spółka kolejowa Infrabel, wdrożyła nocne loty dronem

w celu zwalczania kradzieży kabli trakcyjnych. Dron działał poza zasięgiem wzroku operatora, a sterowanie odbywało się za pomocą obrazu przesyłanego z drona (BVLOS – ang. *Beyond Visual Line of Sight*).

W 2018 roku spółka PKP PLK S.A. podpisała umowę z firmą Fotoraporty Sp. z o.o. na realizację usług monitorowania wybranych inwestycji kolejowych za pośrednictwem BSP. Zakres zamowienia obejmuje cykliczny i doraźny monitoring postępu prac budowlanych na wybranych liniach kolejowych z wykorzystaniem danych fotogrametrycznych i materiału wideo. Badania infrastruktury kolejowej systemem UAV w zasięgu wzroku (VLOS – ang. *Visual Line of Sight*), w zakresie urządzeń sterowania ruchem kolejowym, podjęto na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej [18, 37].

Nie podlega wątpliwości, że zaistniał odpowiedni czas, aby ustanowić stosowne przepisy regulujące rynek dronów [30]. W 2008 roku Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej (UE) wydały Rozporządzenie nr 216/2008 w sprawie wspólnych zasad w dziedzinie lotnictwa cywilnego i utworzenia Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (ang. *European Union Aviation Safety Agency – EASA*), zastąpionego Rozporządzeniem nr 1139/2018. Agencja ma władzę prawną w zakresie lotnictwa cywilnego, w tym UAS² i zezwoliła każdemu państwu członkowskiemu UE na tworzenie własnych przepisów ustawowych i wykonawczych dotyczących dronów o masie 150 kg lub mniejszej, tablica 1 [7].

2. Przegląd zastosowania dronów na sieciach kolejowych

Coraz większa liczba zarządców sieci kolejowych dąży do stworzenia innowacyjnej „cyfrowej kolei”, czyli dokładnego i dynamicznego narzędzia do wizualizacji w celu identyfikacji faktycznych i potencjalnych uszkodzeń infrastruktury kolejowej. Polega to na pozyskiwaniu danych o najwyższej jakości, dzięki czemu wspomagane są decyzje podejmowane podczas planowania i ustalania priorytetów w zakresie rozwoju, utrzymania, napraw i odnowy kolei [15].

Takim nowym narzędziem wspomagającym stały się drony, które mogą kontrolować długie odcinki linii kolejowych w czasie rzeczywistym. Rozwiązania te prowadzą do szybkiego wykrywania uszkodzeń i zapobiegania wypadkom. Dzięki temu znacząco zmniejsza się nakład siły roboczej, wprowadza oszczędność kosztów i czasu badań oraz zapewnia natychmiastowy dostęp do dokładnych danych.

² UAS (ang. *Unmanned Aircraft System*) – system, w którego skład wchodzi: dron, system kontroli, połączenie służące do kontrolowania drona oraz pozostałe wyposażenie drona).

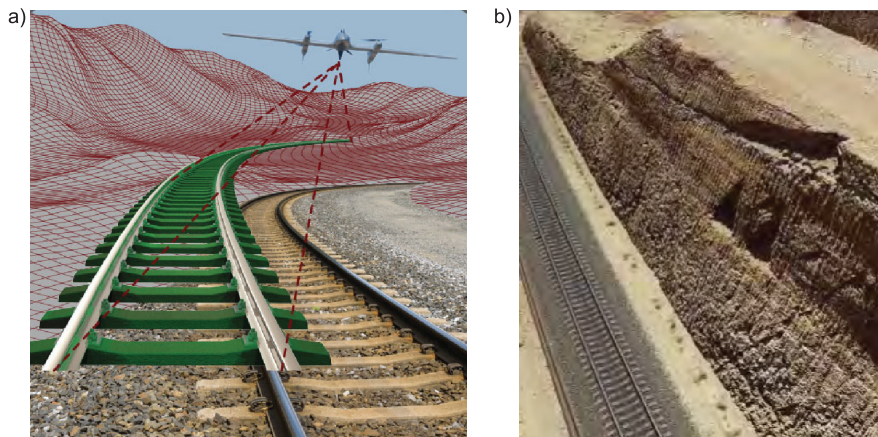
Tablica 1

Przepisy regulujące obszary działania dronów [7]

Kraj	Organ regulujący prawo	Masa drona [kg]	Maksymalna prędkość [km/h]	Maksymalna wysokość	Odległość od pilota
Europa					
Francja	French Civil Aviation Authority – Francuski Urząd Lotnictwa Cywilnego	≥ 25	nie zdefiniowano	150 m nad poziomem gruntu lub 50 m nad dowolnym obiektem o wysokości większej niż 100 m	Operacje VLOS i BVLOS w określonych ramach regulacyjnych, w zależności od masy drona
Niemcy	German Federal Aviation Office (FAO) – Niemiecki Federalny Urząd Lotniczy	5–25 komercyjne	nie zdefiniowano	100 m lub 50 m w przypadku kontrolowanej przestrzeni powietrznej	Operacje VLOS
Hiszpania	Agencia Española de Seguridad Aérea (AESA) – Hiszpańska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego	≥ 2 prywatny; 2–150 komercyjne	nie zdefiniowano	120 m nad poziomem gruntu	> 500 m, > 15 km dla zatwierdzonych lotów BVLOS
Wielka Brytania	Civilian Aviation Authority (CAA) – Urząd Lotnictwa Cywilnego	≥ 20 prywatny 20–150 komercyjne	nie zdefiniowano	122 m nad poziomem gruntu	Operacje VLOS. Komercyjne operacje BVLOS są niedozwolone
Ameryka Północna					
Kanada	Transport Canada	prywatny ≥ 35 < 35 handlowy	nie zdefiniowano	90 m nad poziomem gruntu	> 500 m
USA	Federal Aviation Administration (FAA) – Federalna Administracja Lotnicza	≥ 25 komercyjne	161	122 m nad poziomem gruntu lub konstrukcją	Operacje VLOS
Azja i Pacyfik					
Chiny	Civil Aviation Administration of China – Administracja Lotnictwa Cywilnego w Chinach	≤ 0,25	100	122 m nad poziomem gruntu	Operacje VLOS i BVLOS w ramach określonych ram regulacyjnych
Japonia	Japan Civil Aviation Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation – Japońskie Biuro Lotnictwa Cywilnego, Ministerstwo Ziemi, Infrastruktury i Transportu	< 0,200	nie zdefiniowano	150 m nad poziomem gruntu	Operacje VLOS
Nowa Zelandia	Civil Aviation Authority of New Zealand – Urząd Lotnictwa Cywilnego Nowej Zelandii	≥ 25	nie zdefiniowano	122 m nad poziomem gruntu	VLOS. Operacje BVLOS dozwolone po uzyskaniu certyfikatu
Afryka					
Afryka Południowa	South African Civil Aviation Authority – Południowoafrykański Urząd Lotnictwa Cywilnego	≥ 20	nie zdefiniowano	122 m nad poziomem gruntu	VLOS. Operacje BVLOS są dozwolone za specjalną zgodą

Pomiar jest wykonywany z dokładnością od ułamków do pojedynczych milimetrów. Po zarejestrowaniu, nakładające się obrazy lotnicze są przetwarzane w oprogramowaniu do fotogrametrii w celu wytworzenia dokładnej chmury punktów 3D. Przez porównanie z chmurami punktów odniesienia z poprzednich

inspekcji, można monitorować zmiany infrastruktury. W przeciwieństwie do tradycyjnych wizyjnych metod badań obiektów kolejowych, dane z badań topograficznych są uzupełniane ortofotografiami o bardzo wysokiej rozdzielczości (rys. 1), których płaszczyzna projekcji jest równoległa do płaszczyzny odniesienia.



Rys. 1. Skanowanie wizyjne linii kolejowej dronem: a) ilustracja badania [27], b) fotogrametryczny obraz 3D infrastruktury kolejowej [29]



Rys. 2. Inspekcja infrastruktury kolejowej dronem: a) badanie toru [12], b) widok ogólny toru z wysokości 25 m [6], c) przybliżenie fragmentu toru – widoczne oznaczenia podkładów [6], d) widok szyny z przytwierdzeniami sprężystymi – widoczny zgrzew [6], e) badanie stanu konstrukcji betonowego wiaduktu kolejowego [6], f) badanie korozji konstrukcji stalowej mostu kolejowego [25]

Profesjonalne drony standardowo wyposażono w urządzenia umożliwiające wykonywanie niezwykle precyzyjnych zdjęć lotniczych za pomocą kamer Ultra 4K o rozdzielczości obrazu rzędu 100 MPx (megapikseli), z funkcją nagrywania wideo w UHD (ang. *Ultra High Definition*) o rozdzielczości 4096 × 2160, z różnymi prędkościami klatek i ze zmiennym systemem widzenia – pionowo w dół lub poziomo, w zależności od badanych obiektów. Przy tak dużej rozdzielczości można zidentyfikować wady powierzchni tocznej główek szyn [38], oznaczenia na podkładkach, jakość montażu przytwierdzeń i złączy szynowych lub uszkodzenia konstrukcji i powierzchni wiaduktów oraz mostów (rys. 2) [9]. Jest to kluczowa funkcja podczas kontroli torów kolejowych oraz infrastruktury. Kraje europejskie testują lub już wykorzystują drony w swoich sieciach kolejowych do monitorowania, inspekcji, badań, a także utrzymania (tabl. 2) [7].

Francja

Koleje francuskie (Société Nationale des Chemins de fer Français – SNCF) od 2013 roku używają drony do inspekcji, nadzoru oraz prac konserwacyjnych. Władze powołały spółkę zależną Altametris, która zapewniła niestandardowe rozwiązania dronów ze zwróceniem szczególnej uwagi na czujniki a także projektuje innowacyjne rozwiązania oraz przetwarza dane. Tablica 3 przedstawia dane dronów obsługiwanych przez Altametris.

Altametris nawiązała partnerstwo naukowe i regulacyjne z różnymi organizacjami i firmami, takimi jak:

- ONERA (*Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales*) – francuskie laboratorium badań kosmicznych,
- DGAC (*Direction Générale de l'Aviation Civile*) – francuski organ lotnictwa cywilnego,

Tablica 2

Zastosowania systemu dronów w europejskich sieciach kolejowych [7]

Kraj	Odpowiedzialny organ / firma	Cel wdrożenia	Kluczowy dostawca
Francja	SNCF Réseau	Pomiary topograficzne, mapowanie sieci, prace kontrolne, nadzór, utrzymanie	Altametris (spółka zależna SNCF Réseau), ARCEP, CNIL, Delair Tech, DGAC, ONERA
Niemcy	Deutsche Bahn (DB)	Nadzór, inspekcja i ocena, planowanie budowy	Mikrodrony (producent)
Holandia	ProRail	Kontrola systemów ogrzewania rozjazdów na torach, kontrola ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych	Arcadis
Norwegia	Bane NOR	Nadzór, a także smarowanie napędów zwrotnicowych za pomocą autonomicznych dronów	Nordic Unmanned, Total Trafikkhjelp, IRIS Group Nordic
Hiszpania	CAF Signalling	Geolokalizacja systemów sygnalizacyjnych na liniach dużych prędkości	SigmaRail, UC3M Intelligent Systems Laboratory
	Thales, Adif	Testy wykrywania błędów na linii dużych prędkości Madryt – Sewilla (do prac utrzymaniowych). Wdrażanie automatycznych pociągów – ang. <i>Automatic Train Operation</i> (ATO)	SigmaRail, UC3M Intelligent Systems Laboratory
Wielka Brytania	Department for Transport (DfT)	Testy i próby programu Pathfinder firmy i DfT	SenSat
	Transport for London (TfL)	Pomiary i utrzymanie zasobów w sieci londyńskiego metra	Lanes Rail
	Network Rail (NR)	Prace kontrolne i utrzymanie torów	Aecom, Cyberhawk, zespół NR Air Operations

Tablica 3

Dane dronów obsługiwanych przez Altametris [7]

Parametr	Szczegóły
Masa	2–20 kg
Czujniki	Sprzęt wideofotograficzny o wysokiej rozdzielczości, wielospektralne kamery termiczne (pasmo podczerwieni) i/lub LiDAR (system laserowy mierzący środowisko 3D)
Flota	12 dronów i robotów

- Delair Tech – firma typu start-up specjalizująca się w projektowaniu dronów i analizie danych,
- CNIL (*Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés*) – francuska agencja ochrony danych osobowych,
- ARCEP (*Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes*) – francuski organ regulacyjny ds. Telekomunikacji.

Altametris współpracuje także z innymi operatorami energii elektrycznej z siedzibą we Francji, a także z operatorami zagranicznymi (np. kolejami szwajcarskimi).

Niemcy

Od 2015 roku niemieckie koleje (Deutsche Bahn – DB) eksploatują drony w całym kraju w celu nadzoru, planowania budowy, a także do monitorowania drzew w pobliżu linii kolejowych. Władze kolei używają 12 rodzajów dronów, które są zróżnicowane pod względem nośności, czasu lotu i gotowości operacyjnej. Każdy dron jest wyposażony w kamery, które mogą nagrywać filmy, a także rejestrować obrazy cyfrowe w wysokiej rozdzielczości lub obrazy w podczerwieni [21].

Holandia

Holenderska Agencja Rządowa ProRail³ zastosowała drony wyposażone w czujniki podczerwieni do sprawdzenia systemów ogrzewania rozjazdów na swoich torach. Ponadto, firma Arcadis użyła dronów do kontroli konstrukcji stalowych obiektów inżynierskich (mosty, wiadukty) [25]. Dokonuje także wizualnej kontroli stanu ochrony antykorozyjnej, szacuje pozostały cykl życia powłok, doradza w zakresie działań mających na celu utrzymanie.

Od lipca 2018 roku firma ProRail używa dronów oraz skanów 3D do mapowania drzew wzdłuż holenderskiej sieci kolejowej. Firma stosuje tę technologię do identyfikacji drzew zagrożonych przewróceniem lub utratą gałęzi, umożliwiając tym samym podjęcie działań zapobiegawczych, zanim drzewa spowodują zagrożenia ruchu na torach, natomiast koleje holen-

derskie (*Nederlandse Spoorwegen – NS*) monitorują infrastrukturę stacji kolejowych i okolicznych torów.

Norwegia

W grudniu 2016 r. spółka Bane NOR, zarządca infrastruktury kolei niemieckich, zamówiła nadzór nad sześcioma obszarami infrastruktury, podlegającymi jurysdykcji administracji kolei krajowych. Firma Total Trafikkhjelp otrzymała kontrakt dla obszaru północnego, firma IRIS Group Nordic dla obszaru zachodniego, natomiast firma Nordic Unmanned dla pozostałych czterech obszarów. Firmy te zapewnią filmy i zdjęcia wysokiej jakości, umożliwią fotografowanie w podczerwieni oraz wykonają analizę modelu terenu.

W 2018 r., spółka Bane NOR ogłosiła plany opracowania systemu z dronem w technologii autonomicznej do smarowania napędów zwrotnicowych. System zaprogramowano zgodnie z trasą jazdy przy użyciu współrzędnych mapy. Bane NOR jest pierwszym zarządcą na świecie, który wprowadził technologię dronów do utrzymania infrastruktury kolejowej [3].

Hiszpania

Firma SigmaRail dostarcza rozwiązania CAF (*ang. The Common Assessment Framework*) do firm Signalling i Thales, wykorzystujące drony do zarządzania infrastrukturą kolejową na liniach Kolei Dużych Prędkości w Hiszpanii. Firma opracowała drony we współpracy z *Intelligent Systems Laboratory UC3M*. Tablica 4 przedstawia szczegóły dotyczące drona używanego przez SigmaRail na hiszpańskich liniach Kolei Dużych Prędkości [14].

Przykładem może być zastosowanie metody CAF przez zautomatyzowane drony na linii dużych prędkości Alicante – Murcia do instalacji systemu sygnalizacji, opartego na standardzie europejskiego systemu zarządzania ruchem kolejowym ERTMS. Firma opracowała specjalne narzędzia do umieszczania danych pobranych z UAV w formacie, który mógłby być wykorzystywany przez CAF do programowania urządzeń ERTMS.

Przedsiębiorstwa Thales i Administrador de Infraestructuras Ferroviaria wdrożyły drony do przepro-

Tablica 4

Parametry drona SigmaRail

Parametr	Szczegóły
Sprzęt wizyjny	Kamery RGB lub termowizyjne
Lokalizacja	Każde zdjęcie jest zlokalizowane geograficznie za pomocą pokładowego systemu GPS
Wydajność badań	Odcinek o długości około 6 km krócej niż godzinę
Pamięć	2 GB danych w 20-minutowym locie

³ ProRail – holenderska organizacja rządowa zajmująca się utrzymaniem i rozwojem infrastruktury kolejowej.

wadzenia testów wykrywania uszkodzeń. Proces ten skraca czas utrzymania infrastruktury kolejowej [14].

Wielka Brytania

Władze transportowe w kraju prowadzą wdrażania, do poszczególnych segmentów kolei, systemów dronów, pochodzących od różnych dostawców [6, 7, 9]. Departament Transportu (Department for Transport – DfT) uruchomił w 2017 r. program Pathfinder koncentrujący się na partnerstwie między rządem i przemysłem w kluczowych sektorach. Firma SenSat (w imieniu DfT) przeprowadza testy i próby dotyczące możliwości wykorzystania dronów do poprawy usług w różnych sektorach. W czerwcu 2018 r. firma uzyskała specjalne zezwolenie na prowadzenie prób w odległości do 12 km od zdalnego pilota, czyli poza zasięgiem wzroku (BVLOS).

W grudniu 2018 roku na linii High Speed 2 (HS2) z Londynu do Birmingham o długości 230 km, firma SenSat ukończyła badania za pomocą dronów. W ciągu trzech tygodni firma zarejestrowała 18,2 miliardów punktów pomiaru danych.

Przedsiębiorstwo Transportowe z Londynu (Transport for London – TfL) po dwunastomiesięcznym okresie testowania i zatwierdzania, udzieliło firmie Lanes Rail zezwolenia na prowadzenie badań infrastruktury w sieci londyńskiego metra za pomocą dronów. Jest to pierwszy wykonawca, który uzyskał długoterminową licencję na użytkowanie dronów w zasobach TfL. W maju 2017 r. firma zawarła pięcioletnią umowę na prace utrzymaniowe sieci. Odpowiada za utrzymanie i naprawę torów, budynków stacji, mostów oraz realizację prac inżynierskich z istotnym wsparciem dronów.

Network Rail (NR), zarządca infrastruktury Wielkiej Brytanii wdrożył systemy dronów w celu:

- identyfikacji problemów z infrastrukturą i pracami ziemnymi,

- prowadzenia nadzoru nad zagrożeniami związanymi z wodą, takimi jak zbiorniki wodne i podmycia w pobliżu rzek,
- zarządzania wzrostem roślinności i monitorowania inwazji zwierząt,
- identyfikacji i monitorowania miejsc wykroczeń i samobójstw.

Działalność NR ma na celu poprawę wydajności przez zdalne monitorowanie aktywów i ograniczenie potrzeby kontroli na miejscu przez personel terenowy. Tablica 5 przedstawia parametry dronów używanych przez NR [8].

Australia

Utrzymanie rozległej, szóstej na świecie pod względem długości sieci kolei australijskich, narzuca specyficzne wymagania, szczególnie na oddalonych od siebie obszarach. Z tego powodu, Instytut Kolejowy (Institute of Railway Technology – IRT) w Monash wdraża systemy UAS, aby pomóc w przejściu na autonomiczną inspekcję torów [2, 29, 39].

Wykorzystanie przez IRT najnowszych technologii, takich jak *Instrumented Revenue Vehicle (IRV)*, umożliwia zidentyfikowanie widocznych wad w szynach, a także brakujących części w przytwierdzeniach i połączeniach szyn.

Metro *Trains Melbourne* używa dronów do wykrywania wandalii i intruzów. Drony rozmieszczone w określonych sekcjach sieci wyposażono w kamery, w tym kamery termowizyjne, które reagują na incydenty. Dane są przekazywane do centrum kontroli i z nich do policji.

Drony badające tunele są zdolne do bezpiecznego lotu ograniczonego przestrzennie (brak zasięgu GPS). Dlatego wyposażono je w czujniki laserowe, aby umożliwić pomiar przestrzeni zamkniętych i pozycjonowanie w ograniczonej przestrzeni (rys. 3).

Tablica 5

Parametry dronów używanych przez NR [8]

Parametr	Szczegóły
Masa	7 kg (maksymalnie)
Zasięg	Zezwala się na lot do 500 metrów od pilota
Lot	Zezwala na latanie na wysokość 122 m
Czas lotu przed doładowaniem	20 minut
Załoga	Co najmniej dwie osoby (jeden pilot dowódca i jeden obserwator / operator kamery)
Aparat fotograficzny	Systemy obrazowania wideo w wysokiej rozdzielczości 4K i systemy fotografowania w wysokiej rozdzielczości
Cechy	<ul style="list-style-type: none"> • Wbudowany online obszar środowiska geoprzestrzennego (GEO) • Wbudowany protokół powrotu do domu (RTH – ang. <i>Return to Home</i>) • Wiele silników i łopat wirnika



Rys. 3. Inspekcja tunelu: a) dron podczas kontroli [29], b) chmura punktów 3D tunelu z wnękami [39]

Stany Zjednoczone

Według Stowarzyszenia Kolei Amerykańskich (*Association of American Railroads – AAR*), Stany Zjednoczone mają około 225 tys. km sieci kolejowej i ponad 61 tys. mostów, które zgodnie z normami bezpieczeństwa torów i mostów wydanych przez Federalną Administrację Kolei (*Federal Railroad Administration's*) są badane specjalizowanymi pojazdami oraz ręcznymi przyrządami. W celu uzupełnienia działań kontrolnych [32], od 2015 roku na rozległej sieci głównych torów i bocznic, koleje wdrażają i testują technologię dronów.

Jednym z pierwszych wdrożeń były pomiary dynamiki ruchu mostu. Bezpośrednie badania w terenie są trudne i kosztowne ze względu na niedostępność ustalonego punktu odniesienia, dlatego do realizacji tych zadań wykorzystano drona zintegrowanego z dopplerowskim czujnikiem laserowym. Celem takiej inspekcji było badanie odkształceń mostów podczas obciążenia przejeżdżającym pociągiem. Zestawy operacyjne AMROS, mogą również precyzyjnie zlokalizować pozycję drona względem mostu.

Od 2015 roku, firma BNSF Railway Co, stosuje w pełni autonomiczne drony w celu gromadzenia danych z rozległej infrastruktury kolejowej. Są to inspekcje w trybie BVLOS, a dron jest programowany zgodnie z planami. Loty tego typu muszą mieć zgodę Federalnej Administracji Lotniczej (*Federal Aviation Administration's – FAA*). Drony są stosowane również do badania wykolejeń, gdyż umożliwiają personelowi kolejowemu bezpieczne i wydajne obserwowanie obszarów, które mogą być niedostępne w sytuacjach awaryjnych. W 2016 roku kolej Union Pacific Railroad wykorzystwała transmisję na żywo z jednego ze swoich dronów, aby zbadać tor podczas powodzi w stanie Iowa.

Koleje również mają przyznane prawa lotnicze obejmujące przytorową infrastrukturę, która oferuje sieć elektryczną do ładowania dronów. Jest to okazja do wprowadzenia na rynek aktywów handlowym

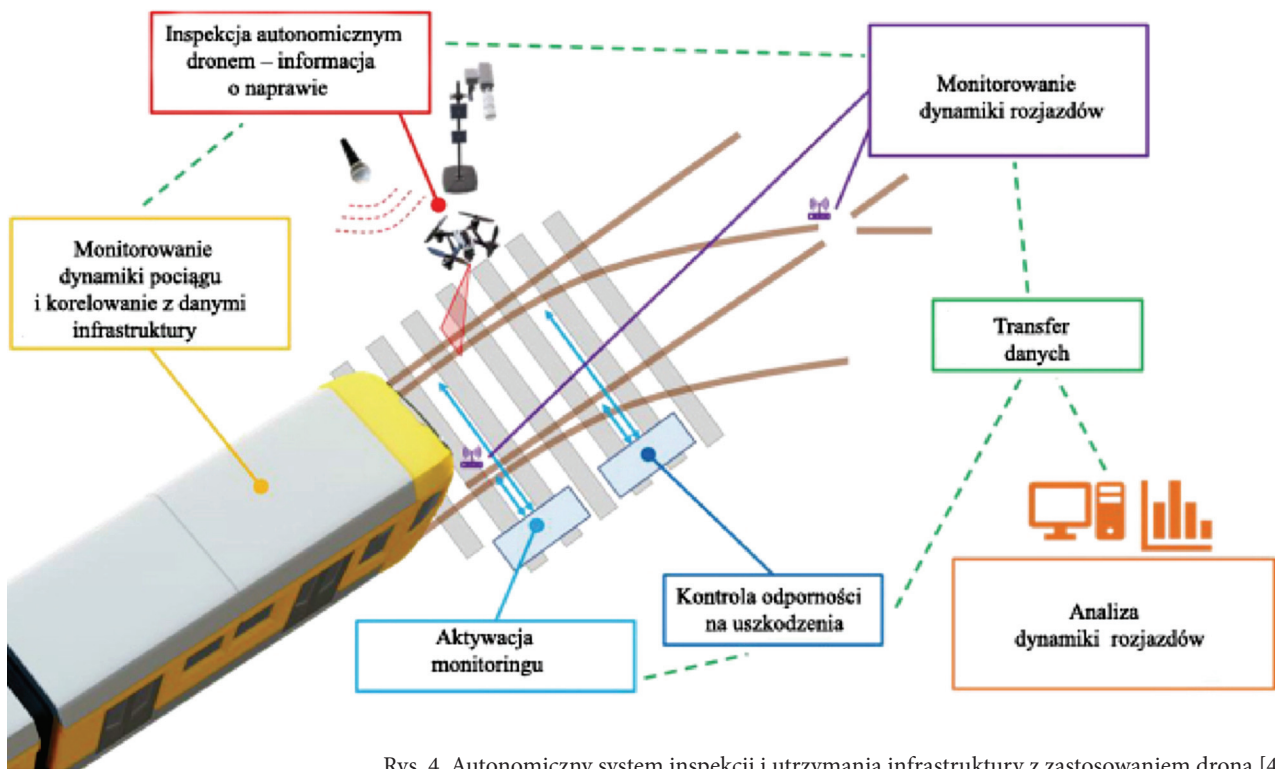
spółkom akcyjnym Amazon i Walmart, liderom dostarczania dronów. Spółki te zazwyczaj dysponują urządzeniami dystrybucyjnymi w pobliżu głównych linii kolejowych.

3. Przykłady implementacji autonomicznych systemów dronów

W ostatnich latach Centrum Diagnostyki PKP PLK S.A. wdrożyło wizyjne metody inspekcji linii kolejowych. Kamery z reguły są przymocowane do specjalistycznej drezyny lub wagonu, a do rozpoznawania wad wykorzystuje się algorytmy oparte na sieciach neuronowych [19]. Zazwyczaj jest to kosztowna implementacja, przy czym ze względu na zajętość toru pojazdem pomiarowym, niektóre badania wymagają zmniejszenia prędkości rozkładowych pociągów, co niekorzystnie wpływa na system kolejowy.

Z tego powodu zarządcy innych sieci kolejowych coraz śміiej sięgają po wspomaganie inspekcji dronami (rozdział 2), ze szczególnym uwzględnieniem dronów autonomicznych. Wykorzystują one w pełni zintegrowane technologie współpracy z systemami zainstalowanymi w torze (rys. 4) i umożliwiają:

- autonomiczną inspekcję rozjazdów torów (ang. *Switches & Crossings – S&C*) za pomocą laserów, wideo, akustyki i innych technik nieniszczących (ang. *Non-Destructive Testing – NDT*) oraz uzyskiwanie informacji o autonomicznym utrzymaniu (np. smarowanie, włączenie ogrzewania),
- wbudowane monitorowanie (pomiar) dynamiki rozjazdów za pomocą akcelerometrów oraz innych czujników wraz z inteligentnymi algorytmami przetwarzania,
- monitorowanie (pomiar) dynamiki pociągu i korelowanie z danymi uzyskanymi z infrastruktury,
- wbudowane monitorowanie uruchomienia systemu,
- kontrolę rozjazdów torów odporną na błędy.

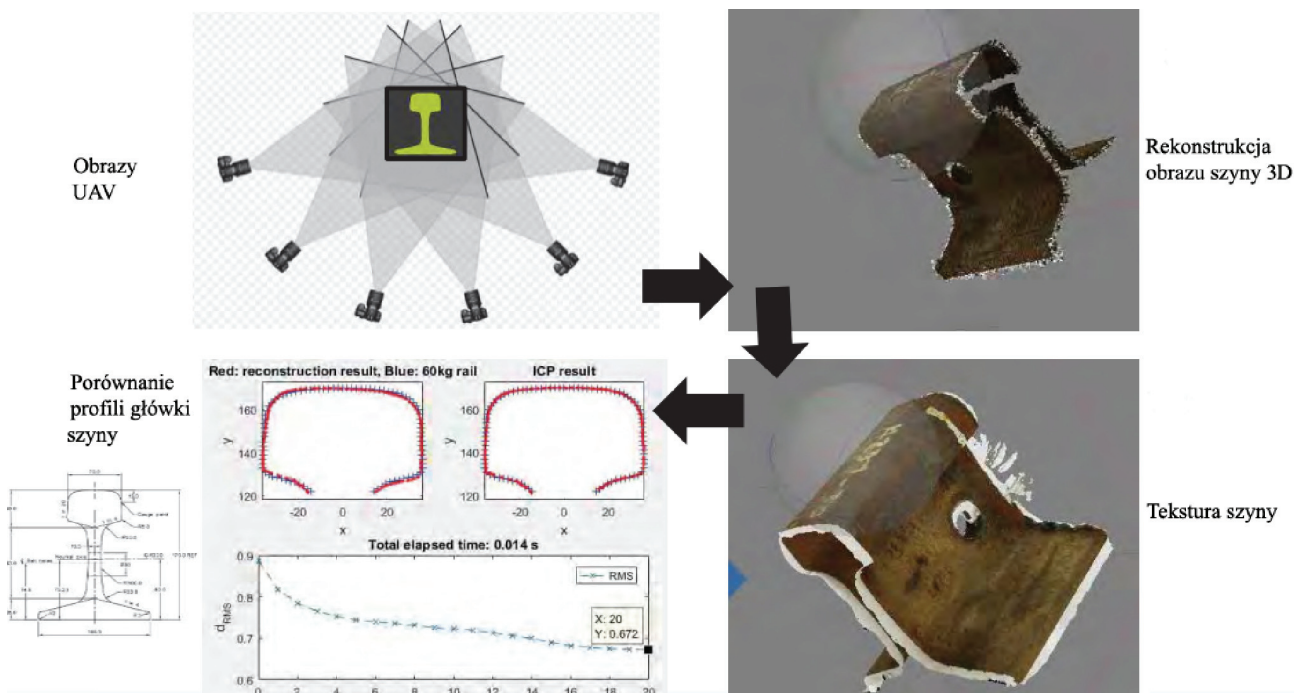


Rys. 4. Autonomiczny system inspekcji i utrzymania infrastruktury z zastosowaniem drona [4]

Strumień danych o ściśle powiązanej współpracy, tworzą autonomiczny system. Oprócz standardowych systemów manewrowania i pozycjonowania, drony używane w tych aplikacjach są zazwyczaj przystosowane do włączania elementów czujnikowych i wykonawczych. Pomimo obaw związanych z wykorzystaniem

dronów na kolei jako platformy inspekcyjnej, rosnąca liczba badań oraz przykładowych zastosowań sugeruje, że ten kierunek będzie się dynamicznie rozwijał.

Jako przykład nowego urządzenia pomiarowego zamontowanego na dronie, można zaliczyć system do kontroli profilu główki szyny (rys. 5).



Rys. 5. Pomiary profilu główki szyny dronem [29, 39]

Ta hybryda, uzbrojona w kamery oplatające szynę po bokach, dysponuje umiejętnością do zdalnego lądowania na torze i jazdy wzdłuż szyny za pomocą opartej na wizji rekonstrukcji 3D, opracowanej za pomocą oprogramowania CAD (ang. *Computer-Aided Design*). Dron może unosić się w powietrzu przez około 20 minut i latać oraz lądować z prędkością 5–10 m/s.

Dzięki algorytmom MVS (ang. *Multi-View Stereo*), można rekonstruować kształt geometryczny 3D z kilku obrazów uzyskanych przez drona, z dokładnością porównywalną z danymi uzyskanymi przez skanery laserowe 3D. W badaniu porównano rekonstrukcje MVS z modelem CAD z zastosowaniem metody ICP (ang. *Iterative Closest Point*). Dokładność kształtu każdego profilu porównano z rzeczywistym kształtem szyny 60 E1.

Porównanie wskazuje, że kształt przekroju w wyniku rekonstrukcji oraz wynik ICP są prawie takie same z minimalnym średnim kwadratowym błędem RMS (ang. *Root Mean Square*) wynoszącym 0,67 m. Jest to błąd wyznaczany przez sumowanie kwadratów błędów indywidualnych, a następnie podzielenie uzyskanej sumy przez liczbę uwzględnionych wartości i wyznaczenie pierwiastka kwadratowego z uzyskanego ilorazu. Warto zauważyć, że wyniki ICP można wykorzystać jako miarę do oceny stanu zużycia główek szyny. Skala błędu RMS rośnie wraz ze wzrostem zużycia szyny. Pokazuje to na silny potencjał rekonstrukcji 3D, która wykorzystuje tylko kilka zdjęć w celu uzupełnienia tradycyjnych ręcznych lub zautomatyzowanych (laserowych) pomiarów profilu główki szyny [39].

W autonomicznych dronach do inspekcji kolejowych duży nacisk położono na wizualizację komputerową, algorytmy przetwarzania danych, uczenia maszynowego, głębokiego uczenia i sztucznej inteligencji, z wykorzystaniem autonomicznych platform informatycznych [6].

4. Analiza bezpieczeństwa dronów na kolejach

Stosowanie dronów nad linią kolejową wiąże się ze znacznym niebezpieczeństwem, ryzykiem i stanowi poważne wyzwania operacyjne. Drony w pierwszej kolejności wymagają nawigacji na długich odcinkach toru. Istnieją jednak pewne zagrożenia dla satelitarne-go systemu pozycjonowania GPS (ang. *Global Positioning System*) spowodowane środowiskiem, jak mosty, wiadukty, roślinność i tym podobne przeszkody ograniczające widok nieba, a tym samym nieoczekiwaną utratę sygnału, co może wywołać nieprzewidywalne zachowanie dronów.

Należy unikać nawigacji dronami w pobliżu stacji przekąźnikowych BTS (ang. *Base Transceiver Station*),

stosowanych w systemach łączności bezprzewodowej, w tym GSM, wyposażonych w anteny fal elektromagnetycznych z reguły na wysokim maszcie. Ponadto, sygnał GPS istotnie zakłócają burze słoneczne, czyli nagłe i intensywne zmiany pola magnetycznego Ziemi. Do tego dochodzi krótki czas lotu rzędu 20–30 min, co może się przekładać na problemy powrotu „do domu” w przypadku jakichkolwiek zakłóceń.

W przestrzeniach zamkniętych (tunelach), występują silne przepływy powietrza, które należy uwzględnić. Aby zapobiec wypadkom, wybrany system powinien utrzymać pozycję drona w najsilniejszym podmuchu powietrza. Ponadto, większość dronów nie toleruje zderzeń fizycznych, dlatego należy odpowiednio zarządzać ryzykiem kolizji, aby uniknąć szkód zarówno po stronie dronów, jak i infrastruktury. W grę wchodzi jedno wspólne ryzyko kolizji z liniami napowietrznymi, urządzeniami przytorowymi, taborem i budynkami. Zarządzanie takim ryzykiem jest trudne. Lot poniżej sieci trakcyjnej pod napięciem może powodować zakłócenia pracy kompasu na pokładzie dronów i ryzyko kolizji z taborem. Zwiększa się także ryzyko kolizji podczas obsługi dronów poza wizualną linię wzroku (BVLOS).

Wiele państw dysponuje przepisami dotyczącymi minimalnych odległości, na których można latać dronami. Na przykład w Wielkiej Brytanii latanie dronem w odległości do 150 m od linii kolejowej lub stacji jest przestępstwem. Do przekroczenia tej odległości wymagana jest zgoda organów nadzoru, dodatkowe szkolenie i dalsza ocena ryzyka. Z perspektywy operacyjnej, awaria kamery lub utrata łącza wideo zmusza operatora do kontroli wzrokowej i manewrowania, które może być trudne, a czasem nawet niemożliwe w gęszczu obiektów kolejowych.

Tradycyjne koncepcje lotnicze opierają się na zasadzie „zobacz i unikaj”. W przypadku dronów tej zasady można przestrzegać tylko podczas operacji przeprowadzanych w zasięgu linii wzroku lub przy użyciu odpowiedniej technologii, przez przedłużenie tej linii. Jednak nawet wtedy ryzyko kolizji nie jest do końca wyeliminowane. Trzeba mieć świadomość zakrętów i innych obszarów o ograniczonej widoczności, szczególnie w niekorzystnych warunkach atmosferycznych, co często ma miejsce w obrębie infrastruktury kolejowej.

Operacje dronów na kolei poza wizualną linią wzroku są hipotetycznie możliwe z obecnie dostępną technologią, dlatego kolej zaczyna opracowywać własny zestaw standardów i wymagania do osiągnięcia celów inspekcji. W perspektywie można rozważyć wykorzystanie zaawansowanych technik wykrywania przeszkód, automatyczne lądowanie lub skorzystanie ze spadochronu awaryjnego.

Takie operacje wymagają jednak świadomości wysokości. Planowanie lotu z narzędziami będącymi wyposażeniem dronów, powinno wyznaczyć tor

lotu. Lepszym podejściem może być włączenie funkcji śledzenia terenu lotu. Korzysta się tu z postępów w dziedzinie czujników, mikrokomputerów, sterowania i teorii aerodynamicznej. Jednak specyficzna konstrukcja dronów i ich bogate oprzyrządowanie niesie pewne niebezpieczeństwa dla otoczenia. Powodem są niewielkich rozmiarów czujniki mikroelektromechaniczne (ang. *Microelectromechanical Systems* – MEMS), umieszczone w zintegrowanej obudowie, wrażliwe na temperaturę i wibracje, od których trudno je odizolować. Innym problemem, który pojawia się w przypadku małych dronów o długości zazwyczaj mniejszej niż jeden metr, jest stabilność i wytrzymałość w nieprzewidywalnym środowisku kolejowym.

Z wymienionych względów, światowe ośrodki naukowe we współpracy z zarządcami sieci kolejowych, badają wyjątkowe wyzwania związane ze stosowaniem dronów w operacjach do inspekcji i utrzymania infrastruktury kolejowej. Badania te obejmują gromadzenie wiedzy na temat doświadczeń i obaw operatorów kolejowych oraz innych osób pracujących w tym środowisku. Oczekuje się, że wyniki badań pomogą sformułować wymogi bezpieczeństwa dla bezzałogowych statków powietrznych na terenach kolejowych oraz do analizy obowiązujących przepisów i procedur regulujących ich użytkowanie.

5. Wnioski

Prognozy wzrostu rynku dronów wskazują na ogromny potencjał przemysłu kolejowego w zakresie wykorzystania ich możliwości komercyjnych i zarządzania infrastrukturą kolejową.

Inspekcja, jako część diagnostyki infrastruktury kolejowej i badanie wypadków są dwoma kluczowymi obszarami, w których przedsiębiorstwa kolejowe mogą znacznie skorzystać z wdrożenia technologii dronów.

Ponadto, opracowanie autonomicznych dronów wyposażonych w technologię sztucznej inteligencji (ang. *Artificial Intelligence* – AI) stworzy znaczne możliwości ograniczenia liczby personelu badawczego, kosztów, czasu i zmniejszenie ryzyka.

Wcześniej jednak trzeba wziąć pod uwagę wszelkie ograniczenia technologiczne, jak:

- krótki czas lotu, około 20–30 minut, wynikający z pojemności akumulatora,
- ze względów bezpieczeństwa operacyjnego często potrzeba co najmniej dwóch przeszkolonych pracowników, jednego pilota i drugiego obserwatora,
- w celu przeprowadzenia wartościowych analiz badań, musi być zapewnione dokładne pozycjonowanie dronów wzdłuż linii kolejowej,
- do pełnej autonomicznej kontroli potrzebny jest system kontroli dronów, ściśle zintegrowany z ogólnym systemem monitorowania infrastruktury,

- w pełni autonomiczna obsługa dronów wymaga dostępu do lokalnego środowiska (tj. mapowanie środowiska i kontrola kolizji).

W celu wykluczenia niektórych wymienionych ograniczeń, wskazane byłoby stworzenie drona działającego w systemie okresowej inspekcji, połączonego z systemem sygnalizacyjnym. System inspekcji miałby zakodowaną informację o lokalizacji „dom”, która zwolni drona dopiero po otrzymaniu powiadomienia z systemu sygnalizacyjnego, o niezajętości toru.

Jeśli system sygnalizacyjny zgłosi zbliżający się pociąg, wtedy dron zostanie przywołany do „domu”. Po uwolnieniu, dron używałby standardowych ścieżek operacyjnych i kombinacji wyznaczonych przez sygnał GPS, opartych na wizji systemu detekcji precyzyjnego pozycjonowania w zdefiniowanej lokalizacji początkowej.

Warto również wskazać dalsze kierunki wdrażania przez spółkę PKP PLK S.A. dronów do inspekcji infrastruktury kolejowej. Zdaniem autora, pole działania jest duże, a wybrane propozycje są następujące:

- trakcja elektryczna, w tym inspekcja stanu technicznego konstrukcji stalowych (deformacje, korozja), przewodów trakcyjnych, jak również badania kontaktowe z pantografem (w obrębie słupów), badania termowizyjne izolatorów (upływność elektryczna),
- wiadukty i mosty kolejowe o różnych konstrukcjach (dynamika przemieszczeń), uszkodzenia szczególnie w miejscach trudno dostępnych,
- tor kolejowy – inwentaryzacja i akwizycja stanu technicznego (podkłady, przytwierdzenia, złącza szyn), rozjazdy i skrzyżowania (dynamika, układ geometryczny, ogrzewanie – termowizja), skrajnia (również w tunelach),
- osuwające się skarpy nasypów i przekopów, drzewa zagrażające linii, roślinność zarastająca torowiska (wraz z opryskami),
- stacje (budynki, nastawnie, posterunki ruchu), perony (wiaty), urządzenia sterowania ruchem kolejowym,
- monitorowanie wypadków kolejowych.

Literatura

1. Banić M. et.al.: *Intelligent Machine Vision Based Railway Infrastructure Inspection and Monitoring Using UAV*. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering Vol. 17, No 3, 2019, pp. 357–364.
2. Both E.: *Remote track inspections using drones*. Infrastructure, 14 June 2019, WWW <https://infrastructuremagazine.com.au/2019/06/14/remote-track-inspections-using-drones/> [dostęp: 18.02.2020].
3. Burroughs D.: *Sky's the limit for Bane Nor*. International Railway Journal, 15 June 2019, WWW

- https://www.railjournal.com/in_depth/bane-nor [dostęp: 18.02.2020].
4. Clive R.: *Switch and Crossing Optimal Design and Evaluation*. Project S-CODE. Shift2Rail Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 730849. D3.1 Report – Next generation control: monitoring and sensor systems, 2016–2019.
 5. Debevec R.: *A Smart UAV Platform for Railroad Inspection*. Electronic Theses and Dissertations. B.S. University of Central Florida, 2019, p. 54.
 6. Drone-based rail surveys are a 'game changer', CIOB, 14 August 2017, WWW <http://www.constructionmanagermagazine.com/technology/drone-based-system-game-changer-rail-surveying/> [dostęp: 18.02.2020].
 7. Drones for rail: Increasing deployment in the European market. January 1, 2019, WWW <https://www.globalmasstransit.net/archive.php?id=33048#> [dostęp: 18.02.2020].
 8. Drony z termowizją chronią pociągi PKP Cargo przed kradzieżami, Rynek Kolejowy, 13 stycznia 2018, WWW <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/drony-z-termowizja-chronia-pociagi-ppk-cargo-przed-kradziejami-85224.html> [dostęp: 18.02.2020].
 9. Dunthorne J.: *Aerial Data Acquisition for a Digital Railway*. GIM International, Issue 4, Vol. 32 July/August 2018, pp. 26–27.
 10. European Drones Outlook Study Unlocking the value for Europe, SESAR Joint Undertaking, 2016.
 11. Flammini F. et al.: *Railway Infrastructure Monitoring by Drones*. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), November, 2016.
 12. Fonseca K.: *IIT Roorkee Developing Drones For Indian Railways*. Youth Incorporated Magazine, 23rd June 2018, WWW <https://youthincmag.com/iit-roorkee-developing-drones-for-indian-railways> [dostęp 18.02.2020].
 13. Garg P., Ozdagli A., Moreu F.: *Railroad Bridge Inspections for Maintenance and Replacement Prioritization Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Laser Scanning Capabilities*, TRB's Rail Safety IDEA Program: Sponsoring Innovation to Improve Railroad Safety and Performance. Transportation Research Board Annual Conference, Washington D.C., January 2018.
 14. How drones will change the future of railways. Thales.11.11.2019, WWW <https://www.thales-group.com/en/worldwide/transport/magazine/how-drones-will-change-future-railways> [dostęp: 18.02.2020].
 15. Inspection and monitoring of railway infrastructure using aerial drones, ESCAP /TARN/ WG/2019/4. 6th session Bangkok, 10 and 11 December 2019, s. 16.
 16. Jung H.J.; Lee J.H., Kim I.H.: *Challenging issues and solutions of bridge inspection technology using unmanned aerial vehicles*, Proc, SPIE 10598, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018, 1059802 (27 March 2018), WWW <https://doi.org/10.1117/12.2300957> [dostęp: 18.02.2020].
 17. Karpowicz J.: *Using Drones to Create the "Google Maps" of Railways in Europe*. Infrastructure & Transport, March 28, 2018, WWW <https://www.commercialuavnews.com/infrastructure/using-drones-create-google-maps-railways-europe> [dostęp: 18.02.2020].
 18. Kochan A., Rutkowska P., Wójcik M.: *Inspection of the Railway Infrastructure with the use of Unmanned Aerial Vehicles*. Archives of Transport System Telematics, Vol.11, Issue 2, 2018, pp. 11–17.
 19. Lesiak P., Bojarczak P.: *Algorytmy klasyfikacji obrazów wad w badaniach toru kolejowego*, Monografia Wydziału Transportu i Informatyki WSEI w Lublinie pod red. T. Rymarczyka „Współczesne trendy technologiczne w informatycznych systemach złożonych”. Wydaw. INNOVATIO PRESS, Lublin 2019, p. 41–73.
 20. Lillian B.: *UAV Carries out Extensive Inspection of Railroad Truss Bridge*. Unmanned Aerial, May 18, 2017, <https://unmanned-aerial.com/uav-carries-extensive-inspection-railroad-truss-bridge> [dostęp: 18.02.2020].
 21. Maier M.: *Drone-based remote diagnostics. DB is using improved drone technology to make infrastructure inspections more efficient*, WWW https://www.deutschebahn.com/en/Digitalization_new/technology/innovations/Drone-based-remote-diagnostics--4144712 [dostęp: 18.02.2020].
 22. Moreu F., Taha M.R.: *Railroad Bridge Inspections for Maintenance and Replacement Prioritization Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Laser Scanning Capabilities*. IDEA Program Final Report. Contract Number Rail Safety 32. University of New Mexico, 2016–2018.
 23. New system uses drones to monitor railroads. Innovation at UC3M Science Park, Universidad Carlos III de Madrid, WWW https://www.uc3m.es/ss/Satellite/UC3MInstitucional/en/Detalle/Comunicacion_C/1371242477716/1371215537949/New_system_uses_drones_to_monitor_railroads [dostęp: 18.02.2020].
 24. Project EREVOS. European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 780265. ESMERA, 2018, WWW <http://www.esmera-project.eu/erevos/> [dostęp: 18.02.2020].
 25. ProRail Drone Inspections. Arcadis, WWW <https://www.arcadis.com/en/poland/co-robimy/>

- projekty/europe/netherlands/prorail-drone-inspections/ [dostęp: 18.02.2020].
26. Railway Line Inspection, Soko Aerial, 2017, WWW <http://www.sokoair.com/portfolio-item/railway-line-inspection/> [dostęp: 18.02.2020].
27. Railway Lines Inspection, WWW <http://vayuyan.com/services-9.html> [dostęp: 18.02.2020].
28. Rau J.Y. et.al.: *Bridge Crack Detection Using Multi-Rotary UAV and Object-Base Image Analysis*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W6, 2017. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 4–7 September 2017, Bonn, Germany, pp. 311–318.
29. Ravitharan R.: *The Implementation of Unmanned Autonomous Systems for Railway Inspection*, Monash University, Australia. Institute of Railway Technology, WWW https://www.unescap.org/sites/default/files/Item6_Monash_UAS_0.pdf [dostęp: 18.02.2020].
30. Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca z 2019 roku w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich, Dz.Urz. UE L 152/1 z 11.06.2019.
31. Rutkowski P. et.al.: *Zastosowanie usług świadczonych z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (usługi BSP) dla wzrostu skuteczności i efektywności oraz jakości świadczenia usług publicznych przez samorząd terytorialny*, Opracowanie wykonane na zlecenie Ministerstwa Przedsiębiorczości i Technologii w ramach umowy nr DIN/BDG-VIII-POIR-4/18, Fundacja Instytut MikroMakro, Warszawa, 2018.
32. Sherrock E., Neubecker K.: *Unmanned Aircraft System Applications in International Railroads*, U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration, Office of Research, Development and Technology Washington, DC 20590, February, 2018.
33. Sikorski S., Szmigiero M.: *Możliwości zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w systemie Państwowego Ratownictwa Medycznego w świetle obowiązujących regulacji prawnych*, Wydawnictwo SGH, Zeszyt Naukowy 167, 2018, pp. 143–155.
34. Singh A.K. et.al.: *Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery*. ICT Express 5, 2019, pp. 250–255.
35. Smith, E.M.: *A collection of computer vision algorithms capable of detecting linear infrastructure for the purpose of UAV control*, MSc Thesis, Virginia Tech, USA, 2016.
36. Wieteska S.: *Możliwości zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w likwidacji szkód w ubezpieczeniach upraw rolnych w Polsce*, Studia Ekonomiczne, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Nr 331, Katowice 2017, pp. 190–200.
37. Wójcik M.: *Badanie stanu technicznego infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych*, Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Transport Kolejowy 2017, Przeszłość – Teraźniejszość – Przyszłość, UTK, s. 148–164.
38. Wu Y. et.al.: *A UAV-Based Visual Inspection Method for Rail Surface Defects*, Applied Sciences, Vol. 8, No. 7, 1028, 2018.
39. Zhang D. et.al.: *Unmanned Aerial System (UAS) for Railway Inspection*, AusRAIL 2018, Rail for a Better Future, 27–28 November 2018, Canberra, ACT, 2018.